

## Was ist Materie?

Von H. WEYL, Zürich.

(Fortsetzung.)

### II. Masse, Energie und Impuls.

Die Begriffe Masse, Energie und Impuls sind für das Verständnis der Physik, insbesondere des Problems der Materie so wichtig, daß darüber ein Abschnitt eingeschaltet werden muß, ehe wir der Substanz- die Feldtheorie und die dynamische Auffassung der Materie gegenüberstellen können.

Das Wesentliche für die Definition der *Masse* ist die Angabe eines physikalischen Kriteriums dafür, wann zwei Körper die gleiche Masse besitzen. Dasselbe lautet nach GALILEI: Zwei Körper haben gleiche Masse, falls keiner den anderen überrennt, wenn man sie mit entgegengesetzt gleichen Geschwindigkeiten gegeneinander jagt. (Wir stellen uns etwa vor, daß beim Zusammenstoß die beiden Körper aneinander haften bleiben.) Aus Gründen der Raumsymmetrie ist klar, daß dieses Kriterium für zwei völlig gleich beschaffene Körper zutrifft, daß also insbesondere zwei solche Körper gleiche Masse besitzen. Wir wählen einen willkürlichen Körper als Masseneinheit. Aus einem Satz von Einheiten, d. h. lauter Körpern von der gleichen Masse 1 kann man Blöcke von 1, 2, 3, ... Einheiten zusammenfügen. Um die Masse eines Körpers  $K$  zu bestimmen, der sich mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegt, hat man die Blöcke mit gleich großer, aber entgegengesetzter Geschwindigkeit gegen  $K$  zu jagen. Wird etwa der Block aus 4 Einheiten von  $K$  überrennt, überrennt aber andererseits der Block aus 5 Einheiten den Körper  $K$ , so liegt die Masse von  $K$  zwischen 4 und 5. Es ist klar, wie man unter Verwendung dezimaler Teilungen auf diese Weise die Masse beliebig genau bestimmen kann.

Der Begriff des *Impulses* erscheint hier als primär gegenüber dem der Masse. Zwei sich gegeneinander bewegende Körper (die beide nach dem Galileischen Trägheitsgesetz eine gleichförmige Translation ausführen) haben entgegengesetzt gleichen Impuls, wenn beim Zusammenstoß keiner den anderen überrennt; zwei Körper haben gleiche Masse, so wiederholen wir unsere obige Erklärung, wenn sie bei entgegengesetzt gleichen Geschwindigkeiten entgegengesetzt gleiche Impulse besitzen. Diese Betrachtungen führen ohne weiteres auf das allgemeine *Impulsgesetz*. Wir fassen ein isoliertes, keinen Einwirkungen von außen unterliegendes Körpersystem *vor* und *nach* einer Reaktion der Teile des Systems aufeinander (z. B. vor und nach einem Zusammenstoß) ins

Auge. Vor der Reaktion werden mehrere Körper vorhanden sein, deren jeder sich in gerader Linie mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegt (Anfangszustand); ebenso nach der Reaktion, wenn jede Einwirkung der Einzelkörper aufeinander wieder aufgehört hat (Endzustand). Die Anzahl der Körper nach der Reaktion braucht nicht die gleiche zu sein wie vorher; während der Reaktion sind thermische und chemische Umsetzungen keineswegs ausgeschlossen. Das Impulsgesetz sagt nichts aus über den Verlauf der Reaktion im einzelnen, sondern vergleicht lediglich den Endmit dem Anfangszustand; es behauptet: *Einem isolierten (in gleichförmiger Bewegung begriffenen) Körper kommt ein bestimmter Impuls zu, das ist ein mit seiner Geschwindigkeit gleichgerichteter Vektor. Die Impulssumme der einzelnen Körper eines isolierten Systems vor einer Reaktion ist gleich der Impulssumme nach der Reaktion.* Dieses Gesetz kann als der allgemeine Ausdruck der Erfahrungstatsache betrachtet werden, daß sich ein zunächst ruhendes Körpersystem nicht aus eigener Kraft in eine einseitig fortschreitende Translationsbewegung versetzen kann; oder genauer: innere Reaktionen in einem isolierten ruhenden Körpersystem sind nicht imstande zu bewirken, daß nach der Reaktion ein Teil des Systems eine gemeinsame gleichförmige Translationsbewegung ausführt, während der Rest ruhend zurückbleibt. Weil Impuls  $\mathfrak{J}$  und Geschwindigkeit  $v$  gleiche Richtung besitzen, kann man setzen:  $\mathfrak{J} = m v$ . Der skalare Faktor  $m$  heißt *träge Masse*. Die Ausführungen zu Beginn dieses Abschnittes zeigen, wie man dadurch, daß man Körper miteinander reagieren läßt, auf Grund des Impulssatzes das Verhältnis ihrer Massen experimentell bestimmen kann.

Die Masse eines Körpers ist, allgemein zu reden, durch seinen Zustand bestimmt. Die Mechanik unterscheidet zwischen *innerem* (von einem mit dem Körper mitbewegten Beobachter zu beurteilenden) *Zustand* und dem durch die Geschwindigkeit gegebenen *Bewegungszustand*. Demgemäß muß sie die Frage aufwerfen: Wie hängt die Masse eines Körpers, dem unter Erhaltung seines inneren von einem mitbewegten Beobachter zu beurteilenden Zustandes verschiedene Geschwindigkeiten erteilt werden, von der Geschwindigkeit  $v$  ab? Die klassische Mechanik antwortet darauf: die Masse ist von der Geschwindigkeit unabhängig; die Mechanik der Relativitätstheorie, welche durch



die Beobachtungen an rasch bewegten Elektronen bestätigt wurde, behauptet das Gesetz

$$(1) \quad m = \frac{M_0}{\sqrt{c^2 - v^2}},$$

in welchem der „Massenfaktor“  $M_0$  von der Geschwindigkeit unabhängig ist und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. ( $M_0$  hat übrigens nicht die physikalische Dimension einer Masse, sondern des Produktes Masse  $\times$  Geschwindigkeit;  $m_0 = M_0/c$  ist die „Ruhmasse“, welche sich für  $v = 0$  ergibt.) Weiter fragt es sich, wie die Masse, bzw. der Massenfaktor von dem inneren Zustand des Körpers abhängt, wie er sich z. B. verändert, wenn der Körper erwärmt wird oder in ihm eine chemische Umsetzung vor sich geht. Die klassische Mechanik behauptet abermals, daß dabei die Masse erhalten bleibt, nach der Mechanik der Relativitätstheorie verändert sich jedoch  $M_0$  mit dem inneren Zustand des Körpers. Es ist höchst beachtenswert, daß die Antwort auf diese beiden Fragen sich zwingend aus einem allgemeinen Prinzip, dem *Relativitätsprinzip*, ergibt, welches aussagt, daß man aus einem naturgesetzlich möglichen Vorgang in einem isolierten System einen gleichfalls möglichen Vorgang erhält, wenn man allen Teilen des Systems eine gemeinsame gleichförmige Translation aufprägt.

Wir fassen wieder den oben geschilderten Vorgang ins Auge: Zwei gleichbeschaffene Körper  $K', K''$  mit entgegengesetzt gleichen Geschwindigkeiten  $v, -v$  vereinigen sich zu einem einzigen, notwendig ruhenden Körper  $k$  (man kann sich auch vorstellen, daß  $K', K''$  gleichzeitig in ein ruhendes widerstehendes Medium eindringen, in dem sie gebremst werden). Der Impulssatz bleibt nach dem Relativitätsprinzip gültig, wenn wir dem ganzen System, in welchem sich dieser Vorgang abspielt, die Geschwindigkeit  $u$  aufprägen. Haben dann  $K', K''$  die vektoriellen Geschwindigkeiten  $v'$  bzw.  $v''$  von der Größe  $v', v''$  und bedeutet  $m(v)$  für die beiden gleichbeschaffenen Körper  $K', K''$  die Masse als Funktion der Geschwindigkeit  $v$ , so muß also der Vektor

$$(2) \quad m(v') \cdot v' + m(v'') \cdot v'' \text{ parallel zu } u$$

sein. Nach dem in der klassischen Kinematik gültigen Gesetz von der Addition der Geschwindigkeiten ist

$$(3) \quad v' = v + u, \quad v'' = -v + u,$$

mithin

$$(4) \quad v' + v'' = 2u \text{ parallel zu } u.$$

Infolgedessen kann (2) nur bestehen, wenn  $m(v') = m(v'')$  ist; d. h.  $m(v)$  ist unabhängig von  $v$ . Die Relativitätstheorie führte zu einem anderen kinematischen Additionsgesetz; aus ihm schließt man, daß nicht (4) besteht, sondern

$$\frac{v'}{\sqrt{c^2 - v'^2}} + \frac{v''}{\sqrt{c^2 - v''^2}} \text{ parallel zu } u$$

ist, und daraus entspringt auf Grund von (2) die schon oben angegebene Formel (1).

Jetzt untersuchen wir einen beliebigen Reaktionsvorgang. In die Reaktion mögen mehrere Körper mit verschiedenen Massen  $m$  (bzw. Massenfaktoren  $M_0$ ) und Geschwindigkeiten  $v$  eintreten; aus der Reaktion gehen andere Körper mit anderen Massen  $\bar{m}$  (bzw. Massenfaktoren  $\bar{M}_0$ ) und anderen Geschwindigkeiten  $\bar{v}$  hervor. Der Impulssatz behauptet, daß

$$(5) \quad \Sigma m v = \Sigma \bar{m} \bar{v}$$

ist ( $\Sigma$  ist das Zeichen für *Summe*). Fügen wir wieder die gemeinsame Translationsgeschwindigkeit  $u$  hinzu, so lautet nach dem Additionsgesetz der klassischen Kinematik und weil die Massen  $m$  von der Geschwindigkeit unabhängig sind, der Impulssatz:

$$\Sigma m (u + v) = \Sigma m (u + \bar{v})$$

oder

$$\Sigma m v + u \Sigma m = \Sigma \bar{m} \bar{v} + u \Sigma \bar{m}.$$

In Verbindung mit (5) liefert das neben dem Impulssatz das *Gesetz von der Erhaltung der Masse*

$$(6) \quad \Sigma m = \Sigma \bar{m} :$$

die Gesamtmasse eines Körpersystems wird durch innere Reaktionen nicht verändert. Auf ganz analoge Weise erhält man, unter Zugrundelegung der relativistischen Kinematik, neben dem Impulssatz

$$(7) \quad \Sigma \frac{M_0 v}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \Sigma \frac{\bar{M}_0 \bar{v}}{\sqrt{c^2 - \bar{v}^2}}$$

den Satz von der Erhaltung der Energie

$$(8) \quad \Sigma \frac{M_0 c^2}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \Sigma \frac{\bar{M}_0 c^2}{\sqrt{c^2 - \bar{v}^2}}.$$

Als Energie eines Körpers vom Massenfaktor  $M_0$  und der Geschwindigkeit  $v$  erscheint hier die Größe

$$(9) \quad E = \frac{M_0 c^2}{\sqrt{c^2 - v^2}}.$$

Machen wir uns den Inhalt der Gleichung (8) zunächst an dem obigen Beispiel klar! Ein ruhender kugelförmiger Körper  $K$  von der Ruhmasse  $m_0$  bestehe aus zwei völlig gleichbeschaffenen Halbkugeln  $K', K''$ . Jede derselben hat die Ruhmasse  $\frac{1}{2} m_0$ . Wir nehmen die beiden Halbkugeln auseinander und jagen sie mit entgegengesetzt gleichen Geschwindigkeiten von der Größe  $v$  gegeneinander. Beim Zusammenstoß mögen sie sich zu einem einzigen (ruhenden) Körper  $\bar{K}$  vereinigen. Hat  $\bar{K}$  dieselbe Ruhmasse wie  $K$ ? Nach der klassischen Mechanik ja, nach der relativistischen nein. Die Gleichung (8) ergibt nämlich, auf den Vereinigungsvorgang angewendet:

$$\frac{1}{2} \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} + \frac{1}{2} \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \bar{m}_0 c^2$$

oder

$$\bar{m}_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Wir können sagen,  $\bar{K}$  ist derselbe Körper wie  $K$ ; nur ist sein innerer Zustand ein anderer geworden,



er hat sich nämlich erwärmt. Die Erwärmung, sehen wir, ist mit einer Massenänderung des ruhenden Körpers verbunden vom Betrage

$$\Delta m = m_0 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right).$$

Dieser Zuwachs  $\Delta m$  an Masse muß der gleiche sein, auf welchem Wege wir auch jene thermische Zustandsänderung hervorbringen, weil die Masse eines Körpers nur von seinem Zustand, nicht von dessen Vorgeschichte abhängt. Da haben wir sofort das Energiegesetz in der Form, wie es von ROB. MAYER, JOULE, HELMHOLTZ aus der Erfahrung abstrahiert wurde, und erkennen in  $\Delta m$  oder in  $c^2 \Delta m$  das *Energiemaß der thermischen Zustandsänderung*. Man kann die Masseneinheit so wählen, daß für die Erwärmung 1 ccm Wassers unter Atmosphärendruck von 15° auf 16° C (Kalorie) der Zuwachs  $c^2 \cdot \Delta m = 1$  ist. Sei  $S$  irgendein Körpersystem, in welchem unter der Einwirkung seiner Teile aufeinander und beliebiger anderer Körper eine Zustandsänderung  $\mathfrak{B}$  sich vollzogen hat. Wir können diese Zustandsänderung, wenn wir  $S$  mit einem Wasserkalorimeter und geeigneten Hilfskörpern verbinden, in der Weise rückgängig machen, daß die Hilfskörper aus dem Prozeß schließlich in gleichem Zustand wieder hervorgehen und nur das Kalorimeter eine Erwärmung (oder Abkühlung) erfahren hat. Beträgt seine Erwärmung  $w$  Kalorien, d. h. besteht sie darin, daß  $w$  ccm Wasser unter Atmosphärendruck sich von 15° auf 16° erwärmt haben (oder, wenn  $w$  negativ ist, daß  $-w$  Gramm sich von 16° auf 15° abgekühlt haben), so liefert die Anwendung der Gleichung (8) auf das abgeschlossene, aus  $S$ , dem Kalorimeter und den Hilfskörpern bestehende physikalische System und auf den eben geschilderten Prozeß die Beziehung

$$- \left[ \sum_s \frac{M_0 c^2}{\sqrt{c^2 - v^2}} \right] + w = 0.$$

Die eckige Klammer bedeutet den Zuwachs, welchen die auf das Körpersystem  $S$  allein bezügliche Summe durch die Zustandsänderung  $\mathfrak{B}$  erleidet. Durch welche Zwischenstufen also auch die Zustandsänderung  $\mathfrak{B}$  des Körpersystems  $S$  in eine Erwärmung des Kalorimeters umgesetzt wird — immer ergibt sich die gleiche Anzahl von Kalorien

$$w = \left[ \sum_s \frac{M_0 c^2}{\sqrt{c^2 - v^2}} \right].$$

Das ist das *phänomenologische Energiegesetz*. Zugleich zeigt sich, daß der Ausdruck rechts der Energiewert der Zustandsänderung  $\mathfrak{B}$  ist; und wir kommen so dazu, nicht bloß einer Zustandsänderung einen Energiewert, sondern einem Zustand ein *Energieniveau* zuzuschreiben — derart, daß der Energiewert einer Zustandsänderung gleich der Differenz des Energieniveaus im End- und im Anfangszustand ist. Das Energieniveau eines Körpers vom Massenfaktor  $M_0$  und der Geschwindigkeit  $v$  ist gegeben durch die Gleichung (9). Zwischen dem Energiegehalt  $E$  und der trägen Masse  $m$  eines Körpers besteht danach die universelle Relation

$$E = c^2 m.$$

(Für die klassische Mechanik versagt diese ganze Überlegung, weil nach ihr die Erwärmung eines ruhenden Körpers mit keiner Massenänderung verbunden ist.)

