

## *Ueber Fernwirkungen; von P. Drude.*

(Referat für die 69. Versammlung deutscher Naturforscher und Aerzte in Braunschweig, 1897; Section Physik.)

Inhalt: I. Definition und Auftreten von Fernwirkungen. — II. Die Zurückführung von Fernwirkungen auf Nahwirkungen und umgekehrt. a) Speculative Betrachtungen. b) Mathematische Betrachtungen. — III. Näherer Vergleich der Eigenschaften der electricisch-magnetischen Wirkungen und der Gravitation. — IV. Untersuchungen über die Gültigkeit des Newton'schen Gravitationsgesetzes. a) Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit. b) Die Form des Gesetzes. — V. Bisherige Erklärungsversuche der Gravitation. a) Druckvermittlung. b) Stossvermittlung.

### I. Definition und Auftreten von Fernwirkungen.

Wenn ein Körper *A* eine Wirkung ausübt auf einen räumlich von ihm getrennten Körper *B*, ohne dass andere Körper eine continuirliche materielle Verbindung zwischen *A* und *B* herstellen, so spricht man von einer Fernwirkung zwischen *A* und *B*. Diese Wortdefinition bedarf noch der näheren Ausführung in zweierlei Hinsicht, um eine Sinndefinition zu werden.

Was zunächst den Begriff der „Wirkung“ anbelangt, so kann derselbe enger, als rein mechanischer Begriff, gefasst werden und weiter. — Für die engere Bedeutung ist daran zu erinnern, dass man seit Galilei festgesetzt hat, dass ein Körper einer Wirkung (Kraft) unterliege, wenn er nicht eine nach Grösse und Richtung constante Geschwindigkeit besitzt. Will man daher zur Definition der Fernwirkung in der reinen Mechanik alles Hypothetische vermeiden, was eventuell mit dem Gebrauche des Wortes „Wirkung“ oder „Kraft“ verbunden sein kann, wenn man nämlich darin eine *Ursache* der Bewegung erblickt, und will man nur rein Beobachtbares zur Definition heranziehen, so muss man allein aus den Bewegungen der Körper ein Kriterium für etwaige Fernwirkung construiren. Letzteres ist in verschiedener Weise möglich, am bequemsten so, dass man von einer Fernwirkung zwischen den räum-

lich getrennten Körpern  $A$  und  $B$  spricht, wenn ihre Beschleunigungscomponenten abhängen von der relativen Lage (eventuell auch der relativen Geschwindigkeit) beider Körper zu einander. Der einfachste Fall einer Fernwirkung besteht, wenn nur der relative Abstand der beiden Körper für die Wirkung maassgebend ist. In einigen Fällen hängt sie aber auch von der gegenseitigen Orientirung der Körper ab, selbst wenn ihre Dimensionen sehr klein im Vergleich zu ihrer relativen Entfernung sind, z. B. bei den magnetisirten Körpern. Letztere Fernwirkungen werden oft als *polare* unterschieden von jener ersten Klasse der Fernwirkungen. — Bei Fernwirkungen hängt die Energie des ganzen Systemes ausser von den absoluten Geschwindigkeiten der Körper auch noch von ihrer relativen Lage ab, oder noch allgemeiner ausgedrückt: es kommen in der Energieformel relative Ortsgrössen zwischen distincten Punkten des Raumes vor.

Fasst man den Begriff der Wirkung weiter, als in der reinen Mechanik, so würde man einem Körper  $A$  eine Wirkung auf einen anderen Körper  $B$  zuschreiben, falls bei Vorhandensein oder bei Zustandsänderungen von  $A$  gewisse Zustandsänderungen in  $B$  hervorgerufen werden, die nicht eintreten, falls  $A$  nicht vorhanden ist, oder seinen Zustand nicht ändert. Rechnet man zum Zustand eines Körpers auch seine Bewegung, so umfasst diese weitere Definition der Wirkung auch die rein mechanische Wirkung.

Zweitens möge noch hinsichtlich der Bedeutung des Wortes „continuirliche materielle Verbindung“ darauf hingewiesen werden, dass letztere von zweierlei Art sein kann:

Entweder besteht die materielle Verbindung gleichzeitig, wie es z. B. der Fall ist, wenn zwischen  $A$  und  $B$  ein Seil geknüpft ist, oder  $A$  und  $B$  verschiedene Theile ein und desselben festen oder elastischen Körpers sind, oder wenn  $A$  und  $B$  in irgend eine, sie gemeinsam umspülende Flüssigkeit eintauchen. In diesen Fällen hat die Bewegung oder eventuell auch nur das Vorhandensein von  $A$  Einfluss auf die Bewegung von  $B$ , aber man spricht hier nicht von einer Fernwirkung, sondern von einer durch die materiellen Verbindungsstücke vermittelten Wirkung (infolge der Zugfestigkeit des Seiles, der elastischen Eigenschaften des verbindenden Körpers,

der Incompressibilität oder beschränkten Compressibilität der umspülenden Flüssigkeit).

Oder die materielle Verbindung zwischen  $A$  und  $B$  besteht nicht gleichzeitig, sondern wird durch Bewegung (Stoss) anderer Körper  $C$ ,  $D$  etc. in nacheinander folgenden Zeiten hergestellt. Auch in diesen Fällen kann eine Bewegung, oder auch nur die Existenz von  $A$  die Bewegung des  $B$  beeinflussen; aber auch diese Fälle werden als vermittelte Wirkung von der Fernwirkung unterschieden.

Es mögen die beiden soeben besprochenen Klassen von vermittelten Wirkungen kurz als *Druckvermittlung*, und als *Stossvermittlung* bezeichnet werden. Die Stossvermittlung ist im wesentlichen auch eine Druckvermittlung, allerdings eine solche, bei der der Druck nur in bestimmten Zeitmomenten, nämlich während des Zusammenstosses, wirkt.

Nun giebt es aber viele Fälle, bei denen wohl eine continuirliche materielle Verbindung zwischen den Körpern  $A$  und  $B$  hergestellt ist, und trotzdem nimmt man eine Fernkraft zwischen  $A$  und  $B$  an. Dies tritt dann ein, wenn die materielle Verbindung für die Wirkung zwischen  $A$  und  $B$  ganz gleichgültig, oder höchstens modificirend, aber nicht wesentlich ist. Die Massenattraction, sowie die Kräfte zwischen electricisirten oder magnetisirten Körpern z. B. werden nur modificirt, wenn letztere in irgend welche materielle Flüssigkeiten eingetaucht sind, aber wesentlich ist diese materielle Umgebung der Körper nicht für die Wirkung, da diese ebenfalls, ja sogar kräftiger ohne materielle Umgebung, d. h. im Vacuum, zu Stande kommt. —

Solche Fälle werden also mit Recht zu den eigentlichen Fernwirkungen gerechnet, da sie nicht zum Typus der durch Druck oder Stoss vermittelten Wirkungen gehören. — Oft spricht man aber von *scheinbaren* Fernwirkungen zwischen den Körpern  $A$  und  $B$ , wenn sie nämlich bei materiell continuirlicher Verbindung Kräfte aufeinander äussern, die nur von der relativen Lage (bez. Geschwindigkeit) der beiden Körper  $A$ ,  $B$  abhängen, für deren Zustandekommen aber die materielle Verbindung nothwendig ist. Dies tritt z. B. ein bei der Bewegung zweier Körper, die von einer Flüssigkeit umspült sind. Der Fall zweier pulsirender Kugeln in einer incompressibelen Flüssigkeit ist besonders

bekannt als der Typus einer scheinbaren Fernkraft zwischen den Kugeln; aber mit Recht wird man hier das Wort „scheinbar“ hinzusetzen, weil die Wirkung durch Druckvermittlung zu Stande kommt, und ohne die Anwesenheit einer umspülenden Flüssigkeit pulsirende Kugeln gar keine Wirkung aufeinander äussern würden, wenn man absieht von der meist unmerkbar kleinen Massenattraction. Auch die durch capillare Kräfte beeinflussten Bewegungen zweier Körper, die in einer Flüssigkeit eintauchen, gehören zu den scheinbaren Fernwirkungen. — In allen diesen Fällen kann man auch die Energieformel so umgestalten, dass in ihr die relative Lage der Körper vorkommt.

Nach diesen Erörterungen wird sich in den einzelnen Fällen meist leicht entscheiden lassen, wann wir die Erscheinungen als Fernwirkungen, und wann als vermittelte oder Nahwirkungen zu bezeichnen haben.

Fernwirkungen sind

a) in rein mechanischer Hinsicht (ponderomotorisch): die Massenattraction,

die Kräfte zwischen electrisirten Körpern,

„ „ „ magnetisirten „

„ electromagnetischen Wirkungen,

„ electrodynamischen „

b) in allgemeinerer Hinsicht (Wirkung auf Zustandsänderungen):

Die Erscheinungen der inducirten electrischen Ströme (insofern die Stromstärke, die in einem Körper fliesst, für seinen Zustand ebenfalls charakteristisch ist).

Alle Strahlungserscheinungen (insofern z. B. die Temperatur oder chemische Beschaffenheit sich durch Bestrahlung ändern kann).

Nahwirkungen sind u. a.:

die Erscheinungen der Elasticität,

„ „ des Stosses,

„ „ der Hydro- und Aeromechanik,

„ „ Capillarität,

„ „ Wärmeleitung

„ „ electrischen Leitung,

- die electriche Potentialdifferenz beim Contact verschiedener Körper,  
 „ electrolytischen Erscheinungen,  
 „ chemischen Reactionen,  
 „ Aenderungen des Aggregatzustandes.

Man kann den Unterschied der Ferne- und Nahewirkungen dadurch kurz charakterisiren, dass man sagt, erstere pflanzen sich auch im Vacuum fort, letztere nur in der Materie. Es kann ja nun allerdings eine Verbindung von beiden verschiedenen Fortpflanzungsarten bei derselben Erscheinung vorkommen. So pflanzt sich nach den Anschauungen, die Poynting<sup>1)</sup> ausgebildet hat, längs eines von einem electricen Strome durchflossenen Drahtes die Energie in seiner Umgebung (Vacuum) fort, während der Draht nur dazu dient, die in der Umgebung fließende Energie in Wärme zu verwandeln. Da aber der materielle Draht wesentlich zum Zustandekommen der Erscheinung ist, so rechne ich diesen Fall zu den vermittelten oder Nahewirkungen.

Bei allen unter den Nahewirkungen angeführten Erscheinungen, z. B. auch bei chemischen Reactionen sind scheinbare Fernwirkungen (durch eine von gewissen Stellen des Raumes sich ausbreitende Zustandsänderung des materiellen Trägers der Erscheinungen) wohl denkbar, wie z. B. Liesegang<sup>2)</sup> eine scheinbare chemische Fernwirkung bei der Diffusion von Silbernitrat in kochsalzhaltiger Gallerte beschreibt. Nach den von Liebreich<sup>3)</sup> gefundenen Erscheinungen des todtten Raumes bei Reactionen könnte man vielleicht denken an eine, allerdings noch sehr wenig verständliche scheinbare Fernwirkung der Oberfläche einer Flüssigkeit, die sie mit der Luft oder der Gefäßwandung bildet. Indess ist die Erscheinung jetzt wohl ihres Mystischen entkleidet, seitdem sie sich durch die Untersuchungen Budde's<sup>4)</sup> durch Verdunstung des Reac-

1) J. H. Poynting, Philos. Transact. 2. p. 343. 1834.

2) R. E. Liesegang, „Chemische Fernwirkung“. Düsseldorf 1896. Wied. Beibl. p. 189. 1897.

3) O. Liebreich, Berl. Ber. p. 959. 1886; p. 169. 1889; p. 1239. 1890; Ztschr. f. physik. Chem. 5. p. 529. 1890.

4) E. Budde, Ztschr. f. physik. Chem. 7. p. 586. 1891; Wied. Ann. 46. p. 173. 1892.

tionsproductes (Chloroform) erklärt, die natürlich in und dicht unter der freien Oberfläche der Flüssigkeit am stärksten ist.

## II. Die Zurückführung von Fernwirkungen auf Nahwirkungen und umgekehrt.

a) *Speculative Betrachtungen.* Man findet meist die Ansicht ausgesprochen, dass reine Fernwirkungen etwas für den menschlichen Verstand unfassbares seien, und man hat sich deshalb vielfach bestrebt, alle Fernwirkungen als nur scheinbare hinzustellen und sie auf Nahwirkungen zurückzuführen, entweder durch die Hypothese der Druckvermittlung, oder der Stossvermittlung. Diese rein speculative Betrachtung muss als eine nothwendige erscheinen, sowie man durch die Erfahrung zu der Annahme genöthigt wird, dass gewisse Zustandsänderungen der Materie auch irgend welche Aenderungen im Zustande des umgebenden Vacuums herbeiführen müssen. Dies ist z. B., wie im III. Abschnitt näher ausgeführt werden soll, bei den electricischen Wirkungen der Fall.

Da es nun aber bei den reinen Fernwirkungen an einem materiellen Verbindungsgliede zwischen den aufeinander wirkenden Körpern fehlt, so hat man sich genöthigt gesehen, um dem leeren Raume die Vermittlerrolle zuweisen zu können, ihn mit gewissen physikalischen Eigenschaften auszustatten. Um dieses besser zu motiviren, macht man dann die Hypothese, dass der Raum nie wirklich leer sei, sondern dass er mit einem feinen Stoffe, der nicht der Gravitationswirkung unterliegt (der imponderabel ist), dem sogenannten *Aether*, stets angefüllt sei.

Es sind nun zwei Standpunkte zu unterscheiden: entweder legt man dem Aether, abgesehen von der Imponderabilität, qualitativ die gleichen Eigenschaften bei, die man direct an der ponderabeln Materie beobachtet, fasst ihn also als feinen elastischen, oder flüssigen Stoff auf, der (bei der Druckvermittlungshypothese) continuirlich oder (bei der Stossvermittlungshypothese) discontinuirlich vertheilt ist, oder man legt dem Aether wesentlich andere Eigenschaften, als der Materie bei, die lediglich zweckmässig so gewählt sind, um die thatsächlich beobachteten Fernwirkungen als nur scheinbare aus den Nahwirkungen deduciren zu können.

Der erste Standpunkt wird als befriedigender gelten, weil er eine einheitlichere Anschauung für die Gesammtheit der Erscheinungen schafft, indess ist auch von jenem zweiten Standpunkte aus die Construction einer einheitlichen Anschauung nicht von vornherein ausgeschlossen, wenn man nämlich die specifischen materiellen Eigenschaften, z. B. Cohäsion, Elasticität, Gravitation auf die Eigenschaften des Aethers zurückführt. Letzteres muss als ebenso berechtigt erscheinen, als der umgekehrte Weg, d. h. um sich concret auszudrücken: die Zurückführung der electricischen Wirkungen auf die Gesetze der Mechanik kann nicht a priori für befriedigender gelten, als der umgekehrte Weg, die specifischen Eigenschaften der Materie aus den Eigenschaften des Aethers abzuleiten.

Jedenfalls ist es als wünschenswerthes Ziel zu bezeichnen, wenn man zur Zurückführung der verschiedenen Fernwirkungen auf Nahwirkungen nur einerlei Art Aether gebraucht. Man könnte dann die Vorstellung der Anfüllung des leeren Raumes mit einem feinen Stoffe vermeiden, die zu Schwierigkeiten führt, wenn man z. B. an die Allgegenwart des Aethers, auch in der Materie, denkt. Man könnte nämlich sagen: der Raum hat stets gewisse physikalische Eigenschaften, die in den von Materie besetzten Stellen modificirt sind. Diesem Ziele des einheitlichen Aethers hat man sich bedeutend genähert, als durch die von Faraday wohl zuerst ausgesprochene und besonders von Maxwell mathematisch verfolgte Idee der electromagnetischen Lichttheorie der sogenannte Lichtäther als identisch hingestellt wurde mit dem Aether, der die electricischen und magnetischen Wirkungen vermittelt.

Indess, wie im V. Abschnitt besprochen werden soll, kann man noch nicht behaupten, dass die Zurückführung der Massenattraction auf die Nahwirkung desselben Aethers gelungen sei. Wenn überhaupt bei der Massenattraction eine Reduction auf Nahwirkung theilweise gelungen ist, so sind es jedenfalls andere Eigenschaften, die dem Vermittler hier beigelegt werden, als dem Lichtäther.

Von den oben angeführten eigentlichen Fernwirkungen wurden die Strahlungserscheinungen (zunächst nur die des Lichtes) zuerst als vermittelte Wirkungen aufgefasst, denn sowohl die Newton'sche Emissionstheorie, als die Huygens'-

sche Undulationstheorie benutzen vermittelte Wirkungen, ersterer die Stoss-, letzterer die Druckvermittlung. Bei den Strahlungserscheinungen muss die Zurückführung auf Nahewirkungen nothwendig erscheinen wegen ihrer endlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Es erfordert in der That das Princip der Erhaltung der Energie, dass man auch für die Zeit, während der die Leuchtenergie eines momentan aufleuchtenden Körpers  $A$  denselben verlassen, aber einen anderen Körper  $B$  noch nicht erreicht hat, einen Träger, einen Sitz der Energie angeben kann. Bei Strahlung durch den leeren Raum muss also letzterer Träger von Leuchtenergie sein können, man muss also eine Beeinflussung des leeren Raumes durch einen leuchtenden Körper annehmen.

Anders steht die Sache bei der Massengravitation. Für sie ist bisher nicht mit Sicherheit eine endliche Fortpflanzungsgeschwindigkeit nachgewiesen worden (vgl. weiter unten den IV. Abschnitt) und die Meinung, ob man überhaupt jede Fernwirkung, speciell besonders die Gravitation, auf Nahewirkungen zurückführen soll, ist nicht eine allgemein adoptirte.

Was zunächst die Stellung von Newton selber anbelangt, so sind seine Publicationen und Briefe sowohl von den Anhängern der directen Fernwirkung, als auch von den Anhängern der vermittelten Wirkung in ihrem Sinne ausgelegt worden.<sup>1)</sup> Die Ansicht, dass Newton ein Verfechter der unvermittelten Fernkraft gewesen sei, ist jedenfalls durch die Neuherausgabe seiner „Principien der Naturlehre“ durch Cotes veranlasst. Als zweifelhaft kann angesehen werden, ob Newton sich ganz im Einverständniss mit Cotes befand oder nicht. Mir scheint wahrscheinlich, dass Newton die ganze Fragestellung nicht

---

1) Man vgl. hierüber F. Rosenberger, „Isaac Newton und seine physikalischen Principien“, Leipzig 1895. C. Isenkrahe, „Isaac Newton und die Gegner seiner Gravitationstheorie unter den modernen Naturphilosophen“, Progr. d. Gymn. in Crefeld 1878. „Das Räthsel der Schwerkraft“, Braunschweig 1879.

Es interessirt natürlich nur historisch, ob Newton ein Verfechter der unvermittelten Fernkraft gewesen ist oder nicht. Denn seine Autorität als bestärkenden Grund für oder gegen die Annahme von Fernkräften zu benutzen, ist bei der Methode der exacten Wissenschaften unzulässig.

von actualer Bedeutung erschienen ist, da es ihm vor allem auf Darstellung beobachtbarer Erscheinungen ankam. So sagt er in seinen Principien:

„Ich habe noch nicht dahin gelangen können, aus den Erscheinungen den Grund der Eigenschaften der Schwere abzuleiten und Hypothesen erdenke ich nicht.“

Im Sinne einer Vermittelung durch ein geistiges Agens sprechen die Worte, welche Newton am Schlusse seines Werkes ausspricht.

„Es würde hier der Ort sein, etwas über die geistige Substanz hinzuzufügen, welche alle festen Körper durchdringt und in ihnen enthalten ist. Durch die Kraft und Thätigkeit dieser geistigen Substanz ziehen sich die Theilchen der Körper wechselseitig an . . . . Aber es sind noch nicht genug Versuche angestellt, um die Gesetze, nach denen diese geistige Substanz wirkt, bestimmen zu können.“

In sehr verschiedener Weise sind die Worte interpretirt worden, welche Newton an Bentley schreibt:

„Dass die Gravitation der Materie wesentlich, inhärent und anerschaffen sein sollte, sodass ein Körper auf einen anderen wirken könnte auf die Entfernung hin durch den leeren Raum, ohne die Vermittelung von irgend Etwas, durch welches ihre Action und Kraft von einem zum anderen geleitet werden könnte, das ist nach meinem Dafürhalten eine so grosse Absurdität, dass ich glaube, kein Mensch, welcher in philosophischen Dingen eine genügende Denkfähigkeit hat, kann jemals darauf verfallen. Die Gravitation muss durch ein Agens, welches konstant nach gewissen Gesetzen wirkt, verursacht sein; ob aber dieses Agens materiell oder immateriell ist, habe ich der Ueberlegung meiner Leser überlassen.“

Nach diesen Worten scheint Newton eine unvermittelte Fernwirkung ausgeschlossen zu haben, man muss aber wohl Zöllner<sup>1)</sup> Recht geben, wenn man aus dem Zusammenhange, in welchem jener Brief an Bentley mit religiösen Fragen steht<sup>2)</sup>, als wahre Meinung Newton's die Unterlegung einer transcendentalen Ursache für die Fernwirkung ansieht. Dann

1) Zöllner, Wissensch. Abhandl. 1. p. 16.

2) Bentley sah in der unmittelbaren Gravitation den Beweis, „dass ein immaterieller lebender Geist die todte Materie lenkt.“

würde aber allerdings Newton sich wesentlich unterscheiden von denjenigen, die die Fernwirkung auf nicht transcendente Nahekräfte zurückführen wollen.

Zöllner steht auf dem Standpunkt der reinen Fernwirkung; nach ihm besteht die Materie aus positiven, mit Lust und Unlust begabten Atomen, die nach dem Weber'schen electrischen Grundgesetz aufeinander wirken. Die attractiven Kräfte sollen die repulsiven äusserst wenig übertreffen, so wenig, dass durch die feinsten electrostatischen Versuche der Unterschied unmerkbar ist. Bei Anhäufung einer genügend grossen Anzahl electrisch geladener Atome in der Materie kann man dann trotzdem die Gravitation in der, der Erfahrung entsprechenden Intensität construiren. Für die Art und Weise der Zöllner'schen Deduction ist charakteristisch, wie er gegen den Satz zu Felde zieht: *Corpus ibi agere non potest, ubi non est*, der die Unbegreiflichkeit der unvermittelten Fernkraft ausdrückt. Zöllner sagt: „Wo *ist* ein Körper? Da, wo er wirkt. Der Mond existirt also an der Erdoberfläche, da dort seine Wirkungen wahrnehmbar sind.“ Durch eine derartige Deduction wird in der That der Unterschied zwischen Fernkräften und Nahekräften völlig verwischt, es würde aber dann auf die Frage herauslaufen, weshalb nehmen wir mit Hülfe anderer Eigenschaften, z. B. der Undurchdringlichkeit mit Hilfe des Tastgefühls, ganz andere, und zwar bestimmte Grenzen der materiellen Körper wahr, während sie vermöge ihrer Gravitationseigenschaft völlig unbegrenzt und völlig gegenseitig durchdringlich sind. Mit der Art sophistischen Kampfmitteln wird die bestehende Schwierigkeit nicht überwunden.

Die Idee der Zurückführung der Fernkräfte auf Nahekräfte hat besonders wieder neue Bestärkung erfahren, seit durch Faraday und Maxwell dieses für die electrischen und magnetischen Wirkungen mit glänzendem Erfolge durchgeführt war. So finden sich besonders in England begeisterte Anhänger für diese Idee, zu denen wir auch z. B. William Thomson zählen müssen. Indess sind selbst in England die Wogen des Kampfes oft hochgegangen, wie eine lebhafte Discussion beweist zwischen Browne<sup>1)</sup> einerseits, für den die

1) W. R. Browne, Phil. Mag. (5) 10. p. 437. 1880; 11. p. 129, 379. 1881. Dort nennt Browne auch Cayley als einen Anhänger seiner

Nahekräfte nicht begreiflicher als die Fernkräfte sind, und Lodge, Preston und Allen<sup>1)</sup> andererseits, die letztere verwerfen.

In Deutschland haben die hervorragenden Vertreter der Physik ihre Ansichten über Betrachtungen rein speculativer Natur wohl nur selten geäußert. Offen spricht sich E. du Bois-Reymond in seiner Rede „Ueber die Grenzen des Naturerkennens“ aus, indem er sagt: „Durch den leeren Raum in die Ferne wirkenden Kräfte sind an sich unbegreiflich, ja widersinnig.“

Gegen die Möglichkeit der Zurückführung der Fernwirkungen auf Nahwirkungen ist oft angeführt worden, dass selbst die typischen Nahwirkungen, wie der Stoss zweier verschiedener Körper oder die elastischen Eigenschaften eines Körpers, wenn man sie genügend scharf analysirt, eigentlich selbst Fernwirkungen, allerdings nur in minimalen Distanzen sind. So wird eine wirkliche Berührung zweier materieller Körper, z. B. beim Stoss, nie erreicht, wie man optisch an dem Berührungsfleck zweier Newton'scher Farbengläser nachweisen kann, und um sich eine Vorstellung von den Gestaltsänderungen elastischer Körper machen zu können, muss man letztere aus materiellen Punkten aufgebaut denken, die gewisse relative Abstände besitzen. Man würde daher die eigentlichen Fernwirkungen, wie z. B. die Gravitation, nur durch eine Kette von Wirkungen in kleineren Entfernungen ersetzen, wenn man sie z. B. auf Druckvermittlung elastischer Körper zurückführt.<sup>2)</sup>

Dieser Ansicht gegenüber ist zu bemerken, dass ein wirklicher continuirlicher Zusammenhang zweier verschiedener Körper bei der Berührung oder zweier Theile ein und desselben Körpers trotz etwaiger Molecularstructur desselben wohl als bestehend gedacht werden kann durch Einführung des Be-

---

Ansicht, indem er aus einem Briefe citirt, in welchem Cayley schreibt: „Ich bin immer der Ansicht gewesen, dass die Wirkung zweier Körper durch die Ferne keine grösseren Schwierigkeiten darbietet, als die Wirkung zweier Körper bei der Berührung.“

1) O. Lodge, *Phil. Mag.* (5) 11. p. 36. 220. 1881; S. T. Preston, *l. c.* p. 38; A. J. C. Allen, *l. c.* p. 74.

2) So schliesst auch P. du Bois-Reymond in *Naturw. Rdsch.* ? p. 169. 1888.

griffes des Aethers. Die Thatsachen der Chemie, der Electrolyse, sowie die Dispensionserscheinungen des Lichtes lassen sich allerdings am bequemsten und einheitlichsten so beschreiben, dass man einen materiellen Körper als aus molecularen Inhomogenitäten bestehend auffasst, nichts nöthigt aber dazu, dass diese molecularen Gebilde wirkliche Fernkräfte (in molecularen Distanzen) aufeinander äussern. Man kann z. B. denken, dass diese Molecularkräfte electricischer Natur sind<sup>1)</sup>, und diese würden sich dann durch Nahwirkungen durch den Aether hindurch von Molecül zu Molecül fortpflanzen können, wie man es nach Maxwell für die electricischen Wirkungen zweier räumlich weit voneinander getrennten Körper annimmt.

Von vornherein muss aber anerkannt werden, dass, wenn man von speculativen Betrachtungen über die Schwierigkeit im Verständniss von Fernwirkungen absieht, der umgekehrte Weg, nämlich alle Wirkungen, auch die scheinbaren Nahwirkungen, als Fernwirkungen aufzufassen, zur einheitlichen Darstellung sämmtlicher Erscheinungen wohl zu versuchen ist.

Dieser Versuch ist, besonders seit dem Auftreten Newton's, zur Erklärung der elastischen und optischen Eigenschaften, sowie derer der Capillarität mehrfach gemacht worden. Ich nenne hier Navier, Poisson, Cauchy, Laplace, Gauss, Franz Neumann.

Bemerkenswerth ist, dass auch Faraday, der die Nahwirkungen in der Electricität einführte, zu den Anhängern der Fernwirkung hinsichtlich seiner Anschauung über die Constitution der Materie zu zählen ist. In seiner Arbeit: „A Speculation on the Nature of Matter“ (1844) schliesst er sich der Boscovich'schen<sup>2)</sup> Theorie an, nach der die Materie aus punktförmigen Fernkraftcentren bestehen sollte.

1) Ein bemerkenswerther Versuch, die Molecularkräfte und die elastischen Eigenschaften in dieser Weise der Rechnung zu unterwerfen, ist von B. Galitzin „Ueber die Molecularkräfte und die Elasticität der Molecüle“ (Bullet. de l'Acad. Impér. de Sc. de St. Petersb. (5) 3. 1895.) gemacht worden. Die Molecüle werden dabei als electromagnetische Resonatoren aufgefasst. Die Gravitation hat der Verf. aus seinem Ansatz allerdings nicht abgeleitet.

2) Philosoph. natur. theoria redacta ad unic. leg. virium in nat. exist. 1758.

Seit dem glänzenden Erfolge, den das Newton'sche Gravitationsgesetz zur Beschreibung der Himmelsmechanik zu verzeichnen hatte, war es leicht verständlich, dass man einen dem Newton'schen ähnlichen Formalismus auch auf andere Disciplinen anwandte. Es ist aber dieses nur als ein Versuch anzusehen, um die Erscheinungswelt mathematisch darzustellen, den Stempel höherer Exactheit und Strenge trägt er nicht mehr und nicht weniger an sich, als der Versuch, die Erscheinungen durch Nahwirkungsgesetze zu beschreiben. Wenn man von philosophischen Speculationen absieht, so wird allein der Erfolg in der Darstellung des Beobachtbaren entscheiden, welcher Weg als der vortheilhaftere erscheint. Der Erfolg spricht aber bei diesen Gebieten gegen Einführung dieser molecularen Fernkräfte. Es ist bekannt, mit welchen Schwierigkeiten und umständlichen Rechnungen Cauchy und Neumann zu kämpfen hatten, um aus ihren Fernkräften die optischen Eigenschaften isotroper und krystallisirter Körper abzuleiten; in der Elasticitätstheorie führt ausserdem jener Ansatz zu directem Widerspruch mit der Erfahrung, insofern für einen isotropen Körper die sogenannte Poisson'sche Relation zwischen den beiden Elasticitätsconstanten bestehen müsste, was aber im allgemeinen nicht der Beobachtung entspricht. Erst durch Einführung polarer Fernkräfte (s. oben p. II) kann man nach Voigt<sup>1)</sup> diese Schwierigkeit heben.

Diese Complicationen werden vermieden, wenn man die elastischen Erscheinungen als Nahwirkungen darstellt, denen zufolge die Gestalt eines Volumenelementes abhängt allein von den auf dasselbe Element ausgeübten Drucken. — Die Optik erfährt eine widerspruchsfreie Darstellung, indem man auf sie die Nahwirkungsgesetze des electromagnetischen Feldes anwendet.

In der Capillaritätstheorie führt zwar die Einführung molecularer Fernkräfte nicht zu Widersprüchen mit der Erfahrung, ihre Einführung erscheint aber als keine nothwendige und durch Experimente direct geforderte. Die Capillaritätserscheinungen werden viel einfacher und directer aus der Er-

---

1) W. Voigt, Abhandl. d. königl. Ges. d. Wiss. zu Göttingen 34. p. 52. 1887.

fahrung abgeleitet, wenn man das einzige Nahwirkungsgesetz benutzt, dass zur Vergrößerung der Oberfläche einer Flüssigkeit, sei sie nun die Grenzfläche gegen das Vacuum, ein Gas, einen festen Körper, oder gegen eine andere Flüssigkeit, ein positiver oder negativer Arbeitsaufwand erforderlich ist. Um dieses Gesetz aus einer tieferen Ursache abzuleiten, sind nicht etwa doch moleculare Fernkräfte der einzelnen Flüssigkeitsmolecüle nothwendig, es genügt schon die Annahme, dass ein in der Oberfläche liegendes Flüssigkeitstheilchen sich in einem anderen Zustande befindet, als wenn es in das Innere geführt ist; man kann z. B. nach Stefan<sup>1)</sup>, wie in dem Bilde der chemischen Affinitätskräfte, an eine Beeinflussung der einander berührenden Molecüle bez. Atome denken: um ein Molecül aus dem Inneren an die Oberfläche zu bringen, sind die halbe Anzahl der Bindungen mit den Nachbarmolecülen zu lösen. Jedenfalls sind Fernwirkungen in kleinen Distanzen nach den bisherigen Erfahrungsthatfachen keine nothwendige Vorstellung.

Andererseits kann man aber im Gebiete der Gravitation keinen Vortheil der Darstellung vermittelt Nahwirkungen vor der Idee der unvermittelten Fernwirkung constatiren. Es soll dies im Abschnitt V noch näher beleuchtet werden.

b) *Mathematische Betrachtungen.* Es soll jetzt näher besprochen werden, inwiefern sich der mathematische Ausgangspunkt zur Berechnung der in der Natur vorkommenden Erscheinungen unterscheidet, je nachdem man denselben Fernkräfte oder Nahkräfte unterlegt.

Nach dem Standpunkt der Fernkräfte steht eine Zustandsgröße  $\mathfrak{S}_1$  (z. B. die Beschleunigung) an irgend einer Stelle  $P$  des Raumes in einer mathematisch zu formulirenden Abhängigkeit von einer gleichartigen oder anderen Zustandsgrößen  $\mathfrak{S}_2, \mathfrak{S}_3 \dots$  an einer oder mehreren *anderen* Stellen  $P_1, P_2 \dots$  des Raumes; wenn man dagegen die Existenz der Nahwirkungen mathematisch ausdrücken will, so muss man nach Beziehungen suchen, denen zufolge der Werth des Zustandes  $\mathfrak{S}_1$  an der Stelle  $P$  nur abhängt von dem Werthe der Zustände  $\mathfrak{S}_2, \mathfrak{S}_3 \dots$  an *derselben* Stelle  $P$  des Raumes.

---

1) J. Stefan, Wied. Ann. 29. 663. 1886.

Formell kann man eine Erscheinung auf Nahwirkungen zurückgeführt ansehen, wenn man als hinreichenden Ausgangspunkt zu ihrer völligen Berechnung eine Differentialgleichung oder ein System von simultanen Differentialgleichungen aufgestellt hat. Denn die dort auftretenden verschiedenen Differentialquotienten sind als gewisse Zustandsgrößen  $\mathfrak{S}_1, \mathfrak{S}_2, \mathfrak{S}_3 \dots$  aufzufassen, welche sich alle auf dieselbe Stelle des Raumes beziehen. Die Integration solcher Differentialgleichungen ergibt dagegen allemal Beziehungen zwischen distincten Punkten des Raumes, und diese Integrale wären die Fernkraftgesetze für das betreffende Erscheinungsgebiet, wenn man sie von vornherein zum Ausgangspunkt der Rechnung gewählt hätte. So sind z. B. die nach dem Newton'schen Gesetz wirkenden Centralkräfte das Integral des Nahwirkungsgesetzes:

$$\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} = 4\pi \rho,$$

wo  $X, Y, Z$  die Kraftcomponenten,  $\rho$  die (electriche, magnetische, materielle) Dichtigkeit bedeuten.

Hiernach würde es in rein praktischer Hinsicht als eine unnöthige Complication erscheinen, wenn man von den Nahwirkungsgesetzen ausgeht, da die Fernkraftgesetze uns die Integrale geben und die Rechnung bequemer direct an letztere anknüpft. Diese Bemerkung ist gewiss auch richtig im Gebiete der Gravitation, im Gebiete der electriche und magnetischen Wirkungen trifft es aber nicht zu in den Fällen, in welchen der Raum nicht von einerlei homogener Substanz (oder Aether) überall angefüllt ist. Es treten nämlich bei nicht homogener Raumanfüllung bedeutende Complicationen der Fernkraftgesetze auf, wenn die Fernkraft zwischen zwei Körpern  $A$  und  $B$  in ihrer Intensität abhängig ist von der Beschaffenheit des die Körper  $A$  und  $B$  umgebenden Mediums. Dies trifft bei der Gravitation nicht zu<sup>1)</sup>, aber wohl im Gebiete der Electricität und des Magnetismus. Haben wir z. B. den Fall, dass von zwei electriche geladenen Körpern nur der

---

1) Die sogenannten Auftriebserscheinungen sind leicht in Rechnung zu bringen und sind von wesentlich anderem Charakter, als die Verminderung der Anziehung zweier electricirter Körper beim Eintauchen in ein Dielectricum. Im ersteren Falle hat die Umgebung selbst Masse, im letzteren ist die Umgebung ohne Ladung.

eine in eine isolirende Flüssigkeit eintaucht, so lässt sich der Ausgangspunkt der Rechnung als Nahewirkungsgesetz sofort hinschreiben, die Integration desselben, d. h. die Ermittlung des Fernkraftgesetzes ist aber eine sehr schwierige, meist in geschlossener Form unlösbare Aufgabe. Es ist bekannt, dass in diesem Falle die freie Oberfläche der isolirenden Flüssigkeit als Ausgangspunkt gewisser Fernkräfte anzusehen ist, deren Intensität aber nur sehr schwierig zu finden ist.

Bei solchen Aufgaben wie hier, bei denen die Wirkung zwischen zwei Körpern von der Natur ihrer Umgebung abhängt, und letztere aus mehreren verschiedenartigen Medien besteht, erfordert die Lösung vor allem die Aufstellung der Grenzbedingungen beim Uebergang über die Trennungsfläche zweier verschiedener Medien, mag man nun auf dem Standpunkte der Fernkräfte oder der Nahekräfte stehen. Es ist nun bemerkenswerth, dass letztere, wie mir wenigstens scheint, diese Grenzbedingungen ungekünstelter liefern als erstere.

Vom Standpunkte der Fernkräfte macht die Bestimmung der electricischen Kraft auf einen inneren Punkt  $P$  eines electricisch polarisirten Mediums Schwierigkeit. Man denkt sich letzteres als kleines Volumelement um den Punkt  $P$  fortgenommen, aber die Gestalt dieses Volumelementes hat dann Einfluss auf das Resultat. Die Grenzbedingungen für die electricische Kraft beim Uebergang über die Grenze zweier Medien können nur erhalten werden durch die Annahme, dass auch für einen inneren Punkt das polarisirte Medium so wirkt, als ob es nur an seiner Oberfläche Ladung besäße.

Vom Standpunkte der Nahekräfte werden die Grenzbedingungen dadurch erhalten, dass man die Grenze selbst nicht als mathematische Fläche auffasst, sondern als eine sehr dünne Uebergangsschicht, in welcher sich in der auf der Grenze normalen Richtung die Natur des Mediums sehr schnell, aber stetig, ändert. Es kommt also zunächst darauf an, die Nahewirkungsgesetze für ein inhomogenes Medium zu besitzen. Da directe Beobachtungen sich nur auf Wirkungen in homogener Umgebung beziehen, so kann man natürlich die Nahewirkungsgesetze für ein inhomogenes Medium nur durch einen hypothetischen Schluss aus der Erfahrung schöpfen. Es liegt nahe, folgendes anzunehmen: Wenn ein Nahewirkungsgesetz für

das homogene Medium in einer Form ausgesprochen ist, in der es von der Natur der betrachteten Raumstelle ganz unabhängig erscheint, so wird es in dieser Form auch für ein inhomogenes Medium gelten.<sup>1)</sup> Im Gebiete der Electricität und des Magnetismus ergibt sich nun, dass nicht für den Kraftfluss, sondern für den Inductionsfluss an irgend einer Raumstelle ein Nahewirkungsgesetz gilt, welches von der Magnetisirungs- bez. Dielectricitätsconstante des Raumes unabhängig ist. Wendet man dieses Gesetz auf die unendlich dünne Uebergangsschicht zwischen zwei verschiedenen Medien an, so erhält man sofort die Grenzbedingung, nämlich: Stetigkeit des Inductionsflusses.

Die erörterten Punkte könnten wohl den Nahewirkungsgesetzen einen Vorzug zur mathematischen Darstellung der electricischen und magnetischen Erscheinungen sichern, aber als wirklich nothwendig brauchten sie deshalb noch nicht zu erscheinen. Dies letztere tritt erst ein, wenn zeitlich sehr schnell veränderliche electricische und magnetische Felder in den Kreis der Betrachtungen gezogen werden. Es soll davon im nächsten Abschnitt die Rede sein.

Die Energieformel kann man ebenfalls in verschiedene Gestalt bringen, die man je nach dem besonderen mathematischen Gewande vom Standpunkt der Fernkräfte, oder der Nahekräfte interpretiren kann. Vom ersteren Standpunkte aus, treten, wie schon oben p. II bemerkt wurde, in der Energieformel relative Raumgrößen (z. B. Entfernungen) zwischen distincten Punkten des Raumes auf. Nach dem Standpunkte der Nahekräfte muss die Energieformel ein Raumintegral sein, dessen Elemente Zustandsgrößen sind, die sich in jedem Elemente nur auf die eigene Raumstelle beziehen.

Die Formel für die Energie:

$$E = \sum \frac{mm'}{r}$$

---

1) Ich habe diese Annahme in meinem Buche „Physik des Aethers“ p. 10 den Satz „von der Unveränderlichkeit der Nahewirkungen“ genannt, und habe mich dort im weiteren Verlaufe dieser Annahme mehrfach bedient, um das schliessliche Resultat zu erhalten, dass die Hertz'schen Gleichungen des electromagnetischen Feldes auch für inhomogene Körper gelten. Geht man von der letzten Voraussetzung von vornherein aus, so ergeben sich, wie Hertz in Wied. Ann. 40, p. 589, 1890 gezeigt hat, sämtliche Grenzbedingungen sofort.

entspricht der Fernwirkung, in der Formel:

$$E = \frac{1}{2} \sum m V,$$

in welcher  $V$  das Potential an der mit Masse  $m$  belegten Stelle ist, kommen zwar relative Ortsgrößen zwischen verschiedenen Punkten des Raumes nicht vor, trotzdem entspricht die Formel noch nicht der Annahme von überall existirenden Nahwirkungen, da die von Masse freien Stellen, d. h. das Vacuum, in obiger Formel nicht vorkommen. Erst die Form

$$E = \frac{1}{8\pi} \int d\tau \left\{ \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right\} = \frac{1}{8\pi} \int d\tau \mathfrak{F}^2$$

entspricht überall vorhandenen Nahwirkungen. In einem Volumenelement  $d\tau$  kann die Energie  $1/8\pi d\tau \cdot \mathfrak{F}^2$ , wo  $\mathfrak{F}$  die resultirende Feldstärke ist, als localisirt angenommen werden.

Wenn die zeitlichen Veränderungen der Energie eines Raumes durch ein über die Oberfläche desselben zu nehmendes Integral dargestellt wird, so kann man die in demselben auftretenden Integralelemente vom Standpunkte der Nahwirkungen aus anschaulich als Strömungscomponenten der Energie interpretiren. In dieser Weise hat Poynting<sup>1)</sup> die Energieströmung im electromagnetischen Felde untersucht und von Wien<sup>2)</sup> sind derartige Betrachtungen erweitert und auf andere Gebiete der Physik (Hydromechanik, Elasticität) ausgedehnt worden. Es ist übrigens die Bestimmung der Energieströmung aus dem Oberflächenintegral keine eindeutige, sondern man könnte beliebige Strömungscomponenten einer sozusagen incompressibelen Grösse stets willkürlich hinzufügen, d. h. einer Grösse, deren Gesamtfluss durch eine geschlossene Oberfläche stets Null ist.

In diesem Abschnitt b) sind die Nahwirkungen rein von ihrer formellen Seite betrachtet worden. Die hier erörterte Art und Weise der Zurückführung der Fernwirkungen auf Nahwirkungen, z. B. der einfache Ersatz des Newton'schen Gesetzes durch die Differentialgleichung  $\Delta V = -4\pi\rho$ , genügt aber den Ansprüchen vieler Forscher noch nicht, die durch anschauliche detaillirte Bilder (am liebsten entnommen aus

1) J. H. Poynting, Phil. Transact. 2. p. 343. 1884.

2) W. Wien, Wied. Ann. 45. p. 685. 1892; 47. p. 336. 1892.

rein mechanischen Vorstellungen) das Zustandekommen des Nahewirkungsgesetzes, der Differentialgleichung, erläutert wissen wollen. Das Streben, solche Bilder zu construiren, hat eine, nicht nur von philosophischen Gründen getragene Berechtigung, wenn man dem Bilde einen heuristischen Werth zur Auffindung bisher ungekannter Gesetzmässigkeiten und Eigenschaften beilegen kann. In dieser Beziehung hat die Vorstellung der kinetischen Gastheorie thatsächliche schöne Erfolge. — Für die electricische Theorie hat schon Maxwell, der zuerst die Idee der Nahewirkungen dort formell durchgeführt hat, sich bestrebt, ein ausreichendes mechanisches Bild zu liefern. Diese seine Bestrebungen sind von verschiedenen Seiten zu verbessern gesucht worden, ich brauche auf diese Bilder aber wohl hier nicht einzugehen, da an dieser Stelle vor kurzer Zeit von Boltzmann<sup>1)</sup> eine Uebersicht über dieselben gegeben ist. Besondere Schwierigkeiten macht zum Theil die Darstellung der electrostatischen Eigenschaften, und man kann wohl behaupten, dass bis jetzt noch kein mechanisches Bild für die Electricitätstheorie allen Ansprüchen genügt. Vor allem mag als grosser Uebelstand hervorgehoben werden, dass die Vorstellungen über die Constitution und die Mechanik des freien Aethers so complicirt sind, dass man sich vielleicht schliesslich doch damit begnügen wird, dem Aether Nahewirkungsgesetze zuzuschreiben, die wir wohl aus der Erfahrung mehr und mehr kennen lernen, die wir aber nicht aus den Eigenschaften der ponderablen Materie, d. h. nach einem mechanischen Bilde, interpretiren können.

Von den mechanischen Bildern zur Erläuterung der Gravitation soll im letzten Abschnitt die Rede sein.

### III. Näherer Vergleich der Eigenschaften der electricisch-magnetischen Wirkungen und der Gravitation.

In der jetzigen Zeit wird wohl ziemlich allgemein angenommen, dass die electricisch-magnetischen Wirkungen that-

1) L. Boltzmann, Verhandl. deutsch. Naturforscher und Aerzte, Nürnberg 1893. — Eine Uebersicht und Literaturzusammenstellung findet sich auch in Boltzmann, Vorlesungen über die Maxwell'sche Theorie, sowie in Winkelmann, Handb. der Physik, (2) 3. p. 560—581 (Autor Graetz.)

sächlich aus Nahwirkungen bestehen, während man dieses von der Gravitation mindestens nicht als erwiesen behaupten kann. Worin liegt nun der spezifische Unterschied beider Erscheinungsklassen?

Man könnte zunächst denken an die Vorzeichendifferenz: gleichartige electriche oder magnetische Ladungen stossen sich ab, ungleichartige ziehen sich an, während ponderable Massen sich stets anziehen. In diesem Punkte glaubte in der That Maxwell<sup>1)</sup> ein Hinderniss für die Auffassung der Gravitation als Nahwirkung zu erblicken. Nachdem Maxwell für das electromagnetische Feld die Möglichkeit der Auffassung einer Localisirung der Energie in allen Stellen des Feldes nachgewiesen hatte, zeigte er, dass ein ähnliches Verfahren für die Gravitationsenergie wegen des speciellen Vorzeichens der Wirkung zu dem Schlusse führe, dass der Aether im ungestörten Zustande, d. h. ausserhalb eines Gravitationsfeldes, eine ungeheuer grosse Energie besitzen müsse, die aber in dem durch Gravitation gestörten Zustande, d. h. innerhalb eines Gravitationsfeldes kleiner werden müsse. Dies Resultat schien ihm keine Vorstellungsmöglichkeit zu besitzen.

Indess wird für dieses Resultat wohl nach der Gravitationstheorie durch Stossvermittlung eine Vorstellung direct geliefert: Nach dieser Theorie (vgl. im letzten Abschnitt) sollen die Aethertheilchen überall mit ungeheurer Geschwindigkeit hin- und herfliegen. Beim Aufprallen auf ponderable Materie soll ihre fortschreitende Energie Einbusse erleiden und dadurch kommen Anziehungserscheinungen zwischen zwei oder mehreren ponderablen Körpern zu Stande. In der That müsste sonach in der Nähe ponderabler Körper, d. h. im Gravitationsfelde der Aether etwas an seiner ungeheuer grossen Energie (jedenfalls an der Fortschreitungsenergie seiner Theilchen, welche allein für die Gravitationswirkung in Betracht kommt) Einbusse erleiden.

Sonach würde die Vorzeichendifferenz noch keinen so spezifischen Unterschied in der Gravitation einerseits, und den electriche-magnetischen Wirkungen andererseits bilden, dass

---

1) Cl. Maxwell, „A Dynamical Theory of the electromagnetic field“, Werke 1. p. 570.

man erstere nicht als Nahwirkungen auffassen könnte, aber wohl die letzteren. Eher könnte man den Punkt heranziehen, dass die electrisch-magnetischen Wirkungen von der Natur des umgebenden Mediums abhängen, die Gravitation aber nicht. Wie schon oben p. XVII besprochen wurde, lassen sich zwar jene Erscheinungen durch Nahwirkungsgesetze bequemer beschreiben, als durch Fernwirkungen, aber sie geben noch nicht einen Anhaltspunkt dafür, dass ausser der Polarisation des umgebenden ponderabeln Mediums nicht auch eine reine electrisch-magnetische Fernkraft wirksam ist. Maxwell hat zwar die electro- oder magnetostatischen Kräfte durch eine Art Spannungszustand im ganzen Felde darstellen können durch Formeln, welche denen der Elasticitätstheorie nachgebildet<sup>1)</sup> sind, trotzdem sind diese durchaus nicht nothwendig, d. h. man kann sämmtliche an ponderabeln Körpern im electrischen oder magnetischen Felde beobachtbare Erscheinungen gerade so gut, wenn nicht sogar oft directer<sup>2)</sup>, mit Hülfe der Vorstellung der Polarisation der ponderabeln Theile, sagen wir kurz nach der alten Theorie, berechnen.

Das Unzureichende der reinen Fernwirkung zeigt sich bei den electrisch-magnetischen Wirkungen erst, wenn man zeitlich schnell veränderliche Zustände in Betracht zieht, während

---

1) Trotzdem giebt es spezifische Unterschiede zwischen diesen Formeln und denen, die für das Verhalten eines isotropen elastischen Mediums gelten. E. Beltrami hat nachgewiesen (Mem. del Ist. di Bologna (4) 7. 1886), dass diese Maxwell'schen Spannungszustände im statischen Felde nur in äusserst speciellen Fällen als solche eines isotropen, elastischen Mediums angesehen werden können. Vgl. auch Brillouin in Ann. de l'éc. Norm. (3) 4. p. 201. 1887.

2) Durch die Anwendung der Maxwell'schen Spannungsformeln entstehen sogar oft Fehler, wenn man den Druck, der auf die freie Oberfläche eines ponderabeln Körpers im electro- oder magnetostatischen Felde wirkt, direkt identificirt mit dem von Maxwell berechneten, auf den Aether ausgeübten Druck. So z. B. glaubte Poincaré (Electric u. Optik, deutsch von Jäger u. Gumlich, 1. p. 245) einen Widerspruch mit der Theorie und dem Versuche Quincke's zu constatiren, wonach die Steighöhe einer Flüssigkeit im magnetischen Felde unabhängig ist von der Orientirung der freien Oberfläche gegen die magnetischen Kraftlinien. Die richtig angesetzte Theorie steht mit diesem Resultat durchaus im Einklang, und die vermeintliche Differenz ist nur durch die oben genannte Identificirung herbeigeführt.

dies für die Gravitation nicht behauptet werden kann, vielleicht aus dem Grunde, weil hier zeitlich veränderliche Zustände nur durch relative Bewegung ponderabler Massen (nicht wie in der Electricität durch Bewegung der sogenannten imponderablen Ladungen) geschaffen werden können, und diese nicht schnell genug vor sich geht, oder experimentell zu realisiren ist.

Helmholtz<sup>1)</sup> hat durch einen Versuch über die Electricität, die sich an der Oberfläche eines im magnetischen Felde rotirenden Leiters bildet, nachgewiesen, das die electricische Polarisation eine electricische Bewegung ist, die dem jene Leiterstücke ladenden Strom äquivalente Intensität und äquivalente electrodynamische Wirkung hat. Dieser Versuch wird von Helmholtz in seiner Faraday-Rede<sup>2)</sup> ausdrücklich erwähnt als entscheidend zu Gunsten der Faraday-Maxwell'schen electricischen Theorie im Gegensatz zu den electricischen Theorien, welche reine Fernwirkung annehmen.

In der That, da für den Helmholtz'schen Versuch die Anwesenheit der umgebenden Luft nur unwesentlich ist und da er gerade so gut im Vacuum hätte gelingen müssen, so können wir nach jenem Versuch schliessen, dass bei Veränderungen der electricischen Ladung eines ponderablen Körpers auch Zustandsänderungen im umgebenden Vacuum vor sich gehen, und solches Verhalten drängt zu der Annahme von Nahewirkungen (vgl. oben p. VI).

Es ist durch jenen Versuch wohl zuerst die Existenz der sogenannten Maxwell'schen Verschiebungsströme experimentell erwiesen. Rein theoretisch erweist sich ihre Nothwendigkeit, wenn man den Maxwell'schen Grundsatz festhält: „es giebt nur geschlossene Ströme“. Diesen Grundsatz kann man auch rein aus der Theorie ableiten<sup>3)</sup>; es soll dies hier angedeutet werden, weil dieser Satz das wesentlichste Fundament der Maxwell'schen Theorie ist. Wenn zwei electricisch geladene Conductoren durch einen sie verbindenden Draht entladen werden, so fliesst jedenfalls in diesem ein zeitlich schnell

1) H. v. Helmholtz, Pogg. Ann. 158, p. 87, 1876. — Wissenschaftl. Abhandl. 1, p. 774.

2) Vorträge u. Reden 2, p. 259. (4. Aufl.).

3) Drude, Physik d. Aethers, p. 63. 88. 90.

veränderlicher Strom. Fassen wir einen kurzen Zeitmoment ins Auge, während dessen der Strom als constant betrachtet werden kann. Ein Magnetpol, um den Draht auf einer geschlossenen Curve  $C$  geführt, muss eine von Null verschiedene positive oder negative Arbeit leisten. Diese Arbeit lässt sich nach dem Stokes'schen Satze<sup>1)</sup> stets ausdrücken durch ein Flächenintegral über eine Fläche  $S$ , welche von der Curve  $C$  umrandet ist; die Elemente des Integrales sind die Wirbelcomponenten der magnetischen Kraft, d. h. Grössen, welche an denjenigen Raumstellen von Null verschieden sind, an welchen die magnetische Kraft kein Potential hat. Es folgt also nothwendig, dass, wie man auch die Fläche  $S$  construiren möge, sie stets mindestens eine Wirbelstelle der magnetischen Kraft schneiden muss, da sonst die Arbeit längs der Curve  $C$  nicht von Null verschieden sein könnte. Die Wirbelstellen der magnetischen Kraft müssen sich daher stets ringförmig um die (geschlossenen) magnetischen Kraftlinien schliessen. Giebt man daher den Satz zu, dass jede Wirbelstelle magnetischer Kraft als eine, vom electrischen Strome durchflossene zu bezeichnen sei, so ist der Satz erwiesen, dass es nur geschlossene Ströme giebt. Leugnet man aber jenen Satz, so ist eine nothwendige Folgerung, dass die magnetische Kraft mindestens an einigen Stellen des Vacuums, die ausserhalb der von electrischen Strömen durchflossenen Stellen liegen, kein Potential besitze, ein Satz, den keine electrische Theorie bisher aufgestellt hat und auch wohl kaum aufstellen wird.

Die wesentlichste experimentelle Stütze hat die Maxwell'sche Nahewirkungstheorie der Electricität durch die von Hertz angestellten Versuche erfahren in Folge des Nachweises der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit der electrodynamischen und electroinductorischen Wirkung. Schon oben (p. VIII) wurde betont, dass eine reine Fernwirkung keine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit haben könne. Umgekehrt, wird von einer Wirkung ihre endliche Fortpflanzungsgeschwindigkeit nachgewiesen, so ist dies nur so denkbar, dass in dem Raume, in welchem sich die Wirkung fortpflanzt, irgend welche Zustands-

1) Nach Maxwell, *Electr. u. Magnetism*. Deutsch von Weinstein, 1. p. 28 findet sich der Stokes'sche Satz zuerst in Smith's Price Examination, Question 8. 1854.

änderungen vor sich gehen, d. h. die Wirkung eine vermittelte ist. Man muss daher jedenfalls nach jenen Hertz'schen Versuchen auch dem Vacuum (da das Vorhandensein der Luft für jene Versuche unwesentlich ist) eine Polarisationsfähigkeit im electricischen Felde zuschreiben, analog wie man es bei ponderabeln Körpern zur Beschreibung ihres dielectricischen Verhaltens thut. Es ist nur noch die Frage, ob nicht neben der, durch die Polarisation des Aethers vermittelten Wirkung ein Rest reiner electricischer Fernwirkung übrig bleibt.<sup>1)</sup> Dieser müsste sich, da er keine endliche Fortpflanzungsgeschwindigkeit besitzen kann, bei den Hertz'schen Versuchen über stehende electricische Wellen im Luftraume dadurch kenntlich machen, dass er das Zustandekommen vollkommener Knoten, d. h. völliger Nullstellen der Wirkung verhinderte. Da aber schon wegen der experimentell nie zu vermeidenden zeitlichen Dämpfung der Schwingungen vollkommene Knoten nie zu erreichen sind, so kann man hieraus kein experimentelles Hülfsmittel zur Eliminirung jeglicher Fernwirkung gewinnen. Aber wohl gelingt letzteres, wenn man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wirkung bei jenen Hertz'schen Versuchen (im freien Luftraume, nicht längs Metalldrähten) numerisch exact misst. Erhält man für diese Geschwindigkeit genau das Verhältniss  $v$  der electrostatisch gemessenen zu der electromagnetisch gemessenen Einheit der Electricitätsmenge, so ergibt der Calcül, dass sich dann jene allgemeinste v. Helmholtz'sche electricische Theorie auf die Maxwell'sche reducirt, d. h. dass dann jeder Rest reiner Fernwirkung ausgeschlossen ist. Hierin liegt das hohe Interesse, welches jenen Versuchen zur Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit electricischer Wellen im Luftraume anhaftet; nach den bisherigen Versuchen ergibt sich für jene Geschwindigkeit mindestens nahezu jenes Verhältniss  $v$ , sodass man wohl hieraus eine weitere experimentelle Stütze für die Maxwell'sche Nahewirkungstheorie sehen kann.

Bei der Gravitation finden wir nun nicht derartige That-sachen, welche zur Annahme von Nahewirkungen direct nöthigen.

---

1) In dieser allgemeinsten Form hat v. Helmholtz in Crelle's Journ. 72. p. 57. Abhandl. I. p. 545 eine electricische Theorie dargestellt.

Zu ihrer Entdeckung sind zahlreiche Versuche gemacht worden, aber bisher stets mit keinem, oder höchst zweifelhaftem Erfolge. Für denjenigen, der sich weniger von philosophischen, als von praktischen Principien leiten lässt, werden die Versuche zur Entdeckung irgend eines bisher unbekanntem Verhaltens der Gravitation vielleicht von grösserem Interesse sein, als die bisherigen verschiedenen Nahewirkungstheorien der Gravitation selber. Im folgenden Capitel soll über diese Versuche referirt werden.

#### IV. Untersuchungen über die Gültigkeit des Newton'schen Gravitationsgesetzes.

a) *Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit.* Die Entdeckung einer endlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation wäre von höchster Bedeutung für die Auffassung derselben als Nahewirkung. Um eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit constatiren zu können, müssen solche Fälle untersucht werden, bei denen die Intensität der Gravitation zeitlich variirt. Da nun die Masse eines Körpers stets unveränderlich ist, so können hier nur schnelle relative Bewegungen der Körper in Betracht kommen. In der That hat man aus den Bewegungen der Himmelskörper Schlüsse auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation zu ziehen versucht, wobei man besonders den Einfluss auf säculäre Aenderungen discutirt, weil dieser allein beobachtbare Grösse erreichen kann. Ueber die Art und Weise aber, wie man den Einfluss einer endlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit in die Rechnung einführen soll, kann man noch verschiedener Ansicht sein; zum Theil geschieht es nach dem Vorgange von Laplace analog, wie man aus der Aberration das Verhältniss der Lichtgeschwindigkeit zur Erdgeschwindigkeit bestimmt. Nach dieser Vorstellung müsste bei einer endlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation eine Störungscompenente in der Bewegung eines Himmelskörpers hervorgerufen werden, welche senkrecht zu der ihn mit der Sonne verbindenden Geraden liegt, und die proportional dem Verhältniss seiner Geschwindigkeit zu der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation ist.

So schloss zuerst Laplace<sup>1)</sup> aus der **Mondbewegung**, dass die **Gravitation** mindestens 10 Millionen Mal schneller, als das **Licht**, sich fortpflanzen müsse. Man wird aber diesem Schlusse in Anbetracht der Schwierigkeit, die die mathematische Berechnung der **Mondbewegung** schon wegen des grossen Einflusses der normalen Störungscomponenten bietet, kein allzugrosses Gewicht beilegen dürfen. Auch ist der mathematische Ansatz der Berechnung von Laplace nicht über jeden Zweifel an seiner Berechtigung überhoben.

In seinem Vortrage auf der Naturforscherversammlung in Salzburg schloss Th. v. Oppolzer<sup>2)</sup>, dass wegen der Unvollständigkeit der Mondtheorie dieselbe noch keinen Prüfstein für feine Untersuchungen über das **Newton'sche Gesetz** abgeben könne; eher sei dies aus den Störungen der Planetenbewegungen möglich. So sind die Bewegungsanomalien des **Mercur**, des **Enke'schen** und **Winnecke'schen Kometen** aus der instantan fortgepflanzten Gravitation der Sonne und der übrigen Planeten nicht zu erklären. Nach **Le Verrier** soll der **Mercur** durch eine kleine Masse nahe der Sonne gestört werden. Einerseits würde dieselbe aber nicht für die Störung des **Enke'schen Kometen** ausreichend sein, andererseits hat man eine solche Masse vor der Sonnenscheibe noch nicht sicher constatiren können. **Oppolzer** hält es nun für möglich, dass störende Massen in feinsten Vertheilung im Weltraume existiren, wie ja auch das Vorhandensein von **Sternschnuppen**, der **Corona**, dem **Zodiacallicht** wohl wahrscheinlich macht. Solche Massen könnten die Hauptanomalien in der Bewegung des **Merkur** und des **Enke'schen Kometen** erklären, ohne dass man vom **Newton'schen Gesetz** in seiner gewöhnlichen Fassung abzugehen braucht. Dieser Meinung schliesst sich auch **Tisserand**<sup>3)</sup> an. — Um die Anomalie des **Winnecke'schen Kometen** zu erklären, würde wohl die Annahme einer endlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation nahezu ausreichend sein. Diese würde dann aber für die Planeten zu grosse Störungen bewirken, wie sie nicht beobachtet werden. —

1) Laplace, *Mécanique céleste*, 4. Livre X, Chap. 7. p. 326. 1805.

2) Th. v. Oppolzer, *Naturforschervers. Salzburg*, 1881. — *Der Naturforscher* 15. p. 29. 1882.

3) Tisserand, *Compt. Rend.* 110. p. 313. 1890.

Schliesslich macht Oppolzer noch auf ein Bedenken aufmerksam, welches bei Beurtheilung aller säculären Störungen wohl im Auge zu behalten ist: Wir haben keine Garantie dafür, dass unser Zeitmaass stets genau constant geblieben ist. Durch die Fluthwelle kann die Tagesdauer verlängert, durch Contraction der Erde kann sie verkürzt werden.

Bei dem (von Laplace abweichenden) Rechnungsansatz von Lehmann-Filhès<sup>1)</sup> entsteht die Schwierigkeit, dass die absolute Bewegung der Sonne im Raume für die Beurtheilung des Einflusses einer endlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation von Gewicht ist. Man kann allerdings das allgemeine Resultat ableiten, dass bei Annahme der letzteren wohl Anomalien in der Perihelbewegung der Planeten zu erklären seien, bindende Schlüsse sind aber so nicht zu gewinnen.

Mit einem, dem Laplace'schen ähnlichen Rechnungsansatz gelangt J. v. Hepperger<sup>2)</sup> zu dem Resultat, dass die Gravitation mindestens 500mal schneller als das Licht sich fortpflanzen müsse, weil sonst Widersprüche mit astronomischen Thatsachen entständen.

Eine gute Uebersicht über diese hier und im folgenden Abschnitt besprochenen Untersuchungen ist von Oppenheim<sup>3)</sup> gegeben. Aus der Bewegung der mittleren Länge der Erdbahn berechnet der Verfasser, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation mindestens 12 Millionen Mal grösser als die Lichtgeschwindigkeit sein müsse.

b) *Die Form des Gesetzes.* Um die säculäre Störung des Mercurperihels zu erklären, sind mehrfach Versuche gemacht worden, die Form des Newton'schen Gesetzes abzuändern.

Zunächst möchte ich hier die Rechnungen erwähnen, die eines der bekannteren electrodynamischen Fernkraftgesetze (Weber'sches, Riemann'sches, Clausius'sches, Gauss'sches) benutzen. Man könnte diese Rechnungen in gewisser Weise

1) Lehmann-Filhès, „Ueber die Bewegung eines Planeten unter der Annahme einer sich nicht momentan fortpflanzenden Schwerkraft“. *Astronom. Nachr.* 110, p. 209. 1885.

2) J. v. Hepperger, *Wien. Ber.* (2) 97. 1888.

3) S. Oppenheim, „Zur Frage nach der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation.“ *Jahresber. über das k. k. akad. Gymn. in Wien* 1894/95.

auch als Versuche ansehen, eine endliche Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation mit Hülfe eines anderen Ausgangspunktes der Rechnung, als sie unter a) genannt ist, nachzuweisen. Denn es ist ein von Gauss<sup>1)</sup> ausgesprochener Gedanke, die electrodynamischen Kräfte aus der endlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der statischen Wirkung abzuleiten. Versuche sind dazu gemacht worden von Riemann<sup>2)</sup> und (mit mehr Erfolg) von C. Neumann.<sup>3)</sup>

Die Berechnung der Planetenbewegung auf Grund derartig erweiterter Kraftgesetze sind ausgeführt worden von Holzmüller<sup>4)</sup>, Tisserand<sup>5)</sup>, Servus<sup>6)</sup>, Lévy.<sup>7)</sup> Aus diesen Gesetzen lassen sich zwar Anomalien der Perihelbewegung ableiten, giebt man aber der in diesen Gesetzen auftretenden sogenannten kritischen Geschwindigkeit den Werth der Lichtgeschwindigkeit, so folgt weder nach dem Weber'schen, noch Riemann'schen, noch Gauss'schen, noch Clausius'schen Gesetze die bisher unerklärte säculäre Perihelbewegung des Mercur in ihrem vollen, der Beobachtung entsprechenden Werthe von etwa 41''.<sup>8)</sup> Würde man, um letzteren Betrag zu

1) Gauss, Ges. Werke 5. p. 627. Nachlass „Aus einem Briefe von Gauss an W. Weber aus dem Jahre 1845.“

2) B. Riemann, Pogg. Ann. 131. 1867. — Werke p. 270. Die Riemann'sche Ableitung ist von Clausius, Pogg. Ann. 135. p. 606. 1868 beanstandet worden.

3) C. Neumann, „Principien der Electrodynamik.“ Festschrift z. Jubil. d. Univers. Bonn, 1868. — „Allgemeine Untersuchungen über das Newton'sche Princip etc.“, Leipzig, Teubner 1896.

4) Holzmüller, Schlömilch's Zeitschr. 1870.

5) Tisserand, Compt. Rend. 75. p. 760. 1872; 110. p. 313. 1890.

6) H. Servus, „Untersuchungen über die Bahn und die Störungen der Himmelskörper mit Zugrundelegung des Weber'schen electrodynamischen Gesetzes.“ Dissertation, Halle 1885.

7) M. Lévy, Compt. Rend. 110. p. 545. 1890.

8) Das Weber'sche Gesetz würde nur  $\frac{3}{8}$  der unerklärten Perihelbewegung des Mercur liefern, das Gauss'sche Gesetz  $\frac{3}{4}$  derselben. Dieses Gesetz, welches auch nur aus Gauss' Nachlass geschöpft ist, kann aber keine universelle Bedeutung haben, weil es nicht dem Princip der Erhaltung der Energie entspricht, und auch nicht die Erscheinungen der Inductionsströme erklärt, da in ihm relative Beschleunigungen nicht vorkommen. Gauss selbst hat das Gesetz auch nur auf electrodynamische Vorgänge angewandt. — Von beiden Mängeln ist das Riemann'sche Gesetz frei. — Das Clausius'sche Gesetz ist in Pogg. Ann. 156 publicirt.

erreichen, jene kritische Geschwindigkeit aber noch erheblich kleiner als die Lichtgeschwindigkeit annehmen, so würden für die anderen Planeten bisher unbeobachtete Anomalien folgen. Nur bei einer Combination des Weber'schen und des Riemann'schen Gesetzes kann man, wie Lévy zeigte, die Bewegungsanomalie des Mercur berechnen, ohne bei den anderen Planeten mit der Beobachtung auf Widersprüche zu stossen.

In anderer Weise hat Hall<sup>1)</sup> die Perihelbewegung des Mercur zu erklären unternommen. Schon Newton hat in seinen „Principien“ bemerkt, dass eine Perihelbewegung eintritt, wenn man statt des Quadrates eine etwas abweichende Potenz der Entfernung im Kraftgesetze einführt. Hall zeigt, dass die Potenz 2,00000016 die Perihelbewegung des Mercur erklären kann.

Aus allen genannten Rechnungen geht aber nicht hervor, dass die Newton'sche Form des Gravitationsgesetzes nothwendig zu corrigiren ist, weil, wie oben p. XXVI erwähnt wurde, die Perihelbewegung des Mercur auch in anderer Weise erklärt werden kann. Von wesentlich anderen Gesichtspunkten ausgehend, nämlich ohne Benutzung irgend welcher Erfahrungsthatfachen, sondern lediglich aus Ueberlegungsgründen, haben C. Neumann<sup>2)</sup> und H. Seeliger<sup>3)</sup> es wahrscheinlich gemacht, dass die bisherige Form des Gravitationsgesetzes als universales Gesetz nicht bestehen wird. Wenn man nämlich annimmt, dass das ganze Universum mit Sternen besetzt sei, so würde dessen Gravitationswirkung auf einen inneren Körper, z. B. die Erde, unbestimmt sein, da die Wirkung gleichkommen müsste einer überall mit endlicher Dichte besetzten, unendlich grossen Kugel auf einen inneren Punkt. Diese Schwierigkeit fällt fort, sobald man dem Potential die Form giebt:

---

1) A. Hall, „A Suggestion in the Theory of Mercur“, Astron. Journ. 14. p. 45.

2) C. Neumann, „Allgemeine Untersuchungen über das Newton'sche Princip der Fernwirkungen mit besonderer Rücksicht auf die electrischen Wirkungen.“ Leipzig, 1896.

3) H. Seeliger, Astronom. Nachr. 137. p. 129. 1895; Münchener Berichte 26. p. 371. 1896.

$$V = \frac{A \cdot e^{-\alpha r}}{r} + \frac{B \cdot e^{-\beta r}}{r} + \dots,$$

wobei  $A, B, \dots$  beliebige,  $\alpha, \beta, \dots$  positive Constanten sind. Diese Potentialform ist nach den Untersuchungen von Neumann die einzige, welche auf einem Conductor einen einzigen electricischen Gleichgewichtszustand zulässt. Da  $\alpha, \beta$  beliebig klein sein können, so braucht die Abweichung des Potentials von der Newton'schen Form innerhalb des Planetensystems ganz unmerkbar zu sein. Ob das Newton'sche Gesetz auch ausserhalb des Planetensystems gültig ist, können wir in der That nach den bisherigen Erfahrungen <sup>1)</sup> nicht mit voller Sicherheit schliessen. Auch die Seeliger'sche Annahme des Kraftgesetzes

$$K = \frac{m m'}{r^2} e^{-\lambda r}$$

würde die soeben erwähnte Schwierigkeit heben. <sup>2)</sup> Mit  $\lambda = 0,000\,000\,38$  könnte man dabei zugleich die Perihelbewegung des Mercur errechnen, aber dieser Betrag von  $\lambda$  würde für den Mars eine zu grosse, nicht beobachtete Perihelbewegung veranlassen. <sup>3)</sup> Deshalb schliesst Seeliger, dass die Perihelbewegung des Mercur in anderen, viel näher liegenden Ursachen seine Erklärung finden wird, und dass das Planetensystem viel zu wenig ausgedehnt sei, um eine Correction für das Newton'sche Gesetz nothwendig zu machen, dass es aber bei Ausdehnung auf das Universum wohl zu modificiren sein könnte. — Es ist interessant, dass auch nach einigen kinetischen Theorien der Gravitation die Anwendung des unveränderten Newton'schen Gesetzes in Zweifel zu ziehen ist; dies soll im nächsten Abschnitt besprochen werden.

R. Pictet<sup>4)</sup> glaubt einen experimentellen Weg anzeigen zu können, auf dem eine Entscheidung zwischen der Auffassung der Gravitation als Fernkraft, oder Nahewirkung möglich sei,

1) Es kommen hier nur die Bewegungen der Doppelsterne in Betracht.

2) Dagegen würde die Hall'sche Modification des Newton'schen Gesetzes jene Schwierigkeit nicht heben.

3) Dasselbe Resultat würde sich für das einfachste Neumann'sche Gesetz ergeben.

4) R. Pictet, Archiv de Genève (3) 7. p. 513, 1882.

wenn man wenigstens letztere als Stossvermittlung auffasste. In letzterem Falle ist die Energie des Universums rein kinetischer Natur, ein Theil ist die kinetische Energie  $T_1$  der ponderablen Körper, der andere Theil die kinetische Energie  $T_2$  des Aethers. Das Princip der Erhaltung der Energie erfordert, dass, wenn bei gewissen Constellationen der Himmelskörper  $T_1$  kleiner ist, dann  $T_2$  um denselben Betrag grösser ist. Da nun die kinetische Energie des Aethers nach dieser Nahewirkungstheorie die Ursache zu den Gravitationserscheinungen ist, so muss bei grossem  $T_2$ , d. h. kleinem  $T_1$ , die Fallbeschleunigung  $g$  grösser sein, als bei kleinem  $T_2$ , d. h. grossem  $T_1$ . Indem nun Pictet das Planetensystem als ein für sich abgeschlossenes (constanter Gesamtenergie) betrachtet, setzt er  $T_1$  gleich der kinetischen Energie der relativen Bewegung der Planeten zur Sonne und berechnet bis zum Jahre 1919 die extremen Variationen dieses  $T_1$ . Entweder gleichzeitig mit diesen Variationen, oder mit einer gewissen Phasenverzögerung (wenn nämlich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation eine endliche sein sollte) müssten Variationen der Fallbeschleunigung  $g$  zu bemerken sein, wenn die Stossvermittlungstheorie der Gravitation der Wirklichkeit entspricht, dagegen soll  $g$  nach der reinen Fernwirkungstheorie unabhängig vom Werthe des  $T_1$  absolut constant sein (wenn man den Sonnen- und Mondeinfluss eliminirt).

In dem letzten Schlusse Pictet's liegt m. E. der Fehler. Denn auch im letzteren Falle muss  $g$  principiell mit  $T_1$  variiren.  $g$  wird nämlich im Mittel um so kleiner, je mehr das ganze Planetensystem sich dichter um die Sonne (oder Erde) gruppirt, da dann der Einfluss der übrigen Planeten der Attraction der Erde (im Mittel) möglichst entgegen wirkt. In diesem Falle ist die potentielle Energie des ganzen Planetensystems ein Minimum, die kinetische Energie  $T_1$  daher ein Maximum; es würde also auch nach der Fernwirkungstheorie derselbe Aenderungssinn des  $g$  mit  $T_1$  resultiren, wie nach der Stossvermittlungstheorie. Es kann überhaupt kein Unterschied in den beobachtbaren Resultaten beider Theorien aus diesen Gründen gefunden werden, wenn wenigstens die kinetische Theorie, den Thatsachen entsprechend, völlig ausgebildet wird, was keine leichte Aufgabe ist; denn die kinetische Energie  $T_2$

des Aethers bei der Nahewirkungstheorie spielt ganz die Rolle der potentiellen Energie des Planetensystems bei der Fernewirkung. Letztere Anschauung hat nur vor ersterer den Vortheil voraus, dass sie mit Leichtigkeit die zu erwartenden Aenderungen von  $g$  zu berechnen erlaubt; sie müssen viel zu klein sein, um beobachtet werden zu können, da schon der Einfluss von Sonne und Mond auf  $g$  sehr gering ist. Der Vorschlag zur Ermittlung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation ist deshalb auch unbrauchbar; dieser Weg würde wenigstens an Genauigkeit weit zurückstehen hinter den Schlüssen, die man aus den säculären Bahnänderungen der Planeten gezogen hat.

Subtile Versuche darüber, ob die Gravitation von der Orientirung krystallinischer Körper (Kalkspathkugeln) unabhängig sei, sind von A. St. Mackenzie<sup>1)</sup> angestellt worden, sowie von Kreichgauer<sup>2)</sup> über die Unveränderlichkeit des Gewichtes bei chemischen Reactionen oder Aenderungen des Aggregatzustandes. So wenig aussichtsreich für die Erlangung eines nicht erwarteten Resultates derartige Versuche auch für denjenigen sein werden, der an die strenge Gültigkeit des Newton'schen Gravitationsgesetzes wie an ein Axiom glaubt, so ist es doch sehr gut, dass auch in dieser Richtung subtile Prüfungen vorgenommen wurden, zumal nach den kinetischen Gravitationstheorien eine minimale Modification der Gravitation bei jenen Versuchen wohl zu erwarten gewesen wäre.

#### V. Bisherige Erklärungsversuche der Gravitation.

Im Folgenden sollen die Theorien besprochen werden, welche die Gravitation auf Nahewirkungen reduciren wollen. Es handelt sich hier um mehr, als eine formelle Reduction (vgl. oben p. XVIII), nämlich um die mehr oder weniger detaillirte Construction mechanischer Bilder der die Gravitation vermittelnden Wirkungen.

a) *Druckvermittlung.* Unter dieser Ueberschrift sollen die Theorien angeführt werden, welche nicht den Stoss dis-

1) A. St. Mackenzie, Phys. Rev. 2. p. 320. 1894. — John Hopkins Univ. Circ. 13. p. 76. 1894. — Wied. Beibl. p. 284. 1895.

2) D. Kreichgauer, Verhandl. d. phys. Ges. z. Berlin, No. 2. p. 13. 1891. — Wied. Beibl. p. 6. 1892.

creter, frei fliegender Aethertheile zur Gravitationserklärung heranziehen. Die Theorien sind oft phantastisch, und die wenigsten derselben sind folgerichtig mathematisch etwas durchgeführt oder können überhaupt widerspruchsfrei durchgeführt werden. Ich brauche auf das Detail der letzteren um so weniger einzugehen, als über viele der älteren Theorien von W. B. Taylor im *Smithsonian report* 1876, p. 205 im Aufsatz „Kinetic Theories of Gravitation“ eine Uebersicht und Kritik gegeben ist, über die neueren (von 1870 bis 1879) von C. Isenkrahe im Buche „Das Räthsel der Schwerkraft“, Braunschweig 1879.

Schon im Jahre 1671 hat Hooke (Posth. Works, edit. by B. Waller, London 1705, p. XIV u. 184) die Gravitation durch die Wirkung von Wellen im umgebenden Medium erklären wollen.

Ferner sind Drucktheorien, zum Theil unter Heranziehung des Einflusses von Rotationsbewegungen oder von longitudinalen Wellen, von folgenden Autoren angedeutet worden:

Ch. Huygens, „Dissertatio de causa gravitatis“, Leiden 1690.

Villemot, „Nouveau Système ou Nouvelle Explication du Mouvement des Planètes“, Lyon 1707.

J. Bernoulli, Ges. Werke „Essai d'une Nouvelle Physique Céleste“. — Opera omnia, Lausanne u. Genf 1742, 3. sect. VIII, p. 270 ff.

L. Euler, Briefe an eine deutsche Prinzessin, Brief 50. 30. August 1760.

J. Herapath, *Annals of Philosophy*, 8. p. 58. 1816.

J. Guyot, *Eléments de Physique Générale*, Paris 1832. Eine Art hydrodynamische Theorie, veranlasst durch die Anziehung von Papierscheiben in der Nähe tönender Stimmgabeln.

J. J. Waterston, *Phil. Mag.* 15. p. 329. 1858.

J. Challis, *Phil. Mag.* 18. p. 334. 1859.

St. Glennie, *Phil. Mag.* 21. p. 41. 1861.

F. und E. Keller, *Compt. Rend.* p. 531. 1863.

J. Croll, *Phil. Mag.* 34. p. 450. 1867.

L. de Boisbaudran, *Compt. Rend.* 69. p. 703. 1869.

F. Guthrie, *Phil. Mag.* 40. p. 354. 1870, von ähnlichen Experimenten ausgehend wie Guyot. Die die Gravitation

verursachenden Schwingungen sollen von der Wärmebewegung veranlasst sein. Diese Theorie ist schon deshalb unhaltbar, weil das Gewicht von der Temperatur unabhängig ist.

v. Dellingshausen, „Grundzüge einer Vibrationstheorie der Natur“, Reval 1872.

Ph. Spiller, „Die Urkraft des Weltalls“, Berlin 1876.

P. A. Secchi, „Die Einheit der Naturkräfte“, Deutsch von Schulze, Leipzig 1876.

J. Odstrčil, Wien. Ber. (2) 89. p. 485. 1884.

W. Barlow, „Neue Theorien über Stoff und Kraft“, London 1885.

P. Tannery, Soc. d. Sc. phys. et natur., Bordeaux (3) 5. 1890.

Waterdale, „Neues Licht auf die Kraftwirkung und die Schwerkraft der Masse“, London 1891.

G. A. Götttert, „Lösung des 210jährigen Räthsels der Schwerkraft“, Posen 1893.

Diese Theorien sind zum Theil so unbestimmt angedeutet, dass sie kaum eine kritische Prüfung auf ihre Haltbarkeit zulassen, zum Theil können sie letztere nicht bestehen. (Vgl. die oben genannten kritischen Uebersichten von Taylor und Isenkrahe, auch den Aufsatz des letzteren in Zeitschr. für Math. u. Phys. 37. p. 163. Suppl. 1892.) Jedenfalls giebt uns keine dieser Theorien ein völlig befriedigendes vorstellbares Bild für das Zustandekommen der Gravitation.

Gewisse hydrodynamische Theorien gestatten wenigstens eine consequente mathematische Durchführung. Es ist bekannt, dass man auch in der Hydrodynamik incompressibeler Flüssigkeiten auf das Nahewirkungsgesetz der Gravitation

$$\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} = 4\pi\rho$$

gelangt, wenn  $X, Y, Z$  als Strömungskomponenten,  $\rho$  als Intensität einer Quell- oder Sinkstelle aufgefasst werden. Diesem Gedanken legt Riemann<sup>1)</sup> mehr als eine formelle Bedeutung bei, indem er die Hypothese aufstellt, dass der raumerfüllende Stoff (Aether) eine incompressibele Flüssigkeit ohne