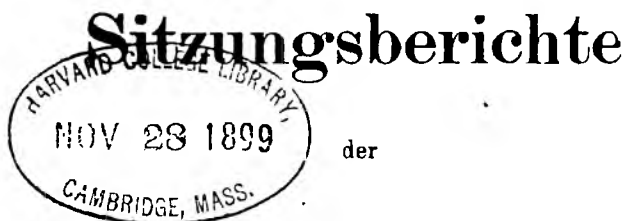


Y. Soc 1727.15



Sitzungsberichte

der

mathematisch-physikalischen Classe

der

k. b. Akademie der Wissenschaften

zu München.

1899. Heft II.

München.

Verlag der k. Akademie.

1899.

In Commission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth)

Bilinearformen und Differentialsysteme.

Von E. von Weber.

(Eingelaufen 8. Juli.)

Die algebraischen Thatsachen, die den bisher entwickelten allgemeinen Integrationstheorien partieller Differentialprobleme zu Grunde liegen, fließen fast ausnahmslos aus derselben Quelle; es ist dies die Theorie der Schaaren von Bilinearformen. Der hiermit berührte Zusammenhang soll in der vorliegenden Note für den Fall der Differentialsysteme mit zwei unabhängigen Veränderlichen des näheren dargelegt werden.

§ I. Passive Differentialsysteme.

1. In diesem § werden die für das Folgende nötigen Sätze aus der Theorie der Differentialsysteme beliebiger Ordnung zusammengestellt.¹⁾

Es seien x, y unabhängige Veränderliche, $z_1, z_2, \dots, z_n$ unbekannte Funktionen dieser Variablen, und es werde gesetzt:

$$z_{\alpha\beta}^i = \frac{\partial^{\alpha+\beta} z_i}{\partial x^\alpha \partial y^\beta}; \quad z_{i0}^i = z_i \quad (\alpha, \beta = 1, 2, \dots)$$

Unter einem Differentialsystem versteht man dann ein beliebiges Gleichungssystem in $x, y, z_1, \dots, z_n$ und einer endlichen Zahl der Ableitungen $z_{\alpha\beta}^i$; die Ordnung des Differentialsystems ist die Ordnung der höchsten darin auftretenden Ableitungen.

¹⁾ Vgl. C. Méray und C. Riquier, Ec. Norm. 1890, p. 23; Riquier Ec. Norm. 1893, p. 65, 123, 167; Sav. Étr. 32; C. Bourlet, Ec. Norm. 1891 Supplém.; A. Tresse Acta Math. 18 p. 1 (1894).

2. Wir wollen die z_i und ihre Ableitungen bis zur μ^{ten} Ordnung einschliesslich folgendermassen in eine Reihe schreiben:

$$(1) \quad z_{\mu 0}^1, z_{\mu-1,1}^1 \dots z_{0\mu}^1, z_{\mu 0}^2 \dots z_{0\mu}^2 \dots z_{\mu 0}^{\mu} \dots z_{0\mu}^{\mu}, z_{\mu-1,0}^1 \dots \\ \dots z_{0,\mu-1}^{\mu} \dots z_{10}^1, z_{01}^1, z_{10}^2 \dots z_{01}^{\mu}, z_{00}^1 \dots z_{00}^{\mu}.$$

In dieser Reihe, die sich nach links hin auf Grund desselben Anordnungsprincips unbegrenzt fortsetzen lässt, steht demnach die Ableitung

$$z_{\gamma\delta}^k \text{ rechts von } z_{\alpha\beta}^i,$$

wenn entweder

$$1) \gamma + \delta < \alpha + \beta;$$

oder

$$2) \gamma + \delta = \alpha + \beta; k > i;$$

oder

$$3) \gamma + \delta = \alpha + \beta; k = i; \gamma < \alpha.$$

Eine Relation

$$(2) \quad z_{\alpha\beta}^i = \varphi(x y z_1 \dots z_n \dots z_{\gamma\delta}^k \dots)$$

heisst **canonisch**, wenn alle in der Funktion φ vorkommenden Grössen $z_i, z_{\gamma\delta}^k$ in der Reihe (1) rechts von $z_{\alpha\beta}^i$ stehen.

Ein Differentialsystem S heisst **canonisch**¹⁾, wenn 1) jede einzelne Gleichung von S canonisch ist; 2) keine der Grössen $z_{\alpha\beta}^i$, die auf den linken Seiten von S auftritt, in einer der rechten Seiten von S vorkommt.

3. Ist die Gleichung

$$z_{\gamma\delta}^k = \psi(x y, \dots z_i \dots z_{\gamma\delta}^k \dots)$$

canonisch, und substituiert man für $z_{\gamma\delta}^k$ die Funktion ψ in die rechte Seite der canonischen Gleichung (2), so erhält man wieder eine canonische Gleichung. Daraus folgt sofort, dass jedes beliebige Differentialsystem durch geeignete Auflöser auf die canonische Form gebracht werden kann.

4. Ist f eine Funktion der Grössen

$$(3) \quad x, y, z_{\alpha\beta}^i \quad (\alpha, \beta = 0, 1, 2 \dots)$$

¹⁾ Treske a. a. O.

so verstehen wir unter $D_x f$, $D_y f$ die folgenden Ausdrücke:

$$D_x f \equiv \frac{\partial f}{\partial x} + \sum \frac{\partial f}{\partial z_i} z_{10}^i + \sum \sum \sum \frac{\partial f}{\partial z_{\alpha\beta}^i} z_{\alpha+1,\beta}^i$$

$$D_y f \equiv \frac{\partial f}{\partial y} + \sum \frac{\partial f}{\partial z_i} z_{01}^i + \sum \sum \sum \frac{\partial f}{\partial z_{\alpha\beta}^i} z_{\alpha,\beta+1}^i.$$

Die Operationen D_x , D_y bezeichnen wir als Derivationen nach x bzw. y , die Gleichungen

$$D_x f = 0, \quad D_y f = 0$$

als die ersten Derivirten der Gleichung $f = 0$, ferner die Gleichungen

$$D_x(D_x f) = 0, \quad D_x(D_y f) = D_y(D_x f) = 0, \quad D_y(D_y f) = 0$$

als die zweiten Derivirten etc.

Genügen 4 Zahlen ϱ , ϱ' , σ , σ' den Bedingungen

$$\varrho' \leq \varrho, \quad \sigma' \leq \sigma$$

und steht die Ableitung $z_{\gamma\delta}^i$ in der Reihe (1) rechts von $z_{\alpha\beta}^i$, so steht auch die Ableitung

$$z_{\gamma+\varrho', \delta+\sigma'}^i \text{ rechts von } z_{\alpha+\varrho, \beta+\sigma}^i;$$

daraus folgt sofort, dass die unbegrenzt vielen Derivirten einer canonischen Gleichung wieder canonisch sind.

5. Tritt die Ableitung $z_{\alpha\beta}^i$ in einer der Gleichungen des canonischen Differentialsystems S auf der linken Seite auf, so bezeichnen wir sie selbst und alle Ableitungen der Form

$$z_{\alpha+s, \beta+t}^i \quad (s, t = 0, 1, 2, \dots \text{ in inf.})$$

als **principale** Grössen des Systems S , alle übrigen Variablen (3) als **parametrische** Grössen von S . Die Anzahl der principalen Grössen ist also stets unbegrenzt, aber nicht notwendig die der parametrischen.

Enthält S zwei principale Grössen mit demselben obern Index:

$$(4) \quad z_{\alpha\beta}^i, \quad z_{\alpha'\beta'}^i,$$

und ist α'' die grössere der Zahlen α, α' , ferner β'' die grössere der Zahlen β, β' , so heisst die (gleichfalls principale) Ableitung $z_{\alpha''\beta''}^t$ eine **cardinale** Ableitung des canonischen Systems S .

6. Es sei μ die Ordnung des canonischen Systems S ; dann ist μ auch die Ordnung der höchsten principalen Ableitungen, die in den Gleichungen S vorkommen. Ist dann ν eine Zahl $\geq \mu$, so denken wir uns jede Gleichung in S nach x und y wiederholt derivirt, und zwar so lange, bis die derivirten Gleichungen die Ordnung ν erreichen. Indem wir alle so erhaltenen Gleichungen dem System S hinzufügen, erhalten wir ein Differentialsystem S_ν .

Dieses System ist nun zwar im Allgemeinen nicht canonisch; aber es besteht nach Nr. 4 aus lauter canonischen Gleichungen, und da die Anzahl der Grössen $z_{\gamma\delta}^k$, die in der Reihe (1) rechts von einer bestimmten Ableitung $z_{\alpha\beta}^t$ stehen, begrenzt ist, so schliesst man nach Nr. 3 leicht, dass mittels des Systems S_ν jede principale Ableitung bis zur ν^{ten} Ordnung einschliesslich vermöge einfacher Substitutionen durch die parametrischen Grössen allein dargestellt werden kann.

Enthält aber S zwei principale Ableitungen (4) mit demselben obern Index und wählt man

$$\nu \geq \alpha'' + \beta'',$$

wobei $z_{\alpha''\beta''}^t$ die zugehörige cardinale Ableitung bedeutet, so tritt die letztere auf den linken Seiten mindestens zweier verschiedener Gleichungen des Systems S_ν auf, lässt sich also mit Hülfe von S_ν auf mindestens zwei verschiedene Arten durch die parametrischen Grössen allein darstellen. Diese beiden Darstellungen sind natürlich im allgemeinen verschieden, und ihre Vergleichung führt dann zu einer Relation zwischen den parametrischen Grössen allein.

7. Ein canonisches System S heisst **passiv**, wenn sich mittels der Gleichungen S und ihrer Derivirten jede principale Ableitung auf nur eine Art durch die parametrischen Grössen allein darstellen lässt, wenn also aus dem System S_ν , wie gross

auch der Index ν gewählt sein mag, keine Relation zwischen den parametrischen Grössen hervorgeht.

Ist ω die Ordnung der höchsten cardinalen Ableitung von S und ergeben sich aus S_ω (bzw. aus S_μ im Falle $\omega \leq \mu$) keine Relationen zwischen den parametrischen Grössen, so gilt dasselbe a fortiori für alle Systeme S_ν ($\nu > \omega$). Die notwendigen und hinreichenden Bedingungen für die Passivität des canonischen Systems S der Ordnung μ finden also ihren Ausdruck in einem gewissen System partieller Differentialgleichungen, in dem die Variablen $x, y, z_1 \dots z_n$ und die parametrischen Ableitungen bis zur μ^{ten} Ordnung einschliesslich als Independenten figuriren, und dem die rechten Seiten der Gleichungen S identisch zu genügen haben.

8. Das canonische System S sei von der Ordnung μ und nicht passiv. Bildet man dann das Differentialsystem $S_{\mu+1}$, bringt dasselbe auf die canonische Form und verfährt mit letzterer wie mit S etc., so gelangt man nach einer endlichen Zahl von Schritten¹⁾ entweder zu Widersprüchen, eventuell zu Relationen in x, y allein, und das vorgelegte System S besitzt dann kein Integral, oder zu einem passiven System, auf dessen Integration die von S hinauskommt.

Die Aufsuchung der etwaigen Integrale eines beliebigen Differentialsystems kommt also stets auf die Integration eines canonischen, passiven Systems hinaus.

9. Es sei S ein canonisches, passives System der Ordnung μ ; ferner sollen die Grössen

$$(5) \quad x_0, y_0, \dots, z_i, \dots, z_{\gamma\delta}^k, \dots$$

constante Anfangswerte der parametrischen Grössen von S bedeuten und folgenden Bedingungen genügen:

1) Die rechten Seiten von S sind in der Umgebung der Stelle $x_0, y_0, z_i, z_{\gamma\delta}^k$ regulär.

2) Falls die Zahl der parametrischen Grössen, also auch die der Constanten (5) unbegrenzt ist, so sollen die Potenzreihen

¹⁾ Riquier, Éc. Norm. 1893; Tresse a. a. O.

$$\sum_{\gamma} \sum_{\delta} \frac{\bar{z}_{\gamma\delta}^k}{\gamma! \delta!} (x - x_0)^\gamma (y - y_0)^\delta \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

in denen die Summe über alle parametrischen Grössen mit dem obern Index k zu erstrecken ist, einen gemeinsamen Konvergenzbezirk besitzen.

Unter diesen Annahmen gibt es ein und nur ein System von Funktionen $z_1 \dots z_n$, die sich an der Stelle $x_0 y_0$ regulär verhalten, dem System S identisch genügen, und die Eigenschaft besitzen, dass die parametrischen $\bar{z}_{\gamma\delta}^k$ an der Stelle $x_0 y_0$ bzw. die vorgeschriebenen Werte $\bar{z}_{\gamma\delta}^k$ annehmen.

10. Im Folgenden werden ausschliesslich passive Systeme erster Ordnung betrachtet. Die canonische Form eines solchen Systems besteht aus Gleichungen der Form

$$(K) \quad \begin{cases} \frac{\partial z_a}{\partial x} = \varphi_a \left(x, y, z_1 \dots z_n, \frac{\partial z_a}{\partial y}, \frac{\partial z_b}{\partial x}, \frac{\partial z_b}{\partial y}, \frac{\partial z_b}{\partial x}, \frac{\partial z_b}{\partial y}, \dots \right) \\ \frac{\partial z_c}{\partial y} = \psi_c \left(x, y, z_1 \dots z_n, \frac{\partial z_d}{\partial x}, \frac{\partial z_d}{\partial y}, \frac{\partial z_d}{\partial x}, \frac{\partial z_d}{\partial y}, \dots \right) \end{cases}$$

($b, b' \dots > a; d, d' \dots > c$).

Bezeichnet man mit $z_a, z_{a'}, z_{a''} \dots$ diejenigen unter den z_i , deren erste Ableitungen beide auf den rechten Seiten von (K) vorkommen, so sind die cardinalen Ableitungen des Systems (K) die folgenden:

$$\frac{\partial^2 z_a}{\partial x \partial y}, \quad \frac{\partial^2 z_{a'}}{\partial x \partial y}, \quad \frac{\partial^2 z_{a''}}{\partial x \partial y}, \dots,$$

und die notwendigen und hinreichenden Bedingungen für die Passivität von (K) bestehen dann nach Nr. 7 darin, dass sich jede der genannten Ableitungen mit Hülfe der ersten Derivirten von (K) auf eine und nur eine Weise durch $x, y, z_1 \dots z_n$ und die ersten und zweiten parametrischen Ableitungen ausdrücken lässt.

§ II. Zur Theorie der Schaaren von Bilinearformen.

11. Es seien $x_1 x_2 \dots x_m$, bzw. $y_1 y_2 \dots y_n$ zwei Variabelngruppen, u und v willkürliche Parameter, endlich P_{ik} , Q_{ik} Constante. Dann wird das volle Invariantensystem, das die Schaar von Bilinearformen

$$W = u \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n P_{ik} x_i y_k + v \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n Q_{ik} x_i y_k$$

gegenüber beliebigen linearen homogenen Transformationen der beiden Variabelngruppen x und y besitzt, nach Kronecker¹⁾ folgendermassen gebildet:

Der Rang der Matrix

$$(A) \begin{vmatrix} u P_{11} + v Q_{11} & u P_{12} + v Q_{12} & \dots & u P_{1n} + v Q_{1n} \\ u P_{21} + v Q_{21} & u P_{22} + v Q_{22} & \dots & u P_{2n} + v Q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u P_{m1} + v Q_{m1} & u P_{m2} + v Q_{m2} & \dots & u P_{mn} + v Q_{mn} \end{vmatrix}$$

sei gleich τ , d. h. es mögen in diesem Schema alle $\tau + 1$ -reihigen, nicht aber alle τ -reihigen Determinanten für beliebige u, v verschwinden. Dann gibt es $m - \tau$ Systeme von je m ganzrationalen homogenen Funktionen der Variabeln u, v mit constanten Coefficienten:

$$(6) \quad a_{1s} a_{2s} \dots a_{ms} \quad (s = 1, 2, \dots, m - \tau)$$

derart, dass die Identitäten

$$a_{1s} \frac{\partial W}{\partial x_1} + a_{2s} \frac{\partial W}{\partial x_2} + \dots + a_{ms} \frac{\partial W}{\partial x_m} = 0$$

für jedes beliebige Wertsystem $u, v, y_1 \dots y_n$ befriedigt sind und dass in der Matrix, die aus den $m - \tau$ Zeilen (6) besteht, nicht alle $m - \tau$ -reihigen Determinanten für beliebige u, v verschwinden. Dann ist jedes andere Formensystem $a_1 \dots a_m$, das die Identität

¹⁾ Sitzungsber. der Berl. Ak. 1890, p. 1225.

$$(7) \quad a_1 \frac{\partial W}{\partial x_1} + \dots + a_m \frac{\partial W}{\partial x_m} = 0$$

erfüllt, eine lineare Combination der Systeme (6), mit Coefficienten, die in den u, v rational sind. Wir denken uns die $m - \tau$ Formensysteme (6) so ausgewählt, dass ihre Grade in u, v möglichst klein sind, und es sei M_s der Grad des s^{ten} dieser Formensysteme.

Ebenso bezeichnen wir mit

$$b_{1s} \ b_{2s} \dots b_{ns} \ (s = 1, 2, \dots, n - \tau)$$

$n - \tau$ Formensysteme, in deren Matrix nicht alle $n - \tau$ -reihigen Determinanten für beliebige u, v verschwinden, und die der Identität

$$b_1 \frac{\partial W}{\partial y_1} + b_2 \frac{\partial W}{\partial y_2} + \dots + b_n \frac{\partial W}{\partial y_n} = 0$$

für beliebige Werte $u, v, x_1 \dots x_m$ genügen. Diese Formensysteme seien so ausgewählt, dass ihre Gradzahlen $N_1, N_2, \dots, N_{n-\tau}$ möglichst klein werden.

Wir dürfen ohne die Allgemeinheit zu beschränken annehmen, dass die τ -reihigen Determinanten der Matrix A für $v = 0$ nicht alle verschwinden. Es sei dann

$$(w - w_1)^{\lambda_{11}} (w - w_2)^{\lambda_{12}} \dots (w - w_n)^{\lambda_{1n}},$$

von einem constanten Faktor abgesehen, der grösste gemeinschaftliche Divisor aller τ -reihigen Determinanten der Matrix

$$(A') \quad Q_{ik} - w P_{ik} \quad (i = 1, \dots, m; k = 1 \dots n)$$

wobei die Constanten $w_1, w_2, \dots, w_n$ alle verschieden sind.

Allgemein sei

$$(w - w_1)^{\lambda_{i1}} (w - w_2)^{\lambda_{i2}} \dots (w - w_n)^{\lambda_{in}}$$

der grösste gemeinsame Divisor aller $\tau - i + 1$ -reihigen Determinanten obiger Matrix. Setzt man dann:

$$\lambda_{1h} - \lambda_{2h} = c_{1h}; \lambda_{2h} - \lambda_{3h} = c_{2h}; \dots \lambda_{\tau-1,h} - \lambda_{\tau h} = c_{\tau-1,h}; \lambda_{\tau h} = c_{\tau h},$$

so bilden die Zahlen

$$M_1, M_2, \dots M_{m-\tau}, N_1, N_2, \dots N_{n-\tau};$$

$$w_1, w_2, \dots w_\kappa; e_{\alpha\beta} (\alpha = 1, 2, \dots \tau; \beta = 1, 2, \dots \kappa)$$

das vollständige Invariantensystem der Schaar W , und man hat

$$(8) \quad \tau = \Sigma \Sigma e_{\alpha\beta} + \Sigma M_i + \Sigma N_k.$$

12. Für das Folgende ist eine genauere Bestimmung der Zahlen M_i nötig. Es sei allgemein μ_h die Anzahl derjenigen der Zahlen M_i , die gleich h sind; ebenso seien ν_h von den Zahlen N_k gleich h . Da die Zahlen M_i, N_k offenbar nicht grösser als τ sein können, so hat man

$$\mu_{\tau+1} = \nu_{\tau+1} = \mu_{\tau+2} = \nu_{\tau+2} = \dots = 0.$$

Ferner gelten die Beziehungen:

$$(9) \quad \mu_0 + \mu_1 + \dots + \mu_\tau = m - \tau; \nu_0 + \nu_1 + \dots + \nu_\tau = n - \tau.$$

Die beiden Matrices

$$\left\| \begin{array}{cccc} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mn} \end{array} \right\|; \left\| \begin{array}{cccc} Q_{11} & Q_{12} & \dots & Q_{1n} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ Q_{m1} & Q_{m2} & \dots & Q_{mn} \end{array} \right\|$$

mögen mit P bzw. Q bezeichnet werden, ferner mit B_1 die Matrix

$$(B_1) \quad \left\| \begin{array}{cccccc} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} & Q_{11} & Q_{12} & \dots & Q_{1n} \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mn} & Q_{m1} & Q_{m2} & \dots & Q_{mn} \end{array} \right\|.$$

Allgemein bezeichne B_h die aus $(h+1)n$ Columnen und aus hm Zeilen bestehende Matrix, die dadurch gebildet wird, dass man das Schema B_1 h -mal in staffelförmiger Anordnung hinschreibt, also in leicht verständlicher, abgekürzter Schreibweise folgende Form hat:

$$(B_h) \quad \left\| \begin{array}{cccccc} P & Q & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & P & Q \end{array} \right\|;$$

endlich sei ϱ_h der Rang der Matrix B_h .

Werden dann diejenigen unter den Formensystemen (6), deren Grad h ist, mit

$$(10) \quad \alpha_{1s}^{(h)}, \alpha_{2s}^{(h)} \dots \alpha_{ms}^{(h)} \quad (s = 1, 2, \dots \mu_h)$$

bezeichnet, so bestehen folgende Sätze:

1) Genügt ein System $\alpha_1 \dots \alpha_m$ von ganzrationalen homogenen Functionen h^{ten} Grads der Variabeln u, v der Identität (7), so ist es eine lineare Combination der den obern Indices $0, 1, \dots, h-1, h$ entsprechenden Formensysteme (10), und zwar sind die Coefficienten dieser Linearcombination **ganze** rationale homogene Functionen in u, v .

2) Es gilt die Gleichung:

$$\mu_h = (h+1)m - \varrho_{h+1} - 2\mu_{h-1} - 3\mu_{h-2} \dots - (h+1)\mu_0.$$

Beide Behauptungen sind für $h=0$ evident; wir wollen annehmen, dass sie für $h=0, 1, \dots, l-1$ bewiesen seien, und zeigen, dass sie unter dieser Annahme auch für $h=l$ zutreffen.

13. Zu diesem Zwecke setzen wir

$$\alpha_i \equiv \alpha_i^{(0)} u^l + \alpha_i^{(1)} u^{l-1} v + \dots + \alpha_i^{(l-1)} u v^{l-1} + \alpha_i^{(l)} v^l$$

worin die $\alpha_i^{(h)}$ Constante bedeuten, und drücken aus, dass die linke Seite von (7) für beliebige $u, v, y_1 \dots y_n$ verschwindet.

Dadurch erhalten wir:

$$(11) \quad \left\{ \begin{array}{l} \sum_1^m \alpha_i^{(0)} P_{ik} = 0 \\ \sum_1^m (\alpha_i^{(0)} Q_{ik} + \alpha_i^{(1)} P_{ik}) = 0 \\ \sum_1^m (\alpha_i^{(1)} Q_{ik} + \alpha_i^{(2)} P_{ik}) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, n) \\ \vdots \\ \sum_1^m (\alpha_i^{(l-1)} Q_{ik} + \alpha_i^{(l)} P_{ik}) = 0 \\ \sum_1^m \alpha_i^{(l)} Q_{ik} = 0 \end{array} \right.$$

Es ist dies ein lineares homogenes Gleichungssystem mit den $(l+1)m$ Unbekannten

$$(12) \quad \alpha_1^{(0)} \alpha_1^{(1)} \dots \alpha_1^{(l)}, \alpha_2^{(0)} \dots \alpha_2^{(l)} \dots \alpha_m^{(0)} \dots \alpha_m^{(l)},$$

und die Matrix dieses Gleichungssystemes ist B_{l+1} ; also besitzen die Gleichungen (11) genau

$$q = (l+1)m - \varrho_{l+1}$$

linear unabhängige Lösungssysteme:

$$\alpha_{1s}^{(0)} \dots \alpha_{1s}^{(l)} \alpha_{2s}^{(0)} \dots \alpha_{2s}^{(l)} \dots \alpha_{ms}^{(0)} \dots \alpha_{ms}^{(l)} \quad (s = 1, 2, \dots, q).$$

Wir multiplizieren nun das Formensystem (10) der Reihe nach mit den Produkten

$$u^{l-h}; u^{l-h-1} \cdot v; \dots u \cdot v^{l-h-1}; v^{l-h}.$$

Indem wir diese Produkte für $h = 0, 1 \dots l-1$ bilden, erhalten wir Formensysteme l^{ten} Grades, die alle der Identität (7) genügen, und deren Anzahl gleich:

$$(13) \quad (l+1)\mu_0 + l\mu_1 + (l-1)\mu_2 + \dots + 2\mu_{l-1}$$

ist. Diesen Formensystemen entsprechen ebensoviele Wertssysteme (12), die den Gleichungen (11) genügen, und diese Lösungssysteme, deren Inbegriff wir der bequemerem Ausdrucksweise halber mit L bezeichnen wollen, sind linear unabhängig. Andernfalls wäre nämlich eines der obigen Formensysteme l^{ten} Grads mittels constanter Coefficienten aus den übrigen linear zusammensetzbar; also wäre eines der Formensysteme

$$(14) \quad \alpha_{1s}^{(h)} \alpha_{2s}^{(h)} \dots \alpha_{ms}^{(h)} \\ (s = 1, 2, \dots, \mu_h; h = 0, 1, \dots, l-1)$$

eine lineare Combination der andern, was der Definition dieser Formensysteme widerspricht.

Ausser den Lösungssystemen L , deren Anzahl durch (13) gegeben ist, besitzen nun die Gleichungen (11) noch ω weitere Auflösungen:

$$\alpha_{1s}^{(0)} \dots \alpha_{1s}^{(l)}, \alpha_{2s}^{(0)} \dots \alpha_{2s}^{(l)} \dots \alpha_{ms}^{(0)} \dots \alpha_{ms}^{(l)} \quad (s = 1, 2, \dots, \omega)$$

die mit den Systemen L zusammen q linear unabhängige Lösungssysteme darstellen; dabei ist gesetzt:

$$\omega = (l+1)m - \mu_{l+1} - 2\mu_{l-1} - 3\mu_{l-2} - \dots - (l+1)\mu_1$$

Bilden wir jetzt die nachstehenden Formen l^{ten} Grads:

$$\alpha_{is}^{(l)} = \alpha_{is}^{(0)} u^l + \alpha_{is}^{(1)} u^{l-1} v + \dots + \alpha_{is}^{(l)} v^l \quad (s = 1 \dots \omega)$$

so verschwinden in der Matrix, die aus den ω Zeilen

$$(15) \quad \alpha_{1s}^{(l)} \alpha_{2s}^{(l)} \dots \alpha_{ms}^{(l)} \quad (s = 1, 2 \dots \omega)$$

und aus den $\mu_0 + \dots + \mu_{l-1}$ Zeilen (14) besteht, nicht alle Determinanten der Ordnung

$$\mu_0 + \mu_1 + \dots + \mu_{l-1} + \omega$$

für beliebige u, v . Andernfalls verschwänden nämlich diese Determinanten insbesondere auch für $u = 1, v = 0$. Dann gäbe es offenbar ein Constantensystem $\lambda_s^{(h)}$ von der Beschaffenheit, dass nicht alle Constanten $\lambda_1^{(h)} \lambda_2^{(h)} \dots \lambda_\omega^{(h)}$ verschwänden, und dass die m Formen l^{ten} Grads:

$$\sum_1^\omega \lambda_s^{(h)} \alpha_{is}^{(l)} + \sum_0^{l-1} \sum_1^{\mu_h} \lambda_s^{(h)} \alpha_{is}^{(h)} u^{l-h} \quad (i = 1, 2, \dots m)$$

durch v teilbar, also in der Form $v B_i$ darstellbar wären; die B_i wären dann Formen $l-1^{\text{ten}}$ Grads in u, v , die der Identität

$$B_1 \frac{\partial W}{\partial x_1} + \dots + B_m \frac{\partial W}{\partial x_m} = 0$$

genügen. Da nun die Behauptung 1) des vor. Art. für den Fall $h = l-1$ bereits bewiesen sein sollte, so wäre das Formensystem $B_1 \dots B_m$ als lineare Combination mit ganz rationalen, in u, v homogenen Coefficienten aus dem Formensystem (14) zusammensetzbar; also wäre eines der ω Grössensysteme (15) in derselben Weise durch die übrigen Systeme (15) und die Systeme (14) darstellbar, was der Definition der Systeme (15) widerspricht.

Aus dieser Definition folgt ferner, dass jedes Formensystem $a_1 \dots a_m$ vom Grade l in den u, v , das die Identität (7) befriedigt, sich als lineare Combination mit ganz rationalen Coefficienten

in $u v$ aus den Formensystemen (14) (15) zusammensetzen lässt; also hat man $\omega = \mu_l$, und die beiden Behauptungen der Nr. 12 sind sonach auch für den Fall $h = l$ als richtig erkannt.

Man hat infolgedessen die Recursionsformeln

$$(16) \quad \begin{cases} \mu_0 &= m - \varrho_1; \\ \mu_1 &= 2m - \varrho_2 - 2\mu_0; \\ \mu_2 &= 3m - \varrho_3 - 2\mu_1 - 3\mu_0; \\ &\vdots \\ \mu_r &= (r+1)m - \varrho_{r+1} - 2\mu_{r-1} - 3\mu_{r-2} - \dots - (r+1)\mu_0 \\ \mu_{r+1} &= 0, \mu_{r+2} = 0 \dots \end{cases}$$

und es lassen sich mittels dieser Formeln die ϱ_i durch die μ_i ausdrücken, und umgekehrt.

Genau ebenso erhält man natürlich auch die Gleichungen:

$$\nu_h = (h+1)m - \sigma_{h+1} - 2\nu_{h-1} - 3\nu_{h-2} - \dots - (h+1)\nu_0 \\ (h = 0, 1, \dots, r),$$

wenn σ_h den Rang der aus $(h+1)m$ Columnen und hn Zeilen bestehenden Matrix bedeutet, die aus dem Schema

$$(C_1) \quad \begin{vmatrix} P_{11} & P_{21} & \dots & P_{m1} & Q_{11} & Q_{21} & \dots & Q_{m1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{1n} & P_{2n} & \dots & P_{mn} & Q_{1n} & Q_{2n} & \dots & Q_{mn} \end{vmatrix}$$

genau ebenso gebildet wird, wie die Matrix B_h aus B_1 .

§ III. Involutionssysteme erster Ordnung.

14. Es werde unter J ein beliebiges Differentialsystem erster Ordnung

$$(J) \quad f_i(x, y, z_1, \dots, z_n, p_1, \dots, p_n, q_1, \dots, q_n) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

mit n unbekannten Funktionen $z_1, \dots, z_n$ verstanden; dabei ist gesetzt:

$$p_i = \frac{\partial z_i}{\partial x}; \quad q_i = \frac{\partial z_i}{\partial y}.$$

Wir dürfen, ohne die Allgemeinheit zu beschränken, annehmen, dass die Gleichungen J hinsichtlich der $2n$ Variablen p_i, q_i unabhängig sind, also nach m derselben aufgelöst werden können; dann ist $m \leq 2n$ und die Matrix B_i des vorigen §, in der

$$(17) \quad P_{ik} = \frac{\partial f_i}{\partial p_k}; \quad Q_{ik} = \frac{\partial f_i}{\partial q_k}$$

gesetzt wird, besitzt vermöge des gegebenen Gleichungssystems J den Rang

$$\varrho_1 = m,$$

d. h. es verschwinden vermöge J nicht alle m reihigen Determinanten.

Wir nehmen jetzt an, dass die canonische Form des Systems J passiv sei, und wollen untersuchen, welche Bedingungen sich hieraus für die unaufgelöste Form des Systems J ableiten lassen.

15. Die Matrix A des vorigen §, in der die P_{ik}, Q_{ik} wieder durch (17) definiert seien, besitze den Rang τ , d. h. also es mögen in A alle $\tau + 1$ -reihigen, aber nicht alle τ -reihigen Determinanten für beliebige u, v vermöge der Gleichungen J verschwinden; wir bezeichnen A als die charakteristische Matrix des Differentialsystems J . Ferner möge die canonische Auflösung K dieses Differentialsystems aus Gleichungen der Form:

$$(K) \quad \begin{aligned} p_a &= \varphi_a(x, y, z_1 \dots z_n, q_a, p_b, q_b, p_{b'}, q_{b'}, \dots) \\ q_c &= \psi_c(x, y, z_1 \dots z_n, p_d, q_d, p_{d'}, q_{d'}, \dots) \\ (b, b' \dots &> a; d, d' \dots > c) \end{aligned}$$

bestehen, und es sei σ die Anzahl derjenigen unter den Zahlen c , die auch unter den Zahlen a vorkommen, m. a. W.: Die Anzahl der Unbekannten z_a , deren erste Ableitungen p_a, q_a alle beide auf den linken Seiten des canonischen Systems K' auftreten.

Indem wir jede der Gleichungen K je einmal nach x und y deriviren, und die zweiten Ableitungen

$$\frac{\partial^2 z_i}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 z_i}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 z_i}{\partial y^2}$$

bezw. mit r_i, s_i, t_i bezeichnen, erhalten wir $2m$ Gleichungen K' der zweiten Ordnung, und unter ihnen befinden sich σ Paare der Eigenschaft, dass die linken Seiten der beiden Relationen eines Paares die gleiche Ableitung s_a enthalten. Eliminirt man aus den rechten Seiten eines solchen Gleichungspaares die etwaigen principalen Ableitungen 2. O. mit Hülfe der übrigen Gleichungen K' , so müssen, falls K passiv sein soll, die genannten rechten Seiten identisch verschwinden, m. a. W.: Betrachtet man K' als ein System linearer Gleichungen in den $3n$ Unbekannten r_i, s_i, t_i , so reduciren sie sich vermöge K auf genau $2m - \sigma$ linear unabhängige Gleichungen (vgl. Nr. 10).

Da nun K die Auflösung von J ist, so gilt die letztere Thatsache auch von dem linearen Gleichungssystem, das aus J durch je einmalige Derivation nach x und y entsteht:

$$(18) \quad \begin{cases} M_i + \sum_k P_{ik} r_k + \sum_k Q_{ik} s_k = 0 \\ N_i + \sum_k P_{ik} s_k + \sum_k Q_{ik} t_k = 0 \end{cases} \quad (i = 1 \dots m)$$

$$\left(M_i \equiv \frac{\partial f_i}{\partial x} + \sum \frac{\partial f_i}{\partial z_k} p_k; \quad N_i \equiv \frac{\partial f_i}{\partial y} + \sum \frac{\partial f_i}{\partial z_k} q_k \right);$$

es muss also der Rang der Matrix:

$$(B) \quad \left\| \begin{array}{cccccc} M_1 & P_{11} & \dots & P_{1n} & Q_{11} & \dots & Q_{1n} & 0 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot & & \cdot \\ M_m & P_{m1} & \dots & P_{mn} & Q_{m1} & \dots & Q_{mn} & 0 & \dots & 0 \\ N_1 & 0 & \dots & 0 & P_{11} & \dots & P_{1n} & Q_{11} & \dots & Q_{1n} \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot & & \cdot \\ N_m & 0 & \dots & 0 & P_{m1} & \dots & P_{mn} & Q_{m1} & \dots & Q_{mn} \end{array} \right\|$$

vermöge der Relationen J gleich $2m - \sigma$ sein, d. h. es müssen in B alle $2m - \sigma + 1$ -reihigen, nicht aber alle $2m - \sigma$ -reihigen Determinanten vermöge J verschwinden. Offenbar muss jetzt auch die im vorigen § definirte Matrix B_2 , die aus

B durch Streichung der ersten Spalte entsteht, vermöge J den Rang $2m - \sigma$ besitzen. Denn wäre dieser Rang kleiner, so ergäbe sich aus den Gleichungen (18) eine von den r_i, s_i, t_i freie Relation, die keine Consequenz von J wäre.

Genau ebenso erkennt man allgemein: Betrachtet man die hm Gleichungen h^{ter} Ordnung, die sich durch $h - 1$ -malige Derivation nach x und y aus dem System K ergeben, als ein System linearer Gleichungen mit den $(h + 1)n$ Unbekannten:

$$z_{h-a, \alpha}^i \quad (i = 1, \dots, n; \alpha = 0, 1 \dots h), ^1)$$

so müssen sie sich, falls K passiv sein soll, vermöge K und der derivirten Gleichungen bis zur $h - 1^{\text{ten}}$ Ordnung einschliesslich, auf genau

$$hm - (h - 1)\sigma$$

linear unabhängige Gleichungen reduciren. Letzteres gilt dann offenbar auch von den hm Derivirten h^{ter} Ordnung des Systems J :

$$(19) \quad M_{ia}^h + \sum_1^n P_{ik} z_{h-a, \alpha}^k + \sum_1^n Q_{ik} z_{h-a-1, \alpha+1}^k = 0$$

$$(i = 1, 2, \dots, m; \alpha = 0, 1 \dots h - 1),$$

worin die M_{ia}^h gewisse Funktionen von $x, y, z_1 \dots z_n$ und von den Ableitungen der z_i bis zur $h - 1^{\text{ten}}$ Ordnung bedeuten. Die Matrix dieses Gleichungssystems muss also vermöge J und der Derivirten bis zur $h - 1^{\text{ten}}$ Ordnung einschliesslich den Rang $hm - (h - 1)\sigma$ besitzen. Diese Matrix besteht aus hm Zeilen und $(h + 1)n + 1$ Spalten, und wird aus der im vorigen § definirten Matrix B_h erhalten, wenn man die hm Elemente

$$M_{10}^h \dots M_{m0}^h, M_{11}^h \dots M_{m1}^h \dots M_{1, h-1}^h \dots M_{m, h-1}^h$$

als neue Columnne hinzufügt. Der Rang, den die Matrix vermöge der Gleichungen J besitzt, kann nicht kleiner als $hm - (h - 1)\sigma$ sein, da andernfalls aus den Relationen (19) eine Gleichung folgen würde, die die Ableitungen der z_i nur

¹⁾ $z_{h-a, \alpha}^i \equiv \frac{\partial^h z_i}{\partial x^{h-a} \partial y^a}$

bis zur $h - 1^{\text{ten}}$ Ordnung enthielte, und doch keine Folge des Systems J und seiner Derivirten bis zur $h - 1^{\text{ten}}$ Ordnung wäre, was mit der Passivität von K in Widerspruch stünde. Die im vorigen § definirten Zahlen $\varrho_1, \varrho_2, \varrho_3, \dots$ haben daher bezw. die Werte:

$$m, 2m - \sigma, 3m - 2\sigma, 4m - 3\sigma \dots$$

und aus dem Formelsystem (16) der Nr. 13 schliessen wir jetzt:

$$\mu_0 = 0; \mu_1 = \sigma; \mu_2 = 0, \mu_3 = 0, \dots \mu_r = 0.$$

Da aber nach Art. 12 andererseits:

$$\mu_0 + \mu_1 + \dots + \mu_r = m - \tau,$$

so folgt:

$$\sigma = m - \tau.$$

Als eine notwendige Bedingung für die Passivität der canonischen Auflösung von J haben wir demnach die erhalten, dass die Matrix B vermöge J den Rang

$$2m - \sigma = m + \tau$$

besitze, wenn unter τ der Rang der charakteristischen Matrix verstanden wird.

16. Ein Differentialsystem J , das die eben genannte Bedingung erfüllt, soll fortan ein **Involutionssystem** erster Ordnung heissen. Durch eine Transformation der unabhängigen Variablen gelingt es nun in allen Fällen, das gegebene Involutionssystem J auf eine besonders einfache Normalform zu reduciren.

Es seien wieder τ und $m + \tau$ die Rangzahlen, die den beiden Matrices A und B vermöge der gegebenen Gleichungen J zukommen. Wir können dann die Gleichungen J und die Unbekannten z_i von vorneherein so numeriren, dass insbesondere die Determinante:

$$(20) \quad \begin{vmatrix} u P_{11} + v Q_{11} & \dots & u P_{1\tau} + v Q_{1\tau} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u P_{r1} + v Q_{r1} & \dots & u P_{r\tau} + v Q_{r\tau} \end{vmatrix}$$

vermöge J nicht für jedes beliebige Wertsystem u, v Null ist. Es seien α, β und γ, δ zwei Constantensysteme, die dieser Bedingung genügen und deren Determinante $\alpha \delta - \beta \gamma$ nicht Null ist. Führen wir dann mittels der Formeln:

$$(21) \quad x' = \alpha x + \beta y; \quad y' = \gamma x + \delta y$$

die neuen Independenten x', y' ein, und schreiben wir:

$$p'_i = \frac{\partial z_i}{\partial x'}; \quad q'_i = \frac{\partial z_i}{\partial y'}; \quad r'_i = \frac{\partial^2 z_i}{\partial x'^2} \text{ etc.}$$

so hat man:

$$(22) \quad p_i = \alpha p'_i + \gamma q'_i; \quad q_i = \beta p'_i + \delta q'_i, \\ r_i = \alpha^2 r'_i + 2\alpha\gamma s'_i + \gamma^2 t'_i \text{ etc.}$$

Verwandelt sich vermöge der Transformation (21) (22) die Funktion f_i in:

$$f'_i(x' y' z_1 \dots z_n p'_1 \dots q'_n)$$

so hat man:

$$(23) \quad P'_{ik} = \frac{\partial f'_i}{\partial p'_k} = \alpha P_{ik} + \beta Q_{ik}; \quad Q'_{ik} = \gamma P_{ik} + \delta Q_{ik}.$$

$$M_i = \alpha M'_i + \gamma N'_i; \quad N_i = \beta M'_i + \delta N'_i.^1)$$

Bezeichnet man ferner mit A_i, B_i die linken Seiten der beiden ersten Derivirten der Gleichung $f_i = 0$, mit A'_i, B'_i die linken Seiten der ersten Derivirten von

$$(J') \quad f'_i = 0 \quad (i = 1, 2 \dots m),$$

so folgt leicht:

$$A_i \equiv \alpha A'_i + \gamma B'_i; \quad B_i = \beta A'_i + \delta B'_i.$$

Da sich nun unter den $2m$ Gleichungen $A_i = 0, B_i = 0$ genau $m + r$ linear unabhängige befinden, so gilt dasselbe von den Gleichungen $A'_i = 0, B'_i = 0$, d. h. die Matrix B' , die der Matrix B analog aus den Elementen $M'_i, N'_i, P'_{ik}, Q'_{ik}$ gebildet wird, besitzt vermöge der Gleichungen J' wieder den Rang $m + r$.

¹⁾ $M'_i \equiv \frac{\partial f'_i}{\partial x'} + \sum \frac{\partial f'_i}{\partial z_k} p'_k \text{ etc.}$

Ebenso erkennt man ohne weiteres, dass der Rang der zu J gehörigen charakteristischen Matrix ebenfalls τ ist.

Das transformirte System J ist also ein Involutions-system und hat überdies die Eigenschaft, dass die beiden Determinanten

$$|P'_{ik}| \quad |Q'_{ik}| \quad (i, k = 1, 2, \dots \tau)$$

vermöge J nicht verschwinden. Wir dürfen daher, indem wir die Accente jetzt wieder weglassen, ohne Beschränkung der Allgemeinheit von vorneherein annehmen, dass die beiden Determinanten

$$(24) \quad |P_{ik}| \quad |Q_{ik}| \quad (i, k = 1, 2, \dots \tau)$$

vermöge des gegebenen Differentialsystems J nicht Null sind. Dann verschwinden in der Matrix:

$$(D) \quad \left\| \begin{array}{cccccc} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1\tau} & Q_{11} & Q_{12} & \dots & Q_{1\tau} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{m\tau} & Q_{m1} & Q_{m2} & \dots & Q_{m\tau} \end{array} \right\|$$

vermöge J nicht alle m -reihigen Determinanten. Um dies zu zeigen, bemerken wir vorab, dass:

$$2\tau \geq m; \quad 1) \quad \tau \leq m.$$

Ist $\tau = m$, so ist unsere Behauptung evident. Ist aber $\tau < m$, und nehmen wir an, dass in dem Schema D alle m -reihigen Determinanten vermöge J Null sind, so verschwinden in der Matrix D' , die aus D durch Hinzufügung der Colonne

$$P_{1, \tau+1}, P_{2, \tau+1} \dots P_{m, \tau+1}$$

entsteht, alle diejenigen m -reihigen Determinanten, welche die erste der Determinanten (24) als Unterdeterminante enthalten. In der That ist ja jede Determinante, die mehr als τ Colonnen der Form $P_{1, \dots} P_{m, \dots}$ enthält, vermöge J Null; der Rang von D' ist also vermöge J nach einem bekannten Determinantensatz

1) Denn unter der Annahme $\tau < \frac{m}{2}$ verschwinden in der Matrix B_1

des vorigen § alle m -reihigen Determinanten.

< m . Aus analogen Gründen gilt nunmehr dasselbe von der Matrix D'' , die aus D' durch Hinzufügung einer Colonne

$$Q_{1, \tau+1}, Q_{2, \tau+1}, \dots, Q_{m, \tau+1}$$

hervorgeht etc. Durch Wiederholung dieser Schlussweise gelangt man zu dem Resultat, dass in der Matrix B_1 des vorigen § alle m -reihigen Determinanten vermöge J Null sind, was unsern Annahmen widerspricht.

17. Unter den nichtverschwindenden Determinanten von D befindet sich mindestens eine, welche die τ ersten Colonnen enthält; darnach kann das System J nach $p_1 \dots p_\tau$ und nach σ von den Variablen $q_1 \dots q_r$ ¹⁾ aufgelöst werden, und wir dürfen daher ohne Beschränkung der Allgemeinheit annehmen, dass das System J auf die Normalform:

$$(N) \quad \begin{cases} p_1 = \varphi_1(x, y, z_1 \dots z_n, p_{\tau+1} \dots p_n, q_{\sigma+1} \dots q_n) \\ \vdots \\ p_\tau = \varphi_\tau(x, y, z_1 \dots z_n, p_{\tau+1} \dots p_n, q_{\sigma+1} \dots q_n) \\ q_1 = \psi_1(x, y, z_1 \dots z_n, q_{\sigma+1} \dots q_n) \\ \vdots \\ q_\sigma = \psi_\sigma(x, y, z_1 \dots z_n, q_{\sigma+1} \dots q_n) \end{cases}$$

gebracht werden kann. Wir bemerken ausdrücklich, dass die ψ_i keine der Grössen $p_{\tau+1} \dots p_n$ enthalten können, da andernfalls die Gleichungen J nach $\tau + 1$ von den Variablen $p_1 \dots p_n$ auflösbar wären, was wegen des Verschwindens aller $\tau + 1$ -reihigen Determinanten der Matrix P_{ik} nicht der Fall ist.

18. Zwischen den $2m$ Derivirten zweiter Ordnung der Gleichungen N bestehen nun, wenn sie als lineare Gleichungen in den Variablen r_i, s_i, t_i betrachtet werden, genau σ verschiedene lineare Identitäten. Derivirt man nun die ersten τ Gleichungen N nach y und die letzten σ Gleichungen nach x , so erhält man:

$$(25) \quad s_i = \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} + \sum_1^n \frac{\partial \varphi_i}{\partial z_\alpha} q_\alpha + \sum_{\tau+1}^n \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial p_\beta} s_\beta + \frac{\partial \varphi_i}{\partial q_\beta} t_\beta \right) + \sum_{\sigma+1}^r \frac{\partial \varphi_i}{\partial q_r} t_r;$$

¹⁾ Wegen $2\tau \geq m$; $\sigma = m - \tau$ ist $\sigma < r$.

$$(26) \quad s_k = \frac{\partial \psi_k}{\partial x} + \sum_1^n \frac{\partial \psi_k}{\partial z_\alpha} p_\alpha + \sum_{\tau+1}^n \frac{\partial \psi_k}{\partial q_\beta} s_\beta + \sum_{\sigma+1}^\tau \frac{\partial \psi_k}{\partial q_\gamma} s_\gamma,$$

$$(i = 1 \dots \tau; k = 1 \dots \sigma)$$

und die vorhin genannten σ linearen Identitäten bestehen offenbar darin, dass die Gleichungen (26) bzw. mit den σ ersten Gleichungen (25) identisch werden, wenn man vorher auf den rechten Seiten von (26) die Grössen $s_{\sigma+1} \dots s_\tau$ durch ihre Werte aus den letzten $\tau - \sigma$ Gleichungen (25) ersetzt hat. Man erhält so die nachstehenden Beziehungen:

$$(27) \quad \left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \psi_i}{\partial x} + \sum_1^n \frac{\partial \psi_i}{\partial z_\alpha} p_\alpha + \sum_{\sigma+1}^\tau \frac{\partial \psi_i}{\partial q_\gamma} \left(\frac{\partial \varphi_\gamma}{\partial y} + \sum_1^n \frac{\partial \varphi_\gamma}{\partial z_\alpha} q_\alpha \right) &= \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} + \sum_1^n \frac{\partial \varphi_i}{\partial z_\alpha} q_\alpha \\ \frac{\partial \psi_i}{\partial q_k} + \sum_{\sigma+1}^\tau \frac{\partial \psi_i}{\partial q_\gamma} \frac{\partial \varphi_\gamma}{\partial p_k} &= \frac{\partial \varphi_i}{\partial p_k}; \\ \sum_{\sigma+1}^\tau \frac{\partial \psi_i}{\partial q_\gamma} \frac{\partial \varphi_\gamma}{\partial q_l} &= \frac{\partial \varphi_i}{\partial q_l}; \end{aligned} \right.$$

$$(i = 1, 2, \dots \sigma; k = \tau + 1 \dots n; l = \sigma + 1 \dots n).$$

Diese Beziehungen werden von den Funktionen φ, ψ identisch erfüllt; in den Relationen der ersten Zeile sind die Grössen $p_1 \dots p_\tau, q_1 \dots q_\sigma$ durch ihre Werte φ, ψ zu ersetzen.

Umgekehrt, sind diese Bedingungen erfüllt, so ist das Differentialsystem J offenbar ein Involutionssystem, d. h. der Rang der charakteristischen Matrix ist τ , und derjenige der Matrix B ist gleich $m + \tau$.

19. Das Differentialsystem N ist nicht canonisch; es besitzt aber vermöge der Bedingungen (27) die charakteristische Eigenschaft der passiven Systeme. Vermöge des Systems N und seiner Derivierten kann man nämlich alle (principalen) Ableitungen

$$\frac{\partial^{a+\beta} z_i}{\partial x^a \partial y^\beta}, \quad \frac{\partial^{a+\beta+1} z_k}{\partial x^{a+1} \partial y^\beta} \quad (i = 1, \dots \sigma; k = \sigma + 1 \dots \tau; a, \beta = 0, 1, 2, \dots)$$

durch $x, y, z_1 \dots z_n$ und die parametrischen Ableitungen:

$$\frac{\partial^{\gamma} z_k}{\partial y^{\gamma}}, \frac{\partial^{\gamma+\delta} z_l}{\partial x^{\gamma} \partial y^{\delta}} \quad (\gamma, \delta = 0, 1 \dots; k = \sigma + 1 \dots \tau; l = \tau + 1 \dots n)$$

ausdrücken, und es ergeben sich aus den Derivirten des Systems N keine Relationen zwischen den parametrischen Grössen allein.

Das System N gehört sonach dem von C. Bourlet (a. a. O.) studirten Typus „unbeschränkt integrierbarer“ Differentialsysteme an, und es gilt daher hinsichtlich der Existenz der Integrale von N folgender Satz:

Es seien

$$\omega_{\tau+1}(x, y), \omega_{\tau+2}(x, y) \dots \omega_n(x, y)$$

beliebige, an der Stelle x^0, y^0 reguläre Funktionen der Variablen x, y , ferner:

$$\chi_{\sigma+1}(y), \chi_{\sigma+2}(y) \dots \chi_{\tau}(y)$$

beliebige, an der Stelle y^0 reguläre Funktionen von y , und $z_1^0 \dots z_{\sigma}^0$ beliebige Constante. Setzt man dann

$$z_{\gamma}^0 = \omega_{\gamma}^0; p_{\gamma}^0 = \frac{\partial \omega_{\gamma}^0}{\partial x^0}; q_{\gamma}^0 = \frac{\partial \omega_{\gamma}^0}{\partial y^0} \quad (\gamma = \tau + 1 \dots n);$$

$$z_{\beta}^0 = \chi_{\beta}^0; q_{\beta}^0 = \frac{\partial \chi_{\beta}^0}{\partial y^0} \quad (\beta = \sigma + 1 \dots \tau),$$

und sind sämtliche Funktionen φ, ψ an der Stelle

$$x^0 y^0 z_1^0 \dots z_n^0, p_{\tau+1}^0 \dots p_n^0, q_{\sigma+1}^0 \dots q_n^0$$

regulär, so besitzt das Differentialsystem N ein und nur ein System von Integralfunktionen $z_1 \dots z_n$ mit folgenden Eigenschaften:

- 1) alle z_i sind an der Stelle $x^0 y^0$ regulär;
- 2) die $z_{\tau+1} \dots z_n$ sind mit den willkürlichen Funktionen $\omega_{\tau+1} \dots \omega_n$ identisch.
- 3) die Funktionen $z_{\sigma+1} \dots z_{\tau}$ reduciren sich vermöge $x = x^0$ auf die Funktionen $\chi_{\sigma+1} \dots \chi_{\tau}$ resp.
- 4) die Funktionen $z_1 \dots z_{\sigma}$ nehmen an der Stelle $x^0 y^0$ bez. die Werte $z_1^0 \dots z_{\sigma}^0$ an.

20. Besonders einfach ist der Fall $\sigma = \tau$. Die Gleichungen (27) lehren dann, dass die Funktionen φ_i die Variablen q nicht enthalten. Ferner hat man vermöge (27):

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial q_k} \equiv \frac{\partial \varphi_i}{\partial p_k} \quad (k = \tau + 1, \dots n).$$

Darnach sind die φ_i lineare Funktionen von $p_{\tau+1} \dots p_n$, und die ψ_i lineare Funktionen von $q_{\tau+1} \dots q_n$, d. h. das System N hat die Gestalt:

$$(28) \quad \begin{cases} p_i = \pi_i(x, y, z_1, \dots, z_n) + \sum_{\tau+1}^n a_{ih} p_h \\ q_i = \kappa_i(x, y, z_1, \dots, z_n) + \sum_{\tau+1}^n a_{ih} q_h \end{cases} \quad \begin{matrix} (a_{ih} \text{ Funktionen von} \\ x, y, z_1, \dots, z_n; i = 1, \dots, \tau) \end{matrix}$$

und die Relationen (27) lehren, dass die totalen Differentialgleichungen

$$(29) \quad dz_i = \pi_i dx + \kappa_i dy + \sum_{\tau+1}^n a_{ih} dz_h \quad (i = 1, 2, \dots, \tau)$$

unbeschränkt integrabel sind. Man erhält also das allgemeinste System von Integralfunktionen $z_1 \dots z_n$ des Differentialsystems (28), indem man $z_{\tau+1} \dots z_n$ beliebig wählt, und sodann die $z_1 \dots z_\tau$ aus den allgemeinen Integralgleichungen

$$\Omega_i(x, y, z_1, \dots, z_n) = \Omega_i(x^0, y^0, z_1^0, \dots, z_n^0) \quad (i = 1, 2, \dots, \tau)$$

des unbeschränkt integrablen Systems (29) berechnet.

21. Ersetzt man in den Gleichungen N die Grössen $z_{\tau+1} \dots z_n$ durch irgend welche Funktionen der Variablen x, y , so bildet das so entstehende Differentialsystem N' mit den τ Unbekannten $z_1 \dots z_\tau$ wieder ein Involutionssystem.

In der That, die zu N' gehörige charakteristische Matrix entsteht aus A durch Weglassung der letzten τ Columnen. Ferner erhält man die Matrix B' , die zu N' in derselben Beziehung steht wie B zu N , indem man in B die $\tau + 2^{\text{te}}$, $\tau + 3^{\text{te}}$, ..., $n + 1^{\text{te}}$ Colonne bez. mit $\frac{\partial z_{\tau+1}}{\partial x}, \dots, \frac{\partial z_n}{\partial x}$, ferner die

letzten $n - \tau$ Columnen von B bzw. mit $\frac{\partial z_{\tau+1}}{\partial y} \dots \frac{\partial z_n}{\partial y}$ multiplicirt und zu der ersten addirt, schliesslich die soeben erwähnten $2n - 2\tau$ Columnen fortlässt. Also ist der Rang von B' höchstens gleich $m + \tau$. Er kann aber auch nicht kleiner sein, denn unter den $m + \tau$ -reihigen Determinanten von B' befinden sich alle Produkte aus je einer m -reihigen Determinante von D (s. Nr. 16) in eine der beiden Determinanten (24).

§ IV. Die Elementarteiler der charakteristischen Matrix.

22. Nach der Schlussbemerkung des vorigen § können wir uns in der Theorie der Involutionssysteme erster Ordnung auf die Annahme beschränken, dass der Rang der charakteristischen Matrix der Anzahl n der unbekannten Funktionen gleich ist. In einer früheren Abhandlung¹⁾ habe ich, allerdings unter specieller Annahme über die Beschaffenheit der Elementarteiler der charakteristischen Matrix, die Theorie dieser Art von Involutionssystemen ausführlich entwickelt. In diesem § soll nun dargelegt werden, welcher Zusammenhang zwischen den sogenannten Charakteristiken des betrachteten Involutionssystems und den Elementarteilern jener Matrix stattfindet, wenn die letzteren keinen beschränkenden Bedingungen unterliegen.

23. Unter der Voraussetzung $\tau = n$ hat man $m \geq n$; wir können daher setzen

$$m = n + p \quad (p \geq 0).$$

Die Gleichung (18) des § II wird hier:

$$n - p = \sum \sum e_{\alpha\beta}$$

m. a. W. die n -reihigen Determinanten der charakteristischen Matrix:

$$(A') \quad \| Q_{ik} - w P_{ik} \| \quad (i = 1, \dots, n + p; k = 1 \dots n)$$

besitzen vermöge des gegebenen Involutionssystems

¹⁾ Grundzüge einer Integrationstheorie etc., Journal f. Mathem. Bd. 118, p. 123–157.

$$(J) \quad f_i(x, y, z_1 \dots z_n, p_1 \dots p_n) = 0 \quad (i = 1, \dots, n + p)$$

ein ganzrationales Polynom $n - p^{\text{ten}}$ Grads in w als grössten gemeinschaftlichen Divisor. Dieser Satz, den ich in der citirten Arbeit durch ziemlich weitläufige Determinantenrechnungen bewiesen habe, erweist sich sonach als eine einfache Consequenz der Theorie der Bilinearformen.

Es sei w_v einer der κ verschiedenen Werte von w , für die alle n -reihigen Determinanten der Matrix A' verschwinden, ferner $e_{1v}, e_{2v}, \dots$ die Exponenten der zugehörigen Elementarteiler; q_v derselben (und zwar natürlich die q_v ersten) seien von Null verschieden. Die Zahl

$$e_{1v} + e_{2v} + \dots + e_{q_v, v}$$

bezeichnet dann die Vielfachheit, mit der der Faktor $w - w_v$ in allen n -reihigen Determinanten von A' auftritt, und es verschwinden in A' vermöge des gegebenen Gleichungssystems J alle $n - q_v + 1$ -reihigen, nicht aber alle $n - q_v$ -reihigen Determinanten für $w = w_v$ identisch. Die w_v sind Funktionen der Variabeln $x, y, z_1 \dots z_n$ und von $n - p$ unter den Variabeln p_i, q_i , die vermöge J willkürlich bleiben.

24. Dies vorausgeschickt, fragen wir nun nach den Bedingungen dafür, dass die Relationen:

$$(30) \quad dp_i = r_i dx + s_i dy; \quad dq_i = s_i dx + t_i dy$$

zusammen mit den ersten Derivirten des Systems J :

$$(31) \quad \begin{cases} A_i \equiv M_i + \sum_1^n (P_{ik} r_k + Q_{ik} s_k) = 0 \\ B_i \equiv N_i + \sum_1^n (P_{ik} s_k + Q_{ik} t_k) = 0 \end{cases} \quad (i = 1 \dots n + p)$$

die Grössen r_i, s_i, t_i nicht bestimmen.

Indem wir die r_i, s_i mittels (30) berechnen und in (31) einsetzen, erhalten wir die Relationen:

$$(32) \quad M_i + \sum_1^n P_{ik} \left(\frac{dp_k}{dx} - \frac{dq_k}{dx} \frac{dy}{dx} \right) + \sum_1^n Q_{ik} \frac{dq_k}{dx} - \\ - \frac{dy}{dx} \sum_1^n t_k \left(Q_{ik} - P_{ik} \frac{dy}{dx} \right) = 0$$

$$(33) \quad N_i + \sum_1^n P_{ik} \frac{dq_k}{dx} + \sum_1^n t_k \left(Q_{ik} - P_{ik} \frac{dy}{dx} \right) = 0 (i = 1, \dots, n+p)$$

Damit diese Gleichungen die Grössen $t_1 \dots t_n$ unbestimmt lassen, ist zunächst notwendig, dass

$$(34) \quad dy = w_r dx,$$

wo w_r eine der oben definirten κ Funktionen bedeutet.

Substituiert man diesen Wert von dy in (32) (33), multiplicirt man ferner die Gleichung (33) mit w_r und addirt sie zu (32), so entstehen Relationen, die unter Hinzunahme der Gleichungen

$$(35) \quad dz_i = (p_i + w_r q_i) dx \quad (i = 1 \dots n)$$

folgende Form annehmen;

$$(36) \quad df_1 = 0, df_2 = 0, \dots, df_{n+p} = 0;$$

das Differentiationssymbol df_i bezieht sich dabei auf alle $3n + 2$ Variablen $x, y, \dots, q_n$.

Die n linearen Gleichungen mit den Unbekannten $\mu_1 \dots \mu_{n+p}$:

$$(37) \quad \mu_1(Q_{ik} - w_r P_{ik}) + \dots + \mu_{n+p}(Q_{n+p,k} - w_r P_{n+p,k}) = 0 (k = 1 \dots n)$$

besitzen nach dem Obigen $q_r + p$ linear unabhängige Lösungssysteme

$$(38) \quad \mu_1^{(s)} \dots \mu_{n+p}^{(s)} \quad (s = 1, 2, \dots, q_r + p).$$

Indem man die Gleichungen (33) bezw. mit $\mu_i^{(s)}$ multiplicirt und nach i summirt, erhält man die noch übrigen der Bedingungen, die ausdrücken, dass die Relationen (32) (33) die t_k unbestimmt lassen. Nun gibt es aber, da der Annahme nach $2n + p$ der Rang der Matrix B_s (§ II) ist, genau p linear unabhängige Funktionensysteme

$$\alpha_1^{(s)} \dots \alpha_{n+p}^{(s)}, \beta_1^{(s)} \dots \beta_{n+p}^{(s)} \quad (s = 1, 2 \dots p)$$

die vermöge J den Gleichungen

$$(39) \quad \left. \begin{aligned} \sum_1^{n+p} \alpha_i^{(s)} P_{ik} &= 0 \\ \sum_1^{n+p} (\alpha_i^{(s)} Q_{ik} + \beta_i^{(s)} P_{ik}) &= 0 \\ \sum_1^{n+p} \beta_i^{(s)} Q_{ik} &= 0 \end{aligned} \right\} (k=1, \dots, n)$$

genügen. Daraus folgt, dass die Funktionensysteme

$$(40) \quad \beta_1^{(s)} - w_s \alpha_1^{(s)} \dots \beta_{n+p}^{(s)} - w_s \alpha_{n+p}^{(s)} (s=1, 2, \dots, p)$$

Lösungensysteme der linearen Gleichungen (37) darstellen. Diese p Lösungensysteme sind linear unabhängig; denn andernfalls beständen Beziehungen der Form

$$\sum_1^p \lambda_s \beta_i^{(s)} \equiv w_s \sum_1^p \lambda_s \alpha_i^{(s)};$$

setzt man also

$$\sigma_i \equiv \sum \lambda_s \alpha_i^{(s)}$$

so erhalte man mit Rücksicht auf (39):

$$\sum_1^{n+p} \sigma_i P_{ik} \equiv 0, \quad \sum_1^{n+p} \sigma_i Q_{ik} = 0 \quad (k=1 \dots n)$$

was nicht möglich ist, da der Annahme nach $n+p$ der Rang der Matrix B_1 (§ II) ist, und die σ_i nicht alle identisch verschwinden können. Ausser den Systemen (40) besitzen also die linearen Gleichungen (37) noch q_r weitere Lösungensysteme, die wir mit den q_r ersten Funktionensystemen (38) identifizieren. Die notwendigen und hinreichenden Bedingungen dafür, dass die Gleichungen (30) (31) die r_i, s_i, t_i nicht bestimmen, schreiben sich daher schliesslich, unter Hinzunahme der Gleichungen (35), folgendermassen;

$$(41) \quad \left\{ \begin{aligned} dy &= w_r dx; \quad dz_i = p_i dx + q_i dy \quad (i=1 \dots n), \\ df_1 &= 0, \quad df_2 = 0, \dots \quad df_{n+p} = 0; \\ \sum_1^n \left(\sum_1^{n+p} \mu_i^{(s)} P_{ik} \right) dq_k &+ \sum_1^{n+p} \mu_i^{(s)} N_i dx = 0 \quad (s=1, 2, \dots, q_r), \end{aligned} \right.$$

und man erkennt leicht, dass diese Pfaff'schen Gleichungen hinsichtlich der Differentiale dx , dy , dz_i , dp_i , dq_i linear unabhängig sind. Die Funktionen $\mu_i^{(s)}$ sind natürlich von der Wahl der Wurzel w , abhängig.

Den Wurzeln $w_1 \dots w_n$ entsprechend erhält man sonach κ verschiedene Systeme Pfaff'scher Gleichungen, die ich im Anschluss an meine oben citirte Abhandlung die dem gegebenen Involutionssystem J beigeordneten Pfaff'schen Systeme erster Stufe nennen will.

Bezeichnet man, in Verallgemeinerung einer bekannten von Lie herrührenden Ausdrucksweise, ein Wertsystem

$$x y z_1 \dots z_n p_1 q_1 \dots p_n q_n$$

als ein Flächenelement erster Ordnung, ferner jede Schaar von ∞^1 Flächenelemente 1. O., die den totalen Differentialgleichungen

$$(42) \quad dz_i = p_i dx + q_i dy \quad (i = 1 \dots n)$$

genügt, als einen Streifen erster Ordnung, so kann man einen Streifen 1. O., der einem der Pfaff'schen Systeme (56) genügt, als einen charakteristischen Streifen oder eine Charakteristik 1. O. des gegebenen Involutionssystems bezeichnen. Es gibt also κ verschiedene Systeme charakteristischer Streifen, und man erkennt leicht, dass jedes Integral von J , d. h. jedes System von ∞^2 Flächenelementen 1. O., das dem System J und den totalen Differentialgleichungen (42) genügt, von je ∞^1 charakteristischen Streifen eines jeden der κ verschiedenen Systeme erzeugt wird.

25. In ganz analoger Weise lassen sich κ Charakteristikensysteme jeder beliebigen Ordnung h (> 1) definiren. Man hat zu diesem Zwecke auszudrücken, dass die Relationen:

$$dz_{\alpha\beta}^{(i)} = z_{\alpha+1,\beta}^{(i)} dx + z_{\alpha,\beta+1}^{(i)} dy \quad (\alpha + \beta = h, \alpha = 0, 1, \dots, h)$$

zusammen mit den Derivirten $h + 1^{\text{ter}}$ Ordnung des gegebenen Involutionssystems die Ableitungen $h + 1^{\text{ter}}$ Ordnung nicht bestimmen. Man erhält solcher Weise κ verschiedene ,bei-

geordnete Pfaff'sche Systeme h^{ter} Stufe“; das einzelne dieser Systeme besteht aus den Relationen

$$dy = w_r dx; dz_{a\beta}^i = z_{a+1,\beta}^i dx + z_{a,\beta+1}^i dy \\ (i = 1 \dots n; a + \beta \leq h - 1)$$

ferner aus den Gleichungen, die durch totale Differentiation der Gleichungen J und ihrer Derivirten bis zur h^{ten} Ordnung einschliesslich entstehen, und aus ϱ_r weiteren Pfaff'schen Gleichungen in den Variablen

$$(43) \quad x, y, z_1 \dots z_n, \dots z_{a,\beta}^i \quad (a + \beta \leq h).$$

Als „charakteristischen Streifen h^{ter} Ordnung“ bezeichnet man dann jede Schar von ∞^1 Wertsysteme (43), die eines der beigeordneten Pfaff'schen Systeme h^{ter} Stufe, und alle Derivirten von J bis zur h^{ten} Ordnung befriedigt.

26. Wenn das vorgelegte Involutionssystem J hinsichtlich der $2n$ Variablen p_i, q_i linear ist, lassen sich auch κ verschiedene beigeordnete Pfaff'sche Systeme „nullter Stufe“ definiren, indem man ausdrückt, dass die Gleichungen (42) zusammen mit den Relationen J die $2n$ Variablen p_i, q_i nicht bestimmen.¹⁾

27. Auf die Integrationstheorien, die mit dem Begriff der beigeordneten Pfaff'schen Systeme in Zusammenhang stehen und die ich a. a. O. unter der speciellen Voraussetzung $\kappa = n - p$ ausführlich entwickelt habe, soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Wir wollen hier nur noch den Fall hervorheben, dass nur eine einzige Funktion w_1 vorhanden ist, und die Exponenten der zugehörigen Elementarteiler alle gleich 1 sind.²⁾ Dann hat man $\varrho_1 = n - p$, und es gibt nur ein einziges beigeordnetes System erster Stufe, bestehend aus $3n + 1$ gewöhnlichen Differentialgleichungen in den $3n + 2$ Variablen

$$(44) \quad x, y, z_1 \dots z_n, p_1, p_2 \dots p_n, q_1 \dots q_n.$$

¹⁾ Vgl. den § 5 meiner oben citirten Arbeit.

²⁾ Dieser Fall wird unter der speciellen Annahme $p = 0$ von M. Hamburger (Journ. f. Math. 93) gelegentlich betrachtet.

Die Schar der charakteristischen Streifen 1. O. hängt also jetzt nur von einer endlichen Parameterzahl ab, derart, dass jedes Flächenelement 1. Ord., dessen Coordinaten (44) den gegebenen Gleichungen J genügen, auf einer und nur einer Charakteristik 1. Ordn. enthalten ist.

Bestimmt man einen beliebigen Streifen 1. Ordnung, dessen Flächenelemente das System J befriedigen,¹⁾ so erzeugen die bzw. von diesen Flächenelementen ausgehenden ∞^1 Charakteristiken die allgemeinste Integralmannigfaltigkeit des gegebenen Involutionssystems.²⁾

¹⁾ Diese Bestimmung erfordert im Allg. noch die Integration eines Systems gewöhnlicher Differentialgleichungen, vgl. den Schluss des § 1 meiner oben citirten Arbeit.

²⁾ Es sei zum Schluss hervorgehoben, dass nach Riquier (Éc. Norm. 1893), wenn man den Begriff des „canonischen Systems“ etwas erweitert, jedes beliebige Differentialsystem auf ein canonisches passives System erster Ordnung reducirt werden kann, dass also die Entwicklungen dieser Note auf beliebige Differentialsysteme mit 2 Independenten anwendbar sind. Insbesondere kann also jedes Differentialproblem in zwei Independenten auf die passive Normalform (N) des § III zurückgeführt werden.