Unter der kinetischen Energie eines Körpers versteht man bekanntlich diejenige Energie, welche nötig ist, um ihn unter Erhaltung seines inneren, von einem mitbewegten Beobachter aus zu beurteilenden Zustandes von der Ruhe auf die Geschwindigkeit  $v$  zu bringen. Nach unseren Formeln ist der Energiewert dieser Zustandsänderung

$$= m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right).$$

Im Limes für  $c = \infty$  liefert das den Ausdruck  $\frac{m_0 v^2}{2}$  der klassischen Mechanik (sie ist der Grenzfall für solche Geschwindigkeiten  $v$ , welche klein sind gegenüber  $c$ ). Ein Energiegesetz hatten wir oben im Rahmen der klassischen Mechanik nicht erhalten; in der Tat hat es ja in seiner „rein mechanischen“ Gestalt

$$(10) \quad \sum \frac{m v^2}{2} = \sum \frac{\bar{m} \bar{v}^2}{2}$$

nur beschränkte Gültigkeit. Es bezieht sich allein auf solche Reaktionen, aus denen die Körper in ungeändertem inneren Zustand wieder hervorgehen; ich schlage vor, eine derartige Reaktion allgemein als *elastischen Stoß* zu bezeichnen. Man versteht eigentlich nur von der relativistischen Mechanik aus, woher im Falle des elastischen Stoßes das Gesetz (10) rührt. Sind  $m_1, m_2, \dots$  die Ruhmassen der Körper vor dem Stoß,  $\bar{m}_1, \bar{m}_2, \dots$  nach dem Stoß, so hat die Forderung, daß der innere Zustand der einzelnen Körper sich nicht geändert hat, die Gleichungen zur Folge

$$(11) \quad \bar{m}_1 = m_1, \quad \bar{m}_2 = m_2, \quad \dots$$

Die Gleichung (6) der klassischen Mechanik wird dadurch überflüssig, und an ihre Stelle tritt das neue Gesetz (10). Man erhält es aus dem allgemein gültigen Energiesatz der relativistischen Mechanik

$$\sum_i \frac{m_i c^2}{\sqrt{1 - (v_i/c)^2}} = \sum_i \frac{\bar{m}_i c^2}{\sqrt{1 - (\bar{v}_i/c)^2}},$$

wenn man links und rechts die nach (11) für den elastischen Stoß übereinstimmende Summe

$$c^2 \cdot \sum_i m_i = c^2 \cdot \sum_i \bar{m}_i$$

subtrahiert. Dann folgt, daß die *kinetische* Energie der Massen vor und nach dem Stoß die gleiche ist, und in der Grenze für  $c = \infty$  also das Huyghenssche Stoßgesetz (10).

Im allgemeinen hat aber nach der relativistischen Mechanik die Summe der Ruhmassen nach der Reaktion keineswegs den gleichen Wert wie vorher. Und doch käme als Maß für ein



Substanzquantum offenbar nur die von der Geschwindigkeit unabhängige *Ruhmasse* in Frage! Die These „Masse = Substanzquantum“ ist damit ad absurdum geführt. Aber vielleicht hätte es dessen gar nicht mehr bedurft; aus unseren Darlegungen geht ohnehin hervor, daß mit dem Wort „Substanzquantum“ die Rolle nicht umschrieben werden kann, welche die Masse in den physikalischen Reaktionsvorgängen spielt.

Neben dem Erhaltungsgesetz für Energie und Impuls tritt das Gesetz, daß bei Reaktionen innerhalb eines abgeschlossenen Körpersystems die elektrische *Gesamtladung* sich nicht verändert. Die Ladung eines Körpers ist von seinem Bewegungszustand unabhängig. Aber die Ladung kommt als Maß für eine Substanzmenge offenbar darum nicht in Frage, weil sie sowohl positiver wie negativer Werte fähig ist.

Es sei noch erwähnt, wie sich unsere Formeln in der allgemeinen Relativitätstheorie modifizieren, wenn wir annehmen, daß die Körper in ein unveränderliches statisches Maßfeld (Gravitationsfeld) eingebettet sind, in welchem die Lichtgeschwindigkeit  $f$  (oder, was dasselbe ist, das Gravitationspotential) eine Funktion des Ortes ist. Auch dann besitzt ein Körper einen konstanten, nur von seinem inneren Zustand abhängigen Massenfaktor  $M_0$ , und es ist die träge Masse

$$m = \frac{M_0}{\sqrt{f^2 - v^2}}, \quad \text{die Energie } E = \frac{M_0 f^2}{\sqrt{f^2 - v^2}} = m f^2;$$

insbesondere für einen ruhenden Körper ( $v = 0$ ):

$$m = \frac{M_0}{f}, \quad E = M_0 f.$$

Über die Beziehung dieser Formeln zu der Frage, ob die Masse eines Körpers nach dem Vorschlag von MACH als Induktionswirkung der Fixsterne aufgefaßt werden kann, vergleiche den vor kurzem in dieser Zeitschrift erschienenen Dialog über „Massenträgheit und Kosmos“ (Bd. 12, S. 197). Die elektrische Ladung verhält sich in dieser Hinsicht viel einfacher als die Masse; sie ist, wie vom Bewegungszustand, so auch vom einbettenden Maßfeld unabhängig.

### III. Die Feldtheorie.

Anders als im Abschnitt I soll diesmal die moderne Fassung der Theorie vorangestellt werden, und wir wollen erst hernach auf die früheren Ansätze zur Feldtheorie und die historischen Wandlungen eingehen. Ferner liegt es in der Natur der Sache, daß wir schon hier, dem Abschnitt IV vorgreifend, gewisse dynamische Gesichtspunkte hineinziehen müssen.

Weil für einen isolierten Körper  $k$  Impuls  $\mathfrak{S}$  und Energie  $E$  zeitlich konstant sind, sind die Änderungen beider Größen pro Zeiteinheit  $\frac{d\mathfrak{S}}{dt}$  bzw.  $\frac{dE}{dt}$ , „Kraft“ und „Leistung“, ein Maß für die Einwirkung, welche  $k$  von anderen Körpern  $k_1, k_2 \dots$  erfährt. In der Tat erkannte NEWTON,

daß die Kraft sich additiv aus einzelnen Kräften zusammensetzt, welche von je einem der Körper  $k_1, k_2, \dots$  auf  $k$  ausgeübt werden; in solcher Weise, daß die Kraft, welche z. B.  $k_1$  auf  $k$  in einem Moment ausübt, nur von dem Zustand dieser beiden Körper, ihrem Ort und ihrer Geschwindigkeit im gleichen Augenblick abhängt. Dasselbe gilt von der Leistung. Aus der Relativität von Ort und Bewegung ergibt sich übrigens sogleich, daß in das

Kraftgesetz nur der Vektor  $\vec{k} k_1$  und die vektorielle Relativgeschwindigkeit der beiden Körper eingehen werden. Im Falle der Gravitation ist nach NEWTON die Kraft sogar von der Geschwindigkeit unabhängig und infolgedessen eine universelle Funktion der Entfernung  $r$  allein (nämlich nach dem Attraktionsgesetz  $= \frac{1}{r^2}$ ); im Ge-

biet der Elektrizität aber kommt zu der elektrostatischen Anziehung bzw. Abstoßung bei bewegten Ladungen noch die Ampèresche Kraft hinzu, welche zwei Ströme aufeinander ausüben; denn eine bewegte Ladung ist elektrischer Strom — von der Stromstärke: Ladung mal Geschwindigkeit. Wesentlich aber ist, daß der Bewegungszustand nur in Form der *Geschwindigkeit* beider Körper  $k, k_1$  im Kraftgesetz vorkommt. Denn aus der Erklärung der Kraft ist es ja ohnehin klar, daß sie sich durch die Beschleunigung, übrigens sogar durch die Beschleunigung des Körpers  $k$  allein ausdrücken läßt; dazu bedarf es keines Naturgesetzes. Wenn jenes Postulat aber erfüllt ist, so bestimmt das Newtonsche Bewegungsgesetz für ein System, das aus Körpern von bekanntem konstanten inneren Zustand besteht, bei gegebener Lage und Geschwindigkeit der Körper in einem Augenblick  $t$  ihre Lage und Geschwindigkeit im nächstfolgenden Augenblick  $t + dt$ , und somit, indem wir von Augenblick zu Augenblick integrierend fortschreiten, den ganzen Verlauf der Bewegung. In dieser besonderen, aber streng mathematisch faßbaren Gestalt gilt hier *das Kausalitätsprinzip*.

Auf Grund der angegebenen Tatsachen kommt man notgedrungen zu der Auffassung, daß die Definition „Kraft = Ableitung des Impulses“ das Wesen der Kraft nicht richtig wiedergibt. Der wirkliche Sachverhalt ist vielmehr umgekehrt: Die Kraft ist der Ausdruck für eine selbständige, die Körper zufolge ihrer inneren Natur und ihrer gegenseitigen Lage und Bewegungsbeziehung verknüpfende Potenz, welche die zeitliche Änderung des Impulses *verursacht*. Bei dieser metaphysischen Deutung mag das innere Bewußtsein des Ichs, im willentlichen Handeln Grund eines Geschehens zu sein, entscheidend hineinspielen. Es ist aber zu beachten, daß in NEWTONS Physik der Fernkräfte die Kraft nicht eine durch einen einzigen Körper  $k$  bestimmte, von ihm ausgehende Aktivität ist, sondern eine Wechselbeziehung zweier Körper ( $k$  und  $k_1$ ), die sich gegenseitig über einen Abgrund hinüber die Hände reichen.



Durch das mechanische Grundgesetz der Bewegung wird der Physik die Aufgabe überbunden, die zwischen Körpern wirkenden Kräfte in ihrer Abhängigkeit von Ort, Bewegung und innerem Zustand zu erforschen. Der letztere wird in die Kraftgesetze mittels gewisser, für den inneren Zustand der reagierenden Körper charakteristischer Zahlen eingehen, wie z. B. die Ladung in das Coulombsche Gesetz der elektrostatischen Anziehung und Abstoßung. *So wird der Kraftbegriff zu einer Quelle neuer meßbarer physikalischer Kennzeichen der Materie*, welche ebenso wie die Masse mit den im ersten Abschnitt besprochenen, aus der Substanzvorstellung entsprungene Merkmalen nichts mehr zu tun haben. Insbesondere tritt an Stelle der Härte und Undurchdringlichkeit der Atome — welche bewirkte, daß sich zwei Atome bis zu ihrem Zusammenstoß gleichförmig bewegten, in diesem Augenblick aber momentan in eine andere gleichförmige Bewegung umspringen — das Gesetz, nach welchem die repulsive Kraft, mit der zwei Atome aufeinander wirken, von ihrer Entfernung abhängt; eine solche repulsive Kraft hat zur Folge, daß nicht ein momentaner Stoß erfolgt, sondern die Bahn eines Atoms bei Annäherung an ein anderes sich allmählich krümmt. Es ist kein Zweifel, daß diese Vorstellung der Wahrheit viel näher kommt als die Huyghenssche. Man sieht an diesem Beispiel, daß die Entdeckung der „dynamischen“ Eigenschaften der Materie von selber dazu führt, ihre „substantiellen“ zu verdrängen, die zur Erklärung der Naturerscheinungen überflüssig werden. Im IV. Abschnitt kommen wir genauer darauf zurück; hier sollte uns der Kraftbegriff nur als Vorbereitung dienen auf die Idee des *Feldes*.

Diese Idee hat sich bei FARADAY und MAXWELL aus dem Bestreben entwickelt, die Wechselkräfte, welche geladene Körper aufeinander ausüben, durch eine kontinuierliche Wirkungsübertragung (Nahewirkung) verständlich zu machen. Um das Kraftfeld zu untersuchen, das geladene ruhende Konduktoren umgibt, bedient man sich eines schwach geladenen Probekörpers. Derselbe erfährt an jeder Stelle  $P$  des leeren Raumes eine bestimmte, im allgemeinen natürlich von Ort zu Ort wechselnde Kraft  $\mathfrak{E}(P)$ ; immer wieder aber, wenn ich den Probekörper an dieselbe Raumstelle  $P$  zurückbringe, dieselbe Kraft  $\mathfrak{E}(P)$ . Immer wieder, wenn ich zum Fenster meines Arbeitszimmers hinaus schaue, habe ich dieselben Gesichtswahrnehmungen eines rotbedachten dreistöckigen Hauses. Mit demselben Recht, wie ich daraufhin zu der Ansicht komme, es stehe ein derartiges Haus da, ganz unabhängig davon, ob ich zu ihm hinschaue oder nicht, nehme ich hier an, daß in dem die Konduktoren umgebenden Raume ein Kraftfeld vorhanden ist, auch wenn ich die Kraft nicht an einem in das Feld hineingebrachten Probekörper konstatiere; der Probekörper ist nur das Mittel, das an sich vorhandene Kraftfeld wahrnehmbar und meßbar zu machen. Freilich ist

die Kraft  $\mathfrak{E}(P)$  im Punkte  $P$  außer vom Zustand der Konduktoren auch von dem des Probekörpers abhängig — wie übrigens ja auch die Gesichtswahrnehmung außer durch den objektiven Zustand des wahrgenommenen Gegenstandes von dem Beobachter abhängt; aber beide Komponenten lassen sich — im Falle des Kraftfeldes — sehr leicht voneinander trennen. Verwenden wir nämlich zur Untersuchung des gleichen Feldes einen anderen Probekörper, so stellt sich heraus, daß die an ihm wahrgenommene Kraft  $\mathfrak{R}(P)$  zu  $\mathfrak{E}(P)$  in einem konstanten Verhältnis steht:  $\mathfrak{R}(P) = e \cdot \mathfrak{E}(P)$ . Und auch wenn wir dieselben beiden Probekörper zur Untersuchung anderer elektrostatischer Felder benutzen, die von anderen Konduktoren erzeugt werden, erweist sich immer wieder diese Gleichung mit demselben Wert der Konstanten  $e$  als gültig. Die Kraft  $\mathfrak{R}(P)$ , welche die Konduktoren auf irgendeinen Probekörper an der Stelle  $P$  ausüben, ist also das Produkt zweier Faktoren  $e \cdot \mathfrak{E}$ , von denen der skalare  $e$ , die „Ladung“ des Probekörpers, vom Ort  $P$  unabhängig und allein durch den Zustand des Probekörpers bestimmt ist, während der vektorielle Faktor  $\mathfrak{E} = \mathfrak{E}(P)$ , die „elektrische Feldstärke“, nur von den Konduktoren, nicht aber vom verwendeten Probekörper abhängt, im übrigen aber eine Funktion des Ortes ist. Die Zerlegung ist eindeutig bestimmt, wenn wir die Einheitsladung willkürlich (als die Ladung eines bestimmten, hier an erster Stelle verwendeten Probekörpers) festsetzen. Das von den Konduktoren erzeugte und von ihnen allein abhängige elektrische Feld  $\mathfrak{E}$  wird man jetzt nicht länger als *Kraftfeld* bezeichnen dürfen; es ist vielmehr eine Realität sui generis. Die Gleichung

$$(12) \quad \mathfrak{R} = e \cdot \mathfrak{E}$$

zwischen Kraft  $\mathfrak{R}$  und Feldstärke  $\mathfrak{E}$  ist nicht Definition, sondern ein Naturgesetz, welches die ponderomotorische Wirkung bestimmt, die ein derartiges elektrisches Feld  $\mathfrak{E}$  auf eine hineingebrachte Punktladung  $e$  ausübt. Tatsächlich ist es, wie die entwickelte Theorie lehrt, nicht einmal streng gültig, sondern nur im Grenzfall unendlich schwacher Ladung  $e$  des Probekörpers. Da das *Licht* nach der Maxwell'schen Theorie nichts anderes ist als ein periodisch veränderliches elektromagnetisches Feld von sehr kleiner Periode, können wir das Feld in seinem Gegensatz zur Materie vielleicht am besten als etwas Lichtartiges bezeichnen. Im Auge besitzen wir ein Sinnesorgan, mit Hilfe dessen wir gewisse elektromagnetische Felder auch anders als durch ihre ponderomotorischen Wirkungen wahrnehmen.

Ist der Raum zunächst feldfrei und entsteht dann Elektrizität durch Trennung von Ladungen, die vorher so nahe vereinigt waren, daß sie sich neutralisierten, so wird von ihnen ein mit Lichtgeschwindigkeit ( $c$ ) sich ausbreitendes Feld erregt; statt unmittelbarer Fernwirkung bekommen wir hier also eine kontinuierliche, von Punkt zu



Punkt mit endlicher Geschwindigkeit sich fort-pflanzende Wirkungsausbreitung. Und die Wechselkraft des Körpers  $k$  auf  $k_1$  zerlegt sich in eine Aktivität von  $k$  (Erregung des durch  $k$  allein bestimmten Feldes) und ein Erleiden von  $k_1$  (durch jenes Feld verursachte zeitliche Änderung seines Impulses). Dazwischen schiebt sich die Ausbreitung des Feldes, die nach eigenen Gesetzen von der durchsichtigsten Einfachheit und Harmonie vor sich geht. Bewegte Ladungen erzeugen neben dem elektrischen Feld  $\mathfrak{E}$  ein magnetisches  $\mathfrak{H}$ ; in der Relativitätstheorie vereinigen sich beide Bestandteile zu einem einzigen „Feldtensor“. Die Ausbreitungsgesetze für das elektromagnetische Feld ( $\mathfrak{E}$ ,  $\mathfrak{H}$ ) im leeren Raum lauten nach MAXWELL<sup>1)</sup>

$$(13) \quad -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial t} + \text{rot } \mathfrak{H} = 0, \quad \frac{1}{c} \frac{\partial \mathfrak{H}}{\partial t} + \text{rot } \mathfrak{E} = 0.$$

Wesentlich an ihnen ist, 1. daß sie Differentialgleichungen sind, Nahwirkungsgesetze, welche nur die Werte der Zustandsgrößen  $\mathfrak{E}$  und  $\mathfrak{H}$  in unendlich benachbarten Raum-Zeitpunkten miteinander verknüpfen; 2. daß nach ihnen sich die zeitliche Änderung des Feldes  $\frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial \mathfrak{H}}{\partial t}$  aus seinem momentanen Zustand bestimmt (Gültigkeit des Kausalitätsprinzips). Es treten freilich noch zwei Zusatzbedingungen hinzu, welche nur die räumlichen, nicht die zeitliche Ableitung enthalten:

$$(14) \quad \text{div } \mathfrak{E} = 0, \quad \text{div } \mathfrak{H} = 0.$$

Aber sie sind in gewissem Sinne überschüssig. Aus (13) folgt nämlich, daß die zeitliche Ableitung der beiden Divergenzen identisch verschwindet. Genügt also der Anfangszustand des Feldes den Bedingungen (14), so bleiben sie dauernd erfüllt.

Die Definition des Feldes mit Hilfe seiner ponderomotorischen Wirkung auf einen Probekörper ist nur ein Provisorium. Durch das Hereinbringen des geladenen Probekörpers stört man immer in etwas das Feld, das es eigentlich zu beobachten galt; befindet er sich einmal im Felde, so gehört er so gut wie die übrigen Konduktoren mit zu den das Feld erzeugenden Ladungen. Das wahre Naturgesetz, das an Stelle von (12) tritt, wird also anzugeben haben, was für Kräfte das von irgendwie verteilten Ladungen erregte elektrische Feld auf diese Ladungen selber ausübt. Mit dem sich ausbreitenden Feld wird von dem einen Körper auf den anderen Impuls übertragen — wie ja auch kein Zweifel darüber herrschen kann, daß durch Lichtstrahlen (Wärmestrahlen) Energie von Körper zu Körper transportiert wird. Während das Licht unterwegs ist, nachdem also die Energie den einen Körper verlassen und den an-

dern noch nicht erreicht hat, müssen wir sie notwendig im Felde lokalisieren. Auf Grund der Ausbreitungsgesetze (13) kommt man zu folgendem Resultat:  $\frac{1}{2} \mathfrak{E}^2$  ist als Energiedichte des elektrischen,  $\frac{1}{2} \mathfrak{H}^2$  als Energiedichte des magnetischen Feldes anzusetzen; die Stromdichte  $\mathfrak{S}$  der Energie ist  $= c [\mathfrak{E} \mathfrak{H}]$ , also ein Vektor, welcher senkrecht zu  $\mathfrak{E}$  und  $\mathfrak{H}$  steht und dessen Größe gleich  $c$  mal dem Flächeninhalt des von  $\mathfrak{E}$  und  $\mathfrak{H}$  gebildeten Parallelogramms ist. Bezeichnet man demnach das Volumintegral von

$$W = \frac{1}{2} (\mathfrak{E}^2 + \mathfrak{H}^2)$$

über irgendein Raumgebiet  $V$  als die in  $V$  enthaltene Feldenergie und berechnet man den Energiestrom, welcher durch die Oberfläche  $\Omega$  von  $V$  von außen nach innen hinübertritt in der Weise, daß dazu das Oberflächenelement  $df$  einen Beitrag liefert:  $df$  mal der zu  $df$  senkrechten Komponente von  $\mathfrak{S}$ , so gilt: die Zunahme pro Zeiteinheit der gesamten in  $V$  enthaltenen Energie — das ist Feldenergie + Energie der in  $V$  vorhandenen Materie — ist gleich dem durch  $\Omega$  hindurchtretenden Energiefluß. Die gesamte Energiemenge bleibt also beständig konstant, sie fließt nur im Felde hin und her und verwandelt sich aus Feldenergie in Energie der Materie und vice versa. Führt man ein rechtwinkliges Koordinatensystem ein und ersetzt den vektoriellen Impuls durch seine drei Komponenten in diesem Koordinatensystem, so gilt für die drei Impulskomponenten etwas ganz Analoges: für jede von ihnen haben wir eine skalare Felddichte, eine vektorielle Stromdichte und den entsprechenden Erhaltungssatz. Er ist nur ein anderer Ausdruck für NEWTONS mechanisches Grundgesetz; an die Stelle der Formel (12) sind die Gleichungen getreten, welche Energie- und Impulsdichte, Energie- und Impulsstrom durch die Feldstärken  $\mathfrak{E}$  und  $\mathfrak{H}$  ausdrücken. Insbesondere ist für ein Raumgebiet  $V$ , das überhaupt keine Materie enthält, die zeitliche Zunahme der Feldenergie gleich dem durch die Oberfläche eintretenden Energiefluß (genau so für die drei Impulskomponenten), in Formeln:

$$(15) \quad \frac{\partial W}{\partial t} + \text{div } \mathfrak{S} = 0;$$

und diese Tatsache ist eine mathematische Folge der Feldgesetze (13), (14).

Betrachten wir ein sich ausbreitendes elektromagnetisches Feld im leeren Raum, das in jedem Augenblick nur einen endlichen Raumbereich erfüllt; z. B. eine elektromagnetische Welle, welche dadurch entstanden ist, daß wir eine Kerze angezündet haben, die aber inzwischen schon wieder ausgelöscht sein mag. Diesem Feld kommt eine bestimmte Gesamtenergie  $E$  und ein Impuls  $\mathfrak{S}$  zu, welche während des Ausbreitungsvorganges zeitlich konstant bleiben. Genau wie wir in der Mechanik den Schwerpunkt, den „Massenmittelpunkt“ definieren, können wir hier in jedem Augenblick den „Energimittelpunkt“ des Feldes bestimmen; er liegt innerhalb des felderregten

<sup>1)</sup> Nur um der größeren Bestimmtheit willen schreibe ich diese Gesetze hin; Leser, welchen die mathematische Symbolik nicht vertraut ist, sollen sich dadurch nicht abschrecken lassen!



Raumgebietes. Bezeichnet  $v$  seine Geschwindigkeit, so gilt

$$|v| < c \quad \text{und} \quad \mathfrak{S} = \frac{E}{c^2} \cdot v :$$

unser Feld hat also genau wie ein materieller Körper eine träge Masse

$$m = \frac{E}{c^2} .$$

Man kann auch schreiben

$$E = \frac{M_0 c^2}{\sqrt{c^2 - v^2}}, \quad \mathfrak{S} = \frac{M_0 v}{\sqrt{c^2 - v^2}} ;$$

dann ist der „Massenfaktor“  $M_0$  im Sinne der Relativitätstheorie eine vom verwendeten Bezugskörper unabhängige Größe. Bei der Reaktion zwischen mehreren elektromagnetischen Wellen oder zwischen Feld und Materie, bei Emissions- und Absorptionsvorgängen wird stets die Energie- und Impulssumme nach der Reaktion den gleichen Wert haben wie vorher. Über diese schon in II besprochenen Erhaltungssätze „im großen“, die wir hier auf Strahlungsvorgänge ausgedehnt haben, sind wir aber, was das Feld betrifft, durch eine genaue raumzeitliche Analyse des Reaktionsvorganges hinausgeschritten. Zunächst bedeutete der Übergang zu NEWTONS mechanischem Bewegungsgesetz, daß wir die zeitlichen Änderungen der Energie und des Impulses von Augenblick zu Augenblick während der Reaktion verfolgten. Zu dieser differentiellen zeitlichen Analyse tritt durch die Feldvorstellung die differentielle räumliche: Energie und Impuls des Systems werden in die den einzelnen Volumelementen zukommenden Beiträge zerlegt, sie werden „lokalisiert“ und über den Raum kontinuierlich ausgebreitet. Dazu ist man im Grunde aber auch schon bei den materiellen Körpern genötigt; denn was will man eigentlich bei Anwendung der mechanischen Gesetze unter der Geschwindigkeit eines Körpers verstehen, wenn der Körper sich während der Bewegung deformiert oder ein Gasnebel durcheinanderwimmelnder Moleküle ist? Hier wird man offenbar, wie es auch z. B. in der Elastizitätstheorie mit der Spannungsenergie immer geschehen ist, Energie und Impuls gleichfalls lokalisieren müssen und unter der Geschwindigkeit des ganzen Körpers nicht die Geschwindigkeit irgendeiner Substanzstelle, sondern seines Energiemittelpunktes zu verstehen haben.

Der Prellbock, an welchem die sich einem bestimmten Atom (oder Elektron) nähernden Atome abprallen, ist nicht seine starre undurchdringliche Substanz, sondern das ihn umgebende Kraftfeld. Die träge Masse ist nicht ein Substanzquantum, sondern beruht auf seinem Energieinhalt, der zu einem wesentlichen Teile oder gar vollständig aus der Feldenergie des umgebenden Feldes besteht. Setzt man die radial gerichtete Feldstärke im Raume außerhalb eines Elektrons nach der Maxwell'schen Theorie  $= \frac{\varepsilon}{r^2}$  ( $r$  die Entfernung vom

Elektronenmittelpunkt,  $\varepsilon$  eine Konstante), so ergibt sich als Energie des ganzen Außenfeldes, wenn das Elektron den Radius  $a$  besitzt,

$$2 \pi \int_a^\infty \frac{\varepsilon^2}{r^4} r^3 dr = \frac{2 \pi \varepsilon^2}{a} .$$

Beruhet auf ihr allein die träge Masse  $m$  des Elektrons<sup>1)</sup>, so erhält man für den Radius

$$a = \frac{2 \pi \varepsilon^2}{m c^2} .$$

Auf Grund der experimentell bekannten Werte von  $\varepsilon$  und  $m$  erhält man daraus ein  $a$  von der Größenordnung  $10^{-13}$  cm. Der Radius muß einen endlichen Wert haben und kann nicht 0 sein, weil man sonst auf eine unendlich große Energie und damit auf eine unendlich große Masse kommen würde. Endlich sahen wir eben, daß sich selbst der in der Mechanik auftretende Geschwindigkeitsbegriff von der Substanzvorstellung emanzipiert. Wenn so alle physikalisch wesentlichen Eigenschaften des Elektrons an dem umgebenden Felde und nicht an dem im Feldzentrum steckenden substantiellen Kerne hängen, so muß man sich doch fragen, ob denn überhaupt die Annahme eines derartigen Kernes nötig ist oder ob wir ihn nicht ganz entbehren können. Die letzte Frage beantwortet die Feldtheorie der Materie mit Ja; ein Materieteilchen wie das Elektron ist für sie lediglich ein kleines Gebiet des elektrischen Feldes, in welchem die Feldstärke enorm hohe Werte annimmt und wo demnach auf kleinstem Raum eine gewaltige Feldenergie konzentriert ist. Ein solcher Energieknoten, der gegen das übrige Feld keineswegs scharf abgegrenzt ist — der geometrische Begriff des Elektronenradius verliert also seinen präzisen Sinn —, pflanzt sich durch den leeren Raum nicht anders fort, wie etwa eine Wasserwelle über die Seefläche fortschreitet; es gibt da nicht ein und dieselbe Substanz, aus der das Elektron zu allen Zeiten besteht. Wie die Geschwindigkeit einer Wasserwelle nicht substantielle, sondern Phasengeschwindigkeit ist, so handelt es sich bei der Geschwindigkeit, mit der sich ein Elektron bewegt, auch nur um die Geschwindigkeit eines ideellen, aus dem Feldverlauf konstruierten „Energiemittelpunktes“. Läßt sich diese Auffassung durchführen, durch welche der die Physik seit FARADAY und MAXWELL beherrschende Dualismus von Materie und Feld zugunsten des Feldes überwunden wird, so ergäbe sich ein außerordentlich einheitliches Weltbild. Statt der drei Arten von Gesetzen, nach denen das

<sup>1)</sup> Legt man der Berechnung der trägen Masse in analoger Weise den Impuls des Feldes zugrunde, das gemäß den Maxwell'schen Gleichungen das mit der Geschwindigkeit  $v$  gleichförmig bewegte Elektron umgibt, so bekommt man einen Wert, der  $\frac{2}{3}$ mal so groß ist. Die alte, an die Substanzvorstellung gebundene Elektronentheorie mußte in dieser Diskrepanz ein ernsthaftes physikalisches Problem erblicken. Vgl. die Bemerkung darüber auf S. 567.



Feld 1. durch die Materie erregt, emittiert wird, 2. sich ausbreitet und 3. auf die Materie wirkt, behalten wir nur die Feldgesetze 2 übrig vom Typus der Maxwell'schen Gleichungen (13), deren Struktur uns völlig durchsichtig ist, während die Gesetze 1 und 3, in deren Dunkel die Physik auch heute noch kaum eingedrungen ist, überflüssig werden. Insbesondere ist die Gültigkeit der mechanischen Gleichungen gewährleistet durch den aus den Feldgesetzen folgenden differentiellen Energie-Impulssatz, dessen Energiekomponente für das Maxwell'sche Feld in Formel (15) angegeben wurde. Man kann dieses Weltbild kaum als ein dynamisches mehr bezeichnen, weil hier das Feld weder von einem dem Felde gegenüberstehenden materiellen Agens erzeugt wird noch auf ein solches wirkt, sondern lediglich, seiner Eigengesetzlichkeit folgend, in einem stillen kontinuierlichen Fließen begriffen ist. Es ruht ganz und gar im *Kontinuum*; auch die Atomkerne und Elektronen sind keine letzten unveränderlichen, von den angreifenden Naturkräften hin und her geschobenen Elemente, sondern selber stetig ausgebreitet und feinen fließenden Veränderungen unterworfen.

Die Maxwell'schen Gleichungen (13) reichen natürlich nicht aus, um die Materieteilchen als Energieknoten im elektromagnetischen Felde zu konstruieren, da die in einem Elektron zusammengedrängten negativen Ladungen, den Coulomb'schen Fliehkräften folgend, explodieren würden, wenn in ihrem Bereiche noch jene Gesetze gültig wären. Mathematisch kommt das darin zum Ausdruck, daß das einzige statische, um ein Zentrum  $O$  kugelsymmetrische Feld  $\mathcal{E}$ , welches der Maxwell'schen Gleichung  $\text{div } \mathcal{E} = 0$  genügt, im Zentrum  $O$  eine Singularität bekommt; es ist nämlich radial gerichtet, und seine Stärke nimmt mit wachsender Entfernung  $r$  nach dem Gesetz  $\frac{\varepsilon}{r^2}$  ab ( $\varepsilon = \text{const}$ ), wird also im Nullpunkt unendlich. (In der Tat verlangt die Gleichung  $\text{div } \mathcal{E} = 0$ , daß durch jede Kugel um  $O$  der gleiche Feldfluß hindurchtritt, d. h. es muß  $\frac{\varepsilon}{r^2} \cdot 4 \pi r^2 = 4 \pi \varepsilon$  konstant sein.) Nach der alten Substanzvorstellung wird der Zusammenhalt der negativen Ladungen im Elektron dadurch erzwungen, daß sie an ein Substanzkugelchen gebunden sind, das sie nicht verlassen können; und nur zu diesem Zwecke hatte man in der atomistischen Lorentz'schen Elektrodynamik die Substanz noch nötig. G. MIE<sup>1)</sup> wies 1913 aus recht zwingenden allgemeinen Anschauungen heraus einen Weg, die Maxwell'schen Gleichungen so zu modifizieren, daß sie evtl. das Problem der Materie zu lösen imstande sind, nämlich erklären, warum das Feld eine „körnige“ Struktur besitzt und die Energieknoten sich im Hin- und Herströmen von Energie und Impuls dauernd erhalten (wenn auch nicht völlig unveränderlich, so doch mit

einem hohen Grad von Genauigkeit). Dies muß darauf beruhen, daß die modifizierten Feldgesetze nur *einen* Gleichgewichtszustand oder wenige, durch keinen kontinuierlichen Übergang verbundene Gleichgewichtszustände von Energieknoten ermöglichen (statische kugelsymmetrische Lösungen der Feldgleichungen). Damit wäre es auch verständlich geworden, warum *alle Elektronen dieselbe Ladung* besitzen: aus den Feldgesetzen lassen sich Ladung und Masse des Elektrons und die Atomgewichte der einzelnen existierenden chemischen Elemente „vorhersehen“, berechnen (die Substanztheorie hatte diese letzten Bausteine der Materie immer als etwas mit seinen numerischen Eigenschaften Gegebenes hingenommen, ihr mußte es unverständlich bleiben, warum nur Substanzkugeln von ganz bestimmten Radien und Massen in der Natur vorkommen). Und hier, nicht in der Unterscheidung von Substanz und Feld, läge ferner der Grund, warum wir an der Energie oder trägen Masse eines zusammengesetzten Körpers die nichtauflösbare Energie seiner letzten materiellen Elementarbestandteile der auflösbaren Energie ihrer wechselseitigen Bindung gegenüberstellen. Als einzige Zustandsgrößen verwendete MIE zunächst die aus der Maxwell'schen Theorie bekannten elektromagnetischen. Von anderen ursprünglichen Feldkräften außer der elektromagnetischen und der Gravitation ist uns nichts bekannt, und 1913 bestand noch die Hoffnung, die Gravitation als ein Begleitphänomen des Elektromagnetismus zu erklären. Nach Aufstellung der allgemeinen Relativitätstheorie durch EINSTEIN genügte es aber, MIE'S Ansätze von dem Boden der speziellen auf den der allgemeinen Relativitätstheorie zu verpflanzen, wie das durch HILBERT geschah, um die Gravitation mit zu umfassen. Daran schließen sich weitere Versuche von WEYL, EDDINGTON und EINSTEIN, elektromagnetisches und Gravitationsfeld völlig zu einer Einheit zu verschmelzen. In MIE'S fundamentalen Arbeiten aber war zum erstenmal überhaupt Sinn und Aufgabe der reinen Feldphysik klar erfaßt. Er gelangte, wie freilich betont werden muß, auf seinem spekulativen Weg — und ein anderer ist hier zur Zeit kaum gangbar — nicht zu eindeutig fixierten Feldgesetzen, sondern nur zu einem allgemeinen Schema, das noch verschiedener Spezialisierungen fähig ist und in welchem die Maxwell'schen Feldgesetze des leeren Raumes als einfachster Sonderfall mitenthalten sind. Und es gelang bisher nicht, im Rahmen dieses Schemas die unbestimmt bleibende Wirkungsfunktion so zu wählen, daß sie zu einzelnen diskreten Gleichgewichtszuständen der Materieteilchen führt (obchon die Mathematik durch eine Konstantenabzählung erkennen läßt, daß dies sozusagen normalerweise zu erwarten ist). Zur näheren Illustration kann ich darum nur ein fingiertes Beispiel gebrauchen: es liegt durchaus im Bereich der mathematischen Möglichkeit, daß bei geeignet gewählter Wirkungsfunktion sich als einzige

<sup>1)</sup> Ann. d. Physik 37, 39, 40. 1912/1913.



überall reguläre statische kugelsymmetrische Lösung der Feldgesetze die Formel ergäbe

$$(16) \text{ radiale elektrische Feldstärke} = \frac{\varepsilon}{r^2 + a^2}$$

mit den Konstanten  $\varepsilon = -4,77 \cdot 10^{-10}$  elektrostatische Einheiten,  $a = 10^{-13}$  cm. Damit wäre das Elektron, sein Radius  $a$ , Ladung  $\varepsilon$  und Masse erklärt; in Entfernungen  $r$ , die groß gegenüber  $a$  sind, geht der Ausdruck über in den Maxwell'schen  $\frac{\varepsilon}{r^2}$ , im Nullpunkt aber ist die Singularität verschwunden.

Es ist hier nicht der Ort, über die Miesche Theorie eingehender zu referieren. Ich schildere lieber zusammenfassend und unabhängig von den besonderen Ansätzen MIES die allgemeinen Züge einer *Feldtheorie der Materie*. Statt einer sich bewegenden Substanz bilden in ihr die Grundlage gewisse, im vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuum ausgebreitete physikalische *Zustandsgrößen*; wird jenes Kontinuum — nach der allgemeinen Relativitätstheorie in völlig willkürlicher Weise — auf vier Koordinaten bezogen, so erscheinen die Feldgrößen in ihrem wirklichen Verlauf wiedergegeben durch stetige Funktionen der Raum-

Zeit-Koordinaten. Sie genügen gewissen einfach gebauten Differentialgleichungen, den *Feldgesetzen*, welche von solcher Art sind, daß sie die Ableitungen der Zustandsgrößen nach der Zeit-Koordinate in einem Augenblick aus dem momentanen im dreidimensionalen Raum ausgebreiteten Feldzustand zu bestimmen gestatten (*Kausalitätsprinzip*). Außerdem muß das System der Feldgesetze, um eine objektive Bedeutung zu haben, unabhängig sein von der Wahl des Koordinatensystems (*Relativitätsprinzip*). Endlich müssen *Energie- und Impulsdichte, Energie- und Impulsstrom* als Ausdrücke in den unabhängigen Zustandsgrößen des Feldes gegeben sein und für sie auf Grund der Feldgesetze *Erhaltungssätze* vom Typus (15) sich ergeben, welche aussagen, daß die zeitliche Zunahme der Feldenergie und des Feldimpulses in einem beliebig abgegrenzten Raumteil  $V$  gedeckt wird durch den Energie- bzw. Impulsfluß, der durch die Oberfläche  $\Omega$  von  $V$  hindurchtritt. (Die Feldgesetze und ebenso die Ausdrücke für Energie und Impuls dürfen nur dort, wo die Feldstärken enorm hohe Werte annehmen, merklich von den Maxwell'schen Ausdrücken abweichen, damit der Anschluß an die Erfahrung gewährleistet ist.)

(Schluß folgt.)

## Über das Vorkommen von Fossilresten.

### Ein Beitrag zur paläobiologischen Terminologie.

VON KURT EHRENBERG, Wien.

Wie jede Wissenschaft, durchläuft auch die Paläobiologie naturgemäß eine gewisse Entwicklung.

In ihren ersten Anfängen noch etwas vor die letzte Jahrhundertwende zurückreichend, bedeutete das Erscheinen von O. ABELS „Grundzügen der Paläobiologie der Wirbeltiere“ im Jahre 1912 ihr Geburtsfest als selbstständige Wissenschaft. War damit das Fundament gelegt, das Gerüst für den weiteren Aufbau gegeben, so bezeichnet das Jahr 1921 mit dem Erscheinen von O. ABELS „Methoden der paläobiologischen Forschung“ einen weiteren Markstein in der Entwicklung unserer Disziplin und diese darf heute wohl im großen und ganzen schon als ein fertiger Bau gelten, wenn auch im einzelnen da und dort noch manches hinzuzufügen ist.

Ein solches Teilgebiet der Paläobiologie, das in diesem Sinne noch einer Ergänzung bedarf, ist jenes, welches die biologischen Fragen des Fossilisationsprozesses, also Erhaltungsmöglichkeiten, Erhaltungszustände, Vorkommen der Fossilreste usw. umfaßt. Gerade hier hat ja O. ABEL, fast völliges Neuland beschreitend, im Jahre 1912 nur an einzelnen Beispielen die Wege aufzeigen können, welche spätere Forschung einzuschlagen hatte. So war es natürlich u. a. auch noch nicht möglich, eine zur Beschreibung aller hier sich ergebender Fälle vollständig ausreichende Terminologie zu geben. Diese konnte nur Hand in Hand mit dem

weiteren Ausbau dieses Teilgebietes geschaffen werden.

So kam es, daß ich bei der Untersuchung des Vorkommens der Fossilreste in der Drachenhöhle bei Mixnitz<sup>1)</sup>, mit welcher mich mein verehrter Lehrer Prof. ABEL, der wissenschaftliche Leiter der Ausgrabungen in jener Höhle, betraute, zur Beschreibung der sich darbietenden Verhältnisse einige neue Termini aufzustellen genötigt war. Dies war der Anlaß, mich mit der Terminologie dieses Teilgebietes überhaupt etwas eingehender zu beschäftigen, ein Studium, dessen Ergebnisse in dieser Arbeit hier niedergelegt erscheinen<sup>2)</sup>.

Schon 1912 (a. a. O.) hat O. ABEL die Bedeutung der Art des Vorkommens der Fossilreste für paläobiologische Untersuchungen hervorgehoben, das „gehäufte Vorkommen“ dem „vereinzelt“ gegenübergestellt und als besondere Art das Vorkommen auf sekundärer Lagerstätte“ von

<sup>1)</sup> Diese Arbeit wird in der in Vorbereitung befindlichen Monographie der Drachenhöhle bei Mixnitz erscheinen.

<sup>2)</sup> Einen weiteren Ausbau erfuhr dieses Gebiet in dem im folgenden zitierten Lehrbuch der Paläozoologie von O. ABEL. Von sonstiger Literatur sei nur noch H. DEECKE, Die Fossilisation, Berlin 1923, genannt. Dort werden allerdings die Fossilreste vorwiegend von anderen, nämlich geologischen bzw. chemisch-physikalischen Gesichtspunkten behandelt. (Dort auch weitere Literatur.)



dem normalen „auf primärer Lagerstätte“ unterschieden.

Die Termini „*vereinzelt*“ und „*gehäuft* Vorkommen“ von Tierresten bedürfen wohl keiner besonderen Definition. Freilich sind auch hier Grenzfälle denkbar, wo es ungewiß erscheinen könnte, ob man von einem vereinzelt oder einem gehäuften Vorkommen sprechen soll. Aber für derartige Grenzfälle nützt ja erfahrungsgemäß keine noch so genaue Definition und in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle dürfte ein Zweifel wohl kaum möglich sein.

Etwas anders steht es mit den Termini „*Vorkommen auf primärer*“ und „*Vorkommen auf sekundärer Lagerstätte*“. Was haben wir hierunter zu verstehen? Wenn auch weder a. a. O. noch im Lehrbuch der Paläozoologie (1920), wo dieser Gegenstand abermals behandelt wird, eine Definition s. s. gegeben wird, so geht doch aus den betreffenden Stellen klar hervor, daß O. ABEL den Terminus „*Vorkommen auf sekundärer Lagerstätte*“ dann zur Anwendung gebracht wissen will, wenn ein Fossilrest nicht nur einmal eingebettet und fossil wurde wie beim „*Vorkommen auf primärer Lagerstätte*“, sondern wenn er nach der ersten Einbettung auswitterte, ausgewaschen usw. und hierauf abermals fossil wurde, und zwar in einer jüngeren Schicht. Letztere Beschränkung wird zwar nicht ausdrücklich erwähnt, darf aber wohl daraus erschlossen werden, daß nur solche Fälle als Beispiele angeführt werden, wo die zweite Einbettung in eine jüngere Schicht als die der ersten erfolgte.

Wie haben wir uns aber zu verhalten, wenn die zweite Einbettung nicht in eine jüngere, sondern noch in eine geologisch gleichalte Schicht erfolgte? Sollen wir auch in diesem Falle von einem Vorkommen auf sekundärer Lagerstätte sprechen?

Vor Beantwortung dieser Fragen müssen wir uns mit folgenden 2 Vorfragen befassen:

1. Ist eine zweite Einbettung in eine geologisch gleichalte Schicht überhaupt möglich? und 2. läßt sie sich, ihre Möglichkeit zugegeben, am fossilen Material beobachten?

Was die erste dieser Vorfragen betrifft, so dürfte selbe m. E. zu bejahen sein. Man braucht da bloß an die Verhältnisse am Meeresstrand zu denken, wie wir sie in der Gegenwart beobachten können.

Wirft dort z. B. eine Woge Muschelschalen, Schneckengehäuse usw. aus und werden diese durch die von jener Woge oder einer der nachfolgenden mitgeführten Sand- und Schlammassen bedeckt, so werden meist bald jene Reste wieder alle oder zum Teil fortgespült, bald aber wieder ausgeworfen und eingebettet und so mag sich dieses Wechselspiel ungezählte Male wiederholen, bis endlich die Einbettung so fest erfolgt, daß die nachfolgenden Wogen die Stücke nicht mehr bloßlegen. Erst jetzt, nach dem Abschluß dieser ersten Phase, können wir — wie wohl nicht näher begründet zu werden braucht — von einer Einbettung im eigentlichen Sinne reden. Nunmehr

mögen durch Wochen, Monate, Jahre unsere Stücke unbewegt und unberührt in ihrer Schicht ruhen, die mittlerweile von weiteren Lagen überdeckt wurde. Bis vielleicht bei einem gewaltigen Sturm, bei einem Seebeben, infolge einer Verlagerung der Strömung die höher gehenden mit größerer Kraft sich am Ufer brechenden Wogen wieder losreißen und mit sich führen, was seit langer Zeit hier abgelagert worden war. Beruhigt sich das Meer dann wieder, so kommen jene losgerissenen Schichtteile und ihr Inhalt wohl näher oder ferner vom ursprünglichen Ablagerungsort zu einer zweiten Einbettung.

Nicht anders — so dürfen wir wohl folgern — wird es in der geologischen Vergangenheit gewesen sein. Läßt sich nun, und damit kommen wir zur zweiten Vorfrage (s. o.), eine solche Umlagerung innerhalb eines geologischen Zeitraumes am fossilen Material nachweisen?

Beschränken wir den Begriff „*geologischer Zeitraum*“ auf die Dauer der Ablagerung einer vollkommen gleichartigen Schicht, so wird eine wiederholte Einbettung innerhalb einer solchen kaum je nachzuweisen sein.

Es ist z. B. für die in der schon erwähnten (s. S.) Drachenhöhle bei Mixnitz vorgefundenen Zahndepots, die oft mehrere hundert Eckzähne vom Höhlenbären beherbergten, keineswegs unwahrscheinlich, daß diese Zähne schon bevor sie in diese Depots gelangten, eingebettet waren. Manchmal mag wohl auch eine wiederholte Umlagerung stattgefunden haben; aber ebensowenig wie für den ersten Fall, läßt sich ein Nachweis hierfür erbringen.

Anders dagegen steht es, wenn die zweite Einbettung nicht in der gleichen, sondern nur in einer äquivalenten, d. i. altersgleichen an irgendeiner anderen Lokalität erfolgte. Wenn z. B. ein Schneckengehäuse zuerst in einer Strandbildung fossil wurde, seine inneren Teile mit dem betreffenden Strandsediment erfüllt wurden, und es innerhalb eines nur geologisch kurzen Zeitraumes wieder aus diesem Sediment befreit und in ein zeitlich äquivalentes neuerlich eingebettet wurde — etwa in weiter Entfernung abermals in ein Strandsediment, oder in eine Ablagerung aus tieferem Wasser —, ohne daß die Ausfüllung der inneren Teile zerstört wurde, dann hätten wir einen Fall vor uns, in dem die zweite Einbettung in eine geologisch gleichalte Schicht nachgewiesen werden könnte. Häufig wird ein solcher Nachweis freilich nicht zu erbringen sein.

Hierher könnte möglicherweise, wie mich O. ABEL aufmerksam machte, das Vorkommen von *Dyrosaurus* in den eocänen Phosphaten von Tunis<sup>1)</sup> gehören. NOPCSA hat nach O. ABEL<sup>2)</sup> aus dem

<sup>1)</sup> A. THEVENIN, Le *Dyrosaurus* des Phosphates de Tunisie. Ann. de Paléont. 6. 1911.

<sup>2)</sup> O. ABEL, Grundzüge der Paläobiologie der Wirbeltiere, S. 64. 1912. — Die Veröffentlichung NOPCSAS in den Cpt. rend. somm. séances, soc. géol. de France, S. 162, 1911 ist mir leider nicht zugänglich gewesen. — Vgl. auch Bull. soc. géol. de France, 4e Serie, 5, 138. 1905.



Umstände, daß die Knochen von *Dyrosaurus* in den Phosphaten in einer Matrix von weißem Kalkmergel liegen, aber auf den Knochen Reste von Phosphatsand erhalten sind, weiter aus dem Anhaften von Fetzen von Phosphatsand an jenen Stellen, wo die Matrix erodiert erscheint, den Schluß gezogen, daß ein Stück weißen Kalkmergels mit dem Skelette in den Phosphatsand gelangt ist. NOPCSA hat gleichzeitig angenommen, daß der Kalkmergel und mit ihm *Dyrosaurus* mesozoischen Alters sei und *Dyrosaurus* somit auf sekundärer Lagerstätte liege. Er hat diese Ansicht auch aufrecht erhalten<sup>1)</sup>, als von THEVENIN *Dyrosaurus* als eocän angesprochen wurde<sup>2)</sup>. Es wäre nun denkbar, daß NOPCSA wie THEVENIN im Rechte wären. Es könnte nämlich wohl, was nach obigem zumindest sehr wahrscheinlich ist, eine Einlagerung stattgefunden haben, aber die erste Einbettung im Kalkmergel wie die zweite im Phosphatsand im Eocän erfolgt sein. Dies müßte freilich erst untersucht werden.

Sollen wir nun im Falle einer zweiten Einbettung von Fossilresten innerhalb einer oder mehrerer geologisch gleichalter<sup>3)</sup> Schichten von einem „Vorkommen auf sekundärer Lagerstätte“ sprechen?

Aus verschiedenen Gründen halte ich letzteres nicht für angezeigt. Einmal bin ich prinzipiell der Anschauung, daß man Termini so wenig als möglich in ihrer Bedeutung verändern soll, weil sonst fast immer Unklarheiten und Verwirrungen entstehen. Ferner glaube ich, daß es praktisch von Wichtigkeit ist, zwischen Umlagerung innerhalb gleichalter und innerhalb verschieden alter Schichten zu unterscheiden. Es wäre also nach wie vor von einem *Vorkommen auf sekundärer Lagerstätte nur dann* zu sprechen, *wenn die zweite Einbettung in eine geologisch jüngere Schicht erfolgte. Für den Fall, daß sich nachweisen ließe, daß die zweite Einbettung in eine geologisch gleichalte Schicht wie die erste erfolgte*, möchte ich — über Anraten O. ABELS — den Ausdruck „isochrone Umlagerung“ in Vorschlag bringen<sup>4)</sup>.

Fossilreste können nicht nur einmal, sondern auch mehrmals umgelagert werden. Erfolgte nun jede Einbettung in eine jeweils jüngere Schicht,

so könnte man in analoger Weise von einem „*Vorkommen auf tertiärer, quartärer Lagerstätte*“ usw. sprechen. Erfolgte dagegen z. B. die zweite Einbettung in eine jüngere Schicht und wurde sodann der betreffende Fossilrest in eine der zweiten altersgleichen Schichten umgelagert, so könnte dies etwa als ein „*Vorkommen auf sekundärer Lagerstätte mit isochroner Umlagerung im zweiten Niveau*“ bezeichnet werden. Auf ähnliche Weise ließen sich dann alle denkbaren Umlagerungen, ihre Nachweisbarkeit vorausgesetzt, verhältnismäßig kurz und, wie ich glaube, eindeutig benennen<sup>1)</sup>.

Neben der Unterscheidung nach der Quantität der jeweils in einem bestimmten Vorkommen auftretenden Fossilreste und nach der Zahl der Einbettungen letzterer, hat uns O. ABEL noch die Unterscheidung gelehrt, ob wir an irgendeinem Fundort nur den *Begräbnisort*, oder auch den *Todesort* oder endlich den *Lebensort* (= Wohnort, Aufenthaltsort) der betreffenden Tiere vor uns haben<sup>2)</sup>. Zur Kennzeichnung eines Vorkommens in dieser Hinsicht reichen nun die angeführten alten wie die eben vorgeschlagenen neuen Termini nicht aus. Denn wurde z. B. irgendein Tierrest durch Wasser oder Wind weithin vertragen, und gelangte er dann erst zur Einbettung, so liegt er, falls er nicht nachträglich umgelagert wurde, zweifellos auf primärer Lagerstätte. Darüber aber, daß er dann entfernt vom Wohnort begraben liegt, sagt uns jedoch diese letztere Feststellung nichts aus. Gerade das ist aber, wie O. ABEL gezeigt hat, für die Beurteilung eines Vorkommens von größter Bedeutung. Ich erinnere nur an Vorkommnisse wie in den oberjurassischen Solnhofener Plattenkalken oder in den Liasbildungen von Holzmaden<sup>3)</sup>. Diese Fälle umfassen ja Beispiele dafür, daß Tierreste weitab vom Wohnort zum ersten Male eingebettet wurden<sup>4)</sup>.

Auch im Känozoikum begegnen wir, keines-

<sup>1)</sup> Zum Beispiel etwa „Vorkommen auf tertiärer Lagerstätte mit zweimaliger isochroner Umlagerung im zweiten Niveau“, oder „Vorkommen auf tertiärer Lagerstätte mit isochroner Umlagerung im ersten und dritten Niveau“ usw.

<sup>2)</sup> O. ABEL, Über die verschiedenen Ursachen des gehäufteten Vorkommens von Tierleichen in Gesteinen. Verhandl. d. k. k. Zool.-Bot. Ges. Wien 62, 57. 1912. (Versamml. d. Sekt. f. Paläontol., 18. Okt. 1911.)

<sup>3)</sup> O. ABEL, Lebensbilder aus der Tierwelt der Vorzeit. Jena 1922.

<sup>4)</sup> Freilich könnte hier z. T. auch eine „isochrone Umlagerung“ (s. o.) stattgefunden haben. Aber z. B. bei den Medusenresten, dem bei ABEL a. a. O. (s. Anm. 5) in Fig. 434 abgebildeten *Trachyteuthis hastiformis* aus Solnhofen wie bei so manchen Stücken aus Holzmaden kann eine „isochrone Umlagerung“ als ausgeschlossen gelten. In anderen Fällen wieder, wo eine solche denkbar wäre, kommt sie wegen der Unmöglichkeit ihres Nachweises praktisch nicht in Betracht. Jedenfalls aber kann es kaum zweifelhaft sein, daß zahlreiche Fossilreste fernab vom Wohnorte der betreffenden Tiere auf primärer Lagerstätte liegen bzw. bis zu ihrer Bergung gelegen sind.

<sup>1)</sup> L. DOLLO, Sur la Découverte de Téléosauriens tertiaires au Congo. Bull. de l'Acad. roy. de Belgique (Classe des sciences) Nr. 7. 1914. — O. ABEL, Stämme der Wirbeltiere. 1919.

<sup>2)</sup> A. THEVENIN, am gleichen Orte wie die von NOPCSA in Anm. 4 zitierte Mitteilung S. 136 u. 160. 1911.

<sup>3)</sup> Absolut genommen wird die Schichtlage der zweiten Einbettung naturgemäß immer etwas jünger sein. Nur ist diese Zeitdifferenz für uns praktisch nicht meßbar.

<sup>4)</sup> Gegebenenfalls könnte man natürlich dann auch von einer zwei-, drei- usw. maligen isochronen Umlagerung sprechen. Der isochronen Umlagerung könnten ferner dann das Vorkommen auf sekundärer, tertiärer usw. Lagerstätte allgemein als „heterochrone Umlagerung“ gegenübergestellt werden.



wegs selten, ganz ähnlichen Verhältnissen. In den Strandbildungen des Miocänmeeres im Wiener Becken, dem Leithakalk, hat man die Reste von Landsäugetieren, von Mastodonten, Hirschen, von großen und kleinen Suiden aufgefunden. Für sie alle bedeutete die Strandregion wohl ebensowenig den Lebensort wie für die Hochseetiere, die Hai-fische und Wale. Sie alle befinden sich aber hier in den Leithakalkbildungen auf primärer Lagerstätte, wurden hier zum erstenmal fossil, sofern nicht etwa eine isochrone Umlagerung vorliegt, was jedoch gewiß nicht als die Regel anzusehen sein wird. Wie alle diese Tiere fernab vom Wohnort zur Einbettung gelangt sein dürften, das hat uns ja O. ABEL vor kurzem so anschaulich geschildert<sup>1</sup>). Ganz analoge Fälle können wir z. B. auch im Plistocän beobachten. So sei nur noch auf das Vorkommen mancher sicher nicht höhlenbewohnender Tiere in den eiszeitlichen Höhlenablagerungen wie etwa in der Drachenhöhle bei Mixnitz in Steiermark u. a. hingewiesen, wo offenbar die Verschleppung durch Raubtiere und durch den Menschen eine Rolle gespielt<sup>2</sup>) und es bewirkt hat, daß die betreffenden Reste fernab vom Wohnort jener Tiere zum ersten Male eingebettet wurden.

Was für Termini sollen wir zur diesbezüglichen Charakterisierung eines Vorkommens zur Anwendung bringen?

Um, was stets unser Bestreben sein sollte, mit möglichst wenigen Termini das Auslangen zu finden und solche zu wählen, die allen denkbaren Fällen gerecht werden können, scheint es angezeigt, zunächst zu erwägen, welche gegenseitigen Kombinationen von Wohn-, Todes- und Begräbnisort überhaupt im Bereiche der Möglichkeit liegen.

Eine derartige Überlegung läßt folgende Kombinationen als möglich erscheinen:

1. Wohnort = Todesort = Begräbnisort;
2. Wohnort = Todesort; Begräbnisort von beiden verschieden;
3. Wohnort verschieden vom Todesort, dieser aber gleich dem Begräbnisort;
4. Wohnort verschieden vom Todesort, beide verschieden vom Begräbnisort;
5. Wohnort = Begräbnisort, Todesort von beiden verschieden.

Sind also diese 5 Fälle als die möglichen Kombinationen anzusehen, so kommt für die Wahl der Termini noch in Betracht, daß diese 5 praktisch keineswegs alle die gleiche Bedeutung besitzen. Da wäre zunächst einmal hervorzuheben, daß Fall 5 in der Praxis kaum in Frage kommen dürfte. Ist ja doch schon die Wahrscheinlichkeit, daß ein Tier fern von seinem Wohnort stirbt und dann doch wieder am Wohnort begraben wird, recht gering, ganz abgesehen von der fast völligen Unmöglich-

keit, einen derartigen Ablauf des Geschehens nachzuweisen. Aber auch bezüglich der Fälle 2—4 wird höchstens ein oder das andere Mal unter ganz besonders günstigen Verhältnissen die Feststellung gelingen, ob der Tod am Wohnort, am Begräbnisort oder an keinem von beiden erfolgt ist. Zieht man ferner noch in Erwägung, daß es für die Beurteilung eines Vorkommens in erster Linie darauf ankommt, ob die Fundstätte auch zugleich der Wohnstätte entspricht, während der Umstand, ob der Tod am Wohnort, am Begräbnisort oder an einer dritten Lokalität (am Transport vom ersteren zum letzteren z. B.) eingetreten ist, hierfür erst in zweiter Linie in Betracht kommt, so tritt bei derartigen Überlegungen der Fall 1 den Fällen 2—4 in gewissem Sinne gegenüber.

Aus diesen Gründen habe ich bei der Beschreibung des Vorkommens der Fossilreste in der Drachenhöhle bei Mixnitz in Steiermark (s. Anm. 1) folgende Termini in Anwendung gebracht, die ich hiermit zum allgemeinen Gebrauche vorschlagen möchte:

In Anlehnung an die in der Geologie gebräuchlichen Bezeichnungen, um Kohlenlagerstätten in ähnlicher Weise zu unterscheiden, habe ich den Fall 1 (Wohnort = Todesort = Begräbnisort) *autochthones*<sup>1</sup>) *Vorkommen* genannt. Ihm habe ich die Fälle 2—4 als *allochthon*<sup>2</sup>) gegenübergestellt. Da weitere Unterscheidungen praktisch nicht in Frage kommen dürften, so dürften diese beiden Termini, derzeit wenigstens, ausreichen. Immerhin könnte, falls sich eine derartige Unterscheidung als wünschenswert bzw. möglich erweisen sollte, auch hierzu von den obigen Termini ausgegangen werden<sup>2</sup>).

Erscheint es also auf diese Weise möglich, jeden Fall eines fossilen Vorkommens bzw. seines Verhaltens im Hinblick auf Wohn-, Todes- und Begräbnisort hinlänglich zu bezeichnen, kann ferner die Lage des Fundortes zum Begräbnisort durch die Termini „Vorkommen auf x ter Lagerstätte“ und „isochrone Umlagerung“ ausreichend gekennzeichnet werden, so glaube ich, daß durch die bisherigen und die hier neu aufgestellten Termini die Terminologie dieses Kapitels der Fossilisation und i. w. S. der Paläobiologie unseren heutigen Kenntnissen derselben gerecht zu werden vermag. Ist dies der Fall, und hat diese Arbeit ein klein wenig dazu beigetragen, so wäre ihr Zweck, wie schon eingangs angedeutet wurde, vollkommen erfüllt.

<sup>1</sup>) Griechisch *αὐτός* (autos) = selbst, derselbe

„ *ἄλλος* (allos) = anders, fremd

„ *χθών* (chthon) = Erde.

<sup>2</sup>) So könnte man etwa Fall 2 als thanato-allochthon (gr. *θάνατος*, thanatos = Tod) bezeichnen, um auszudrücken, daß der Transport ein postmortaler war. Fall 3 ließe sich in analoger Weise als bio-allochthon (gr. *βίος*, bios = Leben) unterscheiden, Fall 4 hol-allochthon (gr. *ἅλος* holos = ganz) nennen, und Fall 5 vielleicht pseud-allochthon (gr. *ψεῦδος* pseudos = Lüge).

<sup>1</sup> O. Abel, Lebensbilder aus der Tierwelt der Vorzeit. Jena 1922.

<sup>2</sup>) Vgl. die in Anm. 1 genannte Arbeit.



## Besprechungen.

### LECAT, MAURICE, *Bibliographie de la Relativité.*

Suivie d'un appendice sur les déterminantes à plus de deux dimensions, le calcul des variations, les séries trigonométriques et l'azéotropisme. Brüssel: Maurice Lamertin 1924. Preis 90 Frs.

Die relativistische Literatur ist allmählich so angeschwollen, daß wohl kaum noch jemand eine Übersicht darüber im Kopfe hat. Deswegen wird dies Lexikon aller einschlägigen Veröffentlichungen gewiß von allen begrüßt werden, die in die Lage kommen, sich in dieser Literatur zurechtfinden zu müssen. Es ordnet die Arbeiten alphabetisch nach den Namen der Verfasser. Freunde und Gegner der Theorie sind unabhängig von der Nationalität gleichmäßig berücksichtigt; desgleichen sind die zugehörigen philosophischen Arbeiten mit aufgenommen. Das Verzeichnis zählt 3266 Veröffentlichungen, abgesehen von den etwa 370 Nummern des Nachtrages. Aus einer Kurve (S. 203) ersieht man die Verteilung der Veröffentlichungen über die 1896–1923. Daß sie im letzten Jahre schon wieder etwas abzufallen scheint, nachdem sie 1922 das Maximum mit 550 Arbeiten

erreicht hat, wird man nicht als Schaden für die Theorie empfinden.

M. v. LAUE, Berlin.

### FREUNDLICH, H., *Grundzüge der Kolloidlehre.*

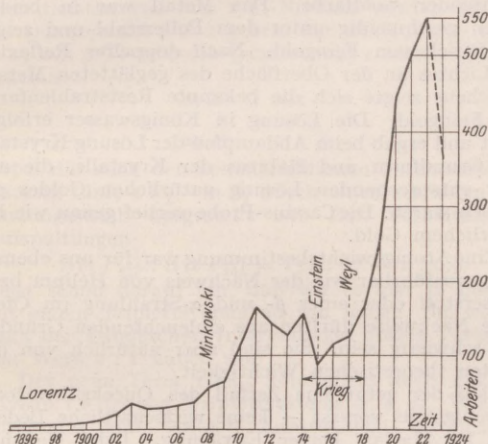
Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1924, 157 S. 14 × 22 cm. Preis 6 Goldmark.

Die zweite Auflage der Capillarchemie H. FREUNDLICH'S bedeutet die kritische Sichtung einer fast unübersehbaren Literaturfülle. Nicht mehr Nomenklaturfragen, nicht allzu enge oder allzu weite Definition beschäftigen den Leser, sondern es ist Naturwissenschaft entstanden, das Geleistete geordnet, die Lücken sichtbar geworden: ein Stück physikalischer Chemie, das der Chemiker kennen, in wesentlichen Teilen aber der Physiker bearbeiten muß, soll es vom Dilettantismus befreit werden.

Die *Grundzüge der Kolloidlehre* bringen die Tatsachen und Begriffe der Kolloidchemie in „einfacher und gemeinverständlicher Weise“. Die Anordnung ist trotz der knappen Fassung der des Hauptwerkes angeleglichen. Der erste Hauptschnitt enthält die physikalisch-chemischen Grundlagen der Kolloidchemie (A. Capillarchemie, die Eigenschaften der Grenzfläche, capillarelektrische Erscheinungen. B. Geschwindigkeit der Bildung einer neuen Phase, Keimbildungs- und Krystallisationsgeschwindigkeit, amorph-fester Zustand. C. Die Brownsche Molekularbewegung). Der zweite Teil behandelt die kolloiddispersen Systeme (A. Die kolloiden Lösungen, Sole, Gele. B. Kolloiddisperse Gebilde anderer Art: Nebel und Rauche, Schäume, Gebilde mit festem Dispersionsmittel und solche mit mehr als 2 Phasen).

Die breite Anlage gestattet, trotz der im einzelnen skizzenhaften Linienführung, Fundament und Oberbau in Zusammenhang und Gliederung klar zu erkennen. Der Leser erblickt ein geschlossenes Ganzes in fester Fügung, so daß die Darstellung zur Läuterung des vielleicht allzu großen Kreises der „Kolloidchemiker“ beitragen wird, aber auch unter den Mißtrauischen zu bekehren vermag. Den größten Nutzen dürfte das Buch unter den Studierenden stiften, denen es bisher an einer exakten Einführung fehlt.

O. HERZOG, Berlin-Dahlem.



## Zuschriften und vorläufige Mitteilungen.

### Der Zerfall des Quecksilberatoms.

(Vorläufige Mitteilung.)

Anfang April dieses Jahres gelang es mir gemeinsam mit meinem Privatassistenten Dr. H. STAMMREICH den Zerfall des Quecksilberatoms zu verwirklichen. Ich spreche ausdrücklich von einem Zerfall, nicht von Abbau oder Zertrümmerung, um nichts über den bis jetzt noch ganz ungeklärten energetischen Verlauf des Vorgangs auszusagen. Der eine Baustein des Quecksilberatoms, Gold, wurde in analytisch nachweisbarer, wägbarer Menge — es handelt sich um Mengen von der Größenordnung eines hundertstels bis eines zehntels Milligramm — erhalten.

Bei der Unwahrscheinlichkeit des Vorgangs nach den jetzigen Vorstellungen mußten wir uns bis heute damit begnügen, die Tatsache selbst über allen Zweifel zu erheben. Die Langwierigkeit der einzelnen Versuche, mangelnde Mittel und Hilfskräfte sind die Ursache, daß wir heute nach 3 Monaten nur eine vorläufige Mitteilung bringen können. Aus begrifflichen Gründen wollen wir diese aber nicht länger zurückhalten.

Die neue Erkenntnis wurde auf folgendem Wege gewonnen.

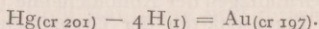
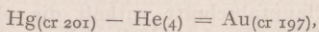
Seit Jahren befaße ich mich mit der Umfärbung bzw. Rückfärbung durchsichtiger Mineralien und Glasflüsse unter der Wirkung ultravioletter bzw. langwelliger Strahlen. Hierbei wurden früher handelsübliche Quecksilberlampen benutzt. Im Juni 1923 lernte ich eine neue Quecksilberlampe des Herrn A. JAENICKE kennen, die einen helleren kontinuierlichen Grund des Spektrums liefert und mir für meine Untersuchungen daher sehr willkommen war. Das Elektrodenmaterial dieser Lampe kommuniziert mit der Luft. Bei näherer Untersuchung der Emission der Jaenicke-Lampe zusammen mit Herrn STAMMREICH im Winter 1924 fanden wir, was auch dem Hersteller der Lampe nicht entgangen war, daß sie bei zu hoher Belastung schnell altert und schwarze Innenbeschläge bildet, so daß die UV-Ausbeute ziemlich schnell zurückgeht. Wir vermuteten, daß das Quecksilber durch die Stromzuführungen (Kohle-Eisen) verunreinigt wurde, und Herr JAENICKE teilte uns mit, daß er beim Destillieren von Quecksilber aus alten Lampen Rück-



stände gefunden habe, deren chemische Natur festzustellen ihm nicht gelungen sei. Herr JAENICKE stellte uns derartige Rückstände für weitere Untersuchungen zur Verfügung und hat uns überhaupt bei unseren Arbeiten in uneigennützigster Weise dankenswert unterstützt.

Bei der Analyse eines Rückstandes von 5 kg Lampenquecksilber — etwa 0,5 g — fanden wir in der amalgamartigen Masse außer zahlreichen anderen Verunreinigungen, die z. T. wohl dem Ausgangsquecksilber angehaftet haben mögen, Gold.

Dieser Befund hätte vor 10 Jahren wohl kaum die Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Es hätte durchaus wahrscheinlich erscheinen müssen, daß das Ausgangsquecksilber — trotzdem es nach JAENICKES Angaben doppelt destilliert worden war — diese seltene Verunreinigung enthalten hatte. Damals war die Möglichkeit einer Umwandlung eines Elementes in ein anderes in die Rumpelkammer menschlicher Irrtümer verwiesen. Heute dürfen wir an dieser Beobachtung nicht achtlos vorübergehen. Man darf ja folgende formale Gleichungen schreiben



Immerhin erschien es nicht unmöglich, daß das Quecksilber, dessen Atomgewicht dem der radioaktiven Substanten so nahe steht, unter bis dahin unbekanntem Bedingungen zum Zerfall zu bringen war. Dagegen sprachen allerdings Auffassungen, die bis jetzt unbestritten geblieben sind. Das geringe Voltgefälle und die aufgewandte Gesamtenergie in einem Quecksilberbogen — etwa 15–20 Vcm bei unserer Anordnung — erschienen vollkommen unzureichend, um den Vorgang auch nur glaubhaft zu machen. Andererseits spricht nichts dagegen, daß das Quecksilber unter geeigneten Versuchsbedingungen aus dem normalen „metastabilen“ Zustand in einen „labilen“ gelangen kann.

Hierüber konnte nur der Versuch entscheiden, und das eindeutige Ergebnis zahlreicher Versuche war: das Quecksilberatom zerfällt. Die gewählte Versuchsanordnung war folgende: Die benutzten Lampen haben das Gemeinsame, daß die Anode, wie vorher ausgeführt, mit der Außenluft kommuniziert; dadurch ist das Potentialgefälle wesentlich festgelegt. Es kann u. a. durch Überdruck gesteigert werden. Die Rohrweite beeinflußt das Potentialgefälle nur unbedeutend. Bei den erfolgreichen Versuchen arbeiteten wir stets mit einer Spannung von etwa 170 Volt an den Elektroden. Die Lampe verbrauchte dabei je nach Versuchsbedingungen 400 bis 2000 Watt. Der Strom wurde 20–200 Stunden eingeschaltet.

Ohne genaueren Untersuchungen vorzugreifen, glauben wir jetzt annehmen zu dürfen, daß die Goldbildung ein gewisses Minimum von Spannung und Potentialgefälle erfordert. Damit steht die Tatsache im Einklang, daß wir in lang benutzten Quecksilberlampen des Handels keine Spur Gold nachweisen konnten. Ebenso müssen wir bis jetzt den negativen Ausfall einiger eigener Versuche im Sinne der Verwendung zu geringer Spannungen und Potentialgefälle deuten. Das Isotopenverhältnis kann hierfür wohl nicht in Betracht kommen.

Bei der prozentual immerhin minimalen Menge des gebildeten Goldes mußten wir — die gewöhnlichen Methoden des Goldnachweises sind nicht besonders sicher und scharf — weitgehende Vorsichtsmaßregeln anwenden, um die Tatsache selbst über allen Zweifel zu erheben. Vestigia terrent.

Daher wurde das Ausgangsquecksilber in ebenso großen Mengen jedesmal den Analysen unterworfen wie das aus dem Versuch zur Verfügung stehende. Selbstverständlich wurde nachgewiesen, daß die Stromzuführungen usw. kein Gold enthielten. Das bei den entscheidenden Versuchen benutzte Quecksilber erwies sich nach Analysen von K. A. HOFMANN übereinstimmend mit dem unserigen als goldfrei. Auch die überaus verfeinerten analytischen Methoden, die HABER ausgebildet hat und die wir durch sein Entgegenkommen bei unserer Arbeit im Ergebnis verwenden durften, konnten kein Gold mit Sicherheit nachweisen. Nach dem Abschluß des Versuchs ergab dies Quecksilber den üblichen Goldgehalt.

Der Goldnachweis selbst, der an dem Rest des im Vakuum abdestillierten Quecksilbers geführt werden konnte, wurde folgendermaßen sichergestellt: Das Metall, das nach Lösen des letzten Quecksilbers in Salpetersäure zurückblieb, war goldgelb, bestand aus einem Agglomerat schön ausgebildeter, spiegelglänziger, würfelförmiger und oktaedrischer Krystalle. Das Metall, welches beim Abdampfen des Quecksilbers bei Rotglut zurückblieb, bestand nach dem Behandeln mit Salpetersäure aus nieren- und traubenförmigen Krusten von leuchtender Goldfarbe. Das Metall war in beiden Fällen geschmeidig unter dem Polierstahl und zeigte den Strich von Feingold. Nach doppelter Reflexion des Lichtes an der Oberfläche des geglätteten Metallhäutchens zeigte sich die bekannte Reststrahlenfarbe von Feingold. Die Lösung in Königswasser erfolgte leicht und ergab beim Abdampfen der Lösung Krystalle von Grundform und Habitus der Krystalle, die aus einer entsprechenden Lösung natürlichen Goldes gewonnen waren. Die Cassius-Probe verlief genau wie bei natürlichem Gold.

Eine Atomgewichtsbestimmung war für uns ebenso wenig ausführbar wie der Nachweis von Helium bzw. Wasserstoff oder einer  $\beta$ - und  $\alpha$ -Strahlung im Ofen. Diese Nachweise dürften aus einleuchtenden Gründen sehr schwierig sein. Sie sind aber natürlich von der größten theoretischen Wichtigkeit.

Daß der gefundene Zerfall des Quecksilberatoms — wenigstens vorerst — keine wirtschaftliche Bedeutung hat, bedarf keiner Erwägung. Jeder Gedanke in dieser Richtung ist zum mindesten kühn.

Eine Reihe von noch vollkommen ungeklärten Erscheinungen, die wir bei unseren Versuchen außerdem beobachteten, werden weiter verfolgt. Wir stehen, das wissen wir schon jetzt, vor einem sehr umfangreichen Tatsachenkomplex. Wir können natürlich nicht die Bitte aussprechen, uns die Weiterverfolgung des Gefundenen allein zu überlassen.

Charlottenburg, Technische Hochschule, Photochemisches Laboratorium, den 4. Juli 1924.

A. MIETHE.

### Über die Seriensysteme des Sauerstoff-Bogenspektrums.

Das Spektrum des Sauerstoffs besitzt, wie von KAYSER und RUNGE nachgewiesen wurde, außer Serien von engen Triplets auch Serien, deren Glieder bei feinerer Beobachtung eine komplexe Struktur zeigen, und die öfters als Dublettserien beschrieben wurden<sup>1)</sup>. Die Terme dieser beiden Seriensysteme seien, wie üblich, durch kleine bzw. große Buchstaben unterschieden.

<sup>1)</sup> Vgl. z. B. PASCHEN-GÖTZE, Seriengesetze. Berlin 1922.



Vor einiger Zeit hat J. J. HOPFIELD<sup>1)</sup> im äußersten Ultraviolett des O-Spektrums neue Triplets gefunden, zwischen deren Komponenten konstante Schwingungsdifferenzen von der Größe 157 und 67 cm<sup>-1</sup> wiederkehrten. Außerdem zeigte sich, daß zwischen den einzelnen Triplets die Differenzen der bekannten Dubletterme  $1S-2S, 2S-3S, \dots 2D-3D, 3D-4D, \dots$  auftraten. Die beobachteten Triplets waren demnach als Kombinationen der Terme  $1S, 2S, \dots 7S$  und  $2D, 3D, \dots 7D$  mit einem neuen, sehr tiefliegenden, dreifachen Term zu deuten, den wir nach dem Auswahlprinzip als  $1P_i$ <sup>2)</sup> schreiben müssen. Zu beachten ist dabei folgendes: Da die Kombinationen  $1P_i-mS$  als Triplets erscheinen, zeigt sich, daß die Terme  $mS, mD$  und  $1P_i$  zu demselben Seriensystem gehören, der neue Term  $1P_i$  also als erstes Glied der Folge  $mP$  aufzufassen ist. Der schon des öfteren angezeifelte<sup>3)</sup> Dublettcharakter der Terme  $S, P, D, \dots$  erweist sich demnach als nicht reell. Wir können nunmehr den Termen  $mS$  und  $mP$  innere Quantenzahlen  $j$  beilegen, deren Absolutwerte sich später bestätigen werden. Da in den Triplets  $1P_i-mS$  die größere Aufspaltung und die stärkere Linie an der kurzwelligen Seite liegen, folgt, daß  $1P$  ein *verkehrter* Term ist. Dem tiefsten von den  $1P_i$ -Niveaus werden wir also die Quantenzahl  $j = 2$  geben, den übrigen  $j = 1$  und  $= 0$ , den  $S$ -Termen die Quantenzahl 1 nach folgendem Schema:

$$\begin{array}{ccc} mS & j = 1 & \\ & \swarrow \searrow & \\ mP & 2 \quad 1 \quad 0 & \end{array}$$

wobei die nach der Sommerfeldschen Intensitätsregel stärkste Linie  $1P_2 - mS_1$  durch einen stärkeren Verbindungsstrich dargestellt ist. Das Verhältnis der Aufspaltungen

$$\Delta(1P_{21}) : \Delta(1P_{10}) = 157 : 67 = 2 : 0,9$$

weist schon darauf hin, daß wir es hier in der Tat mit einem Tripletsystem zu tun haben, für welches nach der Landéschen Intervallregel obiges Verhältnis den Wert 2 : 1 haben soll.

Der neue Term  $1P_{210}$  kombiniert auch mit dem Niveau  $1s$  des sog. Tripletsystems ( $s, p, d$ ). Wie aber HOPFIELD und BIRGE<sup>4)</sup> ausdrücklich hervorheben, ist das Liniengebilde  $1P - 1s$  nur ein *Dublett* mit der Aufspaltung  $\Delta(1P_{21}) = 157 \text{ cm}^{-1}$ ; die Linie  $1P_0 - 1s$  fehlt<sup>5)</sup>. Daraus schließen die genannten

<sup>1)</sup> J. J. HOPFIELD, Nature **112**, 437. 1923; Phys. Rev. **21**, 710. 1923.

<sup>2)</sup> J. J. HOPFIELD und R. T. BIRGE, Nature **112**, 790. 1923 schreiben  $oP_{123}$ .

<sup>3)</sup> A. SOMMERFELD, Atombau und Spektrallinien. 3. Aufl., S. 468; A. FOWLER, Report on Series in Line Spektra, S. 166. London 1922.

<sup>4)</sup> J. HOPFIELD u. R. T. BIRGE, Nature **112**, 790. 1923.

<sup>5)</sup> Wir indizieren entsprechend dem Sommerfeldschen Vorschlage die einzelnen  $1P$ -Niveaus wie die inneren Quantenzahlen. Die Bezeichnung des  $1P$ -Terms ist bei HOPFIELD nicht korrekt (vgl. insbesondere Phys. Rev. **21**, 710. 1923). Im Glauben, daß entsprechend dem üblichen spektroskopischen Gebrauche die einzelnen  $1P$ -Niveaus nach Intensität und Aufspaltung ihrer Kombinationen indiziert würden, hielt ich die obige Kombination für ein Dublett mit der Aufspaltung  $\Delta(1P_{10}) = 67 \text{ cm}^{-1}$ . Eine Nachrechnung der in Nature **112**, 437. 1923 angegebenen Daten sowie die endgültige Publikation HOPFIELDS (Astophys. Journ. **59**, 114. 1924) ergaben den obigen Sachverhalt; damit werden die in Phys. Ber. **5**, 564. 1924 gezogenen Schlüsse natürlich hinfällig.

Autoren, daß das System der Terme  $S, P, D, \dots$  ein Quintettsystem sei. Demgegenüber legen wir hier die Quantenzahlen nach folgendem Schema fest:

$$\begin{array}{ccc} 1P & j = 2 & 1 \quad 0 \\ & \swarrow \searrow & \\ 1s & 2 & \end{array}$$

In der Tat ist dies die einzige mit dem experimentellen Befunde verträgliche Festlegung der inneren Quantenzahlen. Das sog. Tripletsystem ( $s, p, d, \dots$ ) des O ist demnach ein Quintettsystem. Gerade dies ist von PASCHEN und LANDÉ<sup>1)</sup> auf gänzlich anderem Wege gefunden worden, nämlich durch Beobachtung der Zeemaneffekte der Hauptserienglieder  $1s-2p_i$  ( $\lambda 7771$ ) und  $1s-3p_i$  ( $\lambda 3947$ ). Zusammenfassend stellen wir fest: *Das Tripletsystem ( $s, p, d, \dots$ ) des Sauerstoffs ist ein Quintettsystem, das sog. Dublettsystem ( $S, P, D, \dots$ ) ein Tripletsystem.* Das dem O analoge Cr besitzt außer dem Quintett- noch ein *Septettsystem*<sup>2)</sup>. Es scheint, daß in den kleinen Perioden die nach der Spaltennummer möglichen Systeme höchster Vielfachheit nicht oder nur mit geringer Intensität auftreten. So ließ sich im Phosphor<sup>3)</sup> nur das Dublettsystem nachweisen, während das analoge Vanadium sogar Sextetterme<sup>4)</sup> besitzt.

Wenn das  $1P_2$ -Niveau, was sehr wahrscheinlich ist, das Grundniveau des O-Atoms darstellt, so berechnet sich nach SOMMERFELD<sup>5)</sup> die spektroskopische Magnetenzahl aus der Formel  $\mu = 2j_s + j_a$  zu  $\mu = 3$ , während wir in den magnetisch abgeschlossenen kleinen Perioden nach SOMMERFELD Magnetonzahlen erwarten, die sich der Null möglichst nähern. Vielleicht hängt dies mit der Fähigkeit des Sauerstoffs zusammen, paramagnetische Molekeln wie NO und O<sub>2</sub> zu bilden.

München, Institut für theoretische Physik, den 6. Juni 1924.

OTTO LAPORTE.

### Diffusionsvorgänge in der positiven Säule.

Die Theorie der positiven Säule von Glimmstrom- und Bogenentladungen stellt sich zur Zeit als ein recht unzugängliches Gebiet dar. Doch haben neuere Überlegungen (besonders von R. HOLM und R. SEELIGER) die Bedeutung der Elektrizitätsverluste durch Wanddiffusion der Ladungen beider Vorzeichen immer mehr hervortreten lassen. Man kann jetzt mit einiger Sicherheit sagen, daß in nicht verunreinigten Edelgas- und Metall-dampfentladungen, sowie in allen andern Fällen, wo die negativen Ladungsträger ausschließlich die Elektronen sind, die Wiedervereinigung der Teilchen gegenüber der Wanddiffusion in den meisten Fällen praktisch keine Rolle spielt.

Kürzlich wurde von J. LANGMUIR im Laboratorium der Gen. El. Co. und unabhängig von J. v. ISSENDORFF im Prüffeld des Siemens-Schuckert-Dynamowerks gezeigt<sup>6)</sup>, daß die Elektronen in einer Hg-Bogen-Entladung von nicht zu geringem Druck praktisch nach dem Maxwell'schen Geschwindigkeitsgesetz verteilt sind und eine (von der Dampftemperatur völlig ver-

<sup>1)</sup> A. LANDÉ, Zeitschr. f. Phys. **15**, 189. 1923.

<sup>2)</sup> H. GIESELER, Zeitschr. f. Phys. **22**, 228. 1924.

<sup>3)</sup> M. O. SALTMARSH, Phil. Mag. **47**, 874. 1924.

<sup>4)</sup> O. LAPORTE, Naturwiss. **11**, 779. 1923; Phys. Zeitschr. **24**, 510. 1923; W. F. MEGGERS, Journ. Wash. Acad. **14**, 151. 1924.

<sup>5)</sup> A. SOMMERFELD, Zeitschr. f. Phys. **19**, 221. 1923.

<sup>6)</sup> Auch die später genannten Versuche sind durchweg in dem Prüf- und Versuchsfelde des Dynamowerks der SIEMENS-SCHUCKERT A.-G. von Herrn JÜRGEN VON ISSENDORFF ausgeführt worden.



schiedene) „Temperatur“ besitzen, deren Voltäquivalent  $\mathfrak{B}^- = \frac{300 K T^-}{\epsilon}$  zwischen 1 und 2 Volt liegt.

Ferner hat sich die Möglichkeit ergeben, durch Messung der unipolaren Sättigungsströme der positiven Ionen, die man an metallischen Wänden bei negativen Potentialen erhält, einen „Ausbeutefaktor“  $\alpha$  zu bestimmen, der angibt, der wievielte Teil der in der positiven Säule verbrauchten Stromleistung zur Ionisierung und wieviel zu andern Zwecken verwendet wird. Dieser Bruchteil ergibt sich nach J. LANGMUIR zu 40% bis 15% in Abhängigkeit vom Druck, nach unseren wohl bei etwas höheren Drucken angestellten Messungen zu 13%.  $\alpha$  ist als Elementarkonstante zu betrachten.

Auf Grund der genannten beiden Ergebnisse läßt sich nun eine Diffusionstheorie der positiven Säule durchführen, die den Potentialgradienten aus der Rohrweite und gewissen Elementarkonstanten zu berechnen gestattet. Man erhält für den axialen Potentialgradienten  $\frac{\partial V}{\partial z}$  in einer zylindrischen Röhre vom Radius  $R$  folgende Beziehung:

$$\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{2,405}{R} \sqrt{\frac{V_i}{\alpha}} \sqrt{\frac{k^+}{k^-}} \cdot \sqrt{\mathfrak{B}^+ + \mathfrak{B}^-}.$$

Hierbei bedeutet  $V_i$  die Ionisierungsspannung in Volt,  $\mathfrak{B}^+$  das Potentialäquivalent der Temperatur  $T^+$  der positiven Ionen (meist gegen  $\mathfrak{B}^-$  zu vernachlässigen, jedoch auch direkt meßbar) und  $k^+$  sowie  $k^-$  die Beweglichkeiten der Elektronen und positiven Ionen unter den Temperatur- und Druckbedingungen der Entladung.

Es besteht Grund zu der Annahme, daß in dem wesentlichsten für die Glimm- und Bogenentladung in Frage kommenden Strom- und Druckbereich<sup>1)</sup> das ganze bisher vorliegende Beobachtungsmaterial über den Gradienten in der (ungeschichteten) positiven Säule von dieser Formel umfaßt wird. Nur ist es nötig, außer der Variation der Rohrweite noch den Gang der Elementarkonstanten  $\alpha$ ,  $k^+$ ,  $k^-$ ,  $\mathfrak{B}^+$  und  $\mathfrak{B}^-$  mit dem Material des betreffenden Gases, sowie mit seinem Dichte- und Temperaturzustand zu berücksichtigen.

Die Vorstellungen, aus denen die obige Beziehung abgeleitet ist, sind folgende: 1. Die Zahl der positiven und negativen Teilchen ist in allen Entladungen von nicht zu geringer Stromdichte (etwa  $> 10^{-4}$  Amp/qcm) überall außer in unmittelbarer Nähe der Wände und Elektroden praktisch untereinander gleich. 2. Diese Zahl nimmt von der Achse nach der Wand in der Weise ab, daß an der Wand die Dichte praktisch gleich Null gesetzt werden kann. 3. Die seitliche Diffusionsgeschwindigkeit unter der Wirkung des Konzentrationsgefälles ist die der „ambipolaren Diffusion“, wo beide Teilchensorten sowohl unter der Wirkung ihrer spontanen Diffusion wie unter der Wirkung des Feldes wandern, das durch das Voraneilen der beweglicheren Gattung bedingt ist, und das gerade so stark ist, daß beide Teilchensorten mit gleicher Geschwindigkeit wandern. (Bei Elektronen als negativen Trägern wandern die Ionen praktisch nur unter dieser Feldwirkung: erzwungene Diffusion). 4. Die Zahl der in der Entladung durch Ionisierung neu gebildeten Ionen und Elektronen ist proportional der Stromdichte, also proportional der Zahl der Elektronen an der betreffenden Stelle.

1) Nämlich dann, wenn die freie Weglänge der positiven Ionen nur einen Bruchteil des Rohrdurchmessers ausmacht.

Aus diesen Annahmen folgt die obige Formel. Es folgt ferner eine Dichteverteilung der positiven und negativen Teilchen von der Mitte nach dem Rande, die durch die Besselsche Funktion  $J_0(x)$  in dem Bereich zwischen  $x=0$  und ihrem ersten Nullwert,  $x_1 = 2,405$ , gegeben ist. (Verlauf ähnlich wie bei einer Cosinusfunktion zwischen 0 und  $\frac{\pi}{2}$ ). Für den seitlichen Potentialgradienten ergibt sich Proportionalität mit dem Logarithmus dieser Funktion; der Potentialunterschied  $\mathfrak{B}^-$  gegen die Achse wird etwa in einer Entfernung von  $\frac{1}{5}$  Radius von der Wand erreicht, und von da an steigt das Potential rasch zu beträchtlichen negativen Werten.

Für die Existenz eines solchen seitlichen Potentialabfalles liegen experimentelle Hinweise vor in der Krümmung der Schichten der geschichteten positiven Säule sowie in direkten Potentialmessungen von H. SALINGER über radiale Potentialunterschiede in der (geschichteten und ungeschichteten) Entladung (Stickstoff, Argon, Sauerstoff).

Aus einer von uns vorgenommenen experimentellen Bestimmung von  $\alpha$  und  $\mathfrak{B}^-$  sowie dem geschätzten Wert von  $\frac{\partial V}{\partial z}$  ergibt sich aus der obigen Formel für das Verhältnis  $\frac{k^+}{k^-}$  in einer Hg-Entladung von 2 Amp.

Stromstärke und etwa 100  $\mu$  Druck in einem 1,6 cm weiten Zylinder ungefähr der Wert  $\frac{1}{700}$ , im Einklang mit der theoretischen Erwartung. Die Anwendung der Theorie auf die Bestimmung der positiven und negativen Wand-Sättigungsströme gestattet eine neue davon unabhängige Bestimmung dieses Verhältnisses und damit eine weitere Prüfung der Theorie.

In dem Teil der Quecksilberdampfentladung, der von schnellen Dampfströmungen durchzogen ist, haben diese Strömungen unter Umständen einen erheblichen Einfluß auf die Wanddiffusion. Die auffallend hohen Gehäuseströme, die in metallischen Großgleichrichtern beobachtet wurden (bis 90 Amp.), sind auf diesen Effekt zurückzuführen, der sich unter wohldefinierten Verhältnissen ebenfalls theoretisch behandeln läßt und zu einer Bestimmung der (ambipolaren) Diffusionsgeschwindigkeit verwendet werden kann. Derartige Versuche, in provisorischer Form ausgeführt, haben Ergebnisse geliefert, die ebenfalls mit den theoretischen Erwartungen im Einklang sind (Größenordnung  $10^4$  cm/sec in Quecksilberdampf von ca. 100  $\mu$  Druck).

Dagegen spielt bei den beobachteten Wandströmen keine Rolle ein früher vom Verf. zur Erklärung herangezogener Effekt, der auf Auslösung von Sekundärelektronen an der Wand beruht. Diese Tatsache wurde durch ein experimentum crucis erhärtet, nämlich durch Erwärmungsmessungen an einer zylindrischen von der Entladung durchflossenen Sonde, die auf hohes negatives Potential aufgeladen war.

Was endlich die bei höheren Drucken und Rohrweiten eintretende Loslösung der positiven Säule von der Wand, das Zusammenziehen nach der Mitte, betrifft, so wird angenommen, daß dieser Effekt auf Wiedervereinigungen in den kalten und dichten äußeren Gasschichten (anstatt erst an der Wand) beruht. Vermutlich haben hier Verunreinigungen einen starken Einfluß.

Rostock, den 21. Juni 1924.

W. SCHOTTKY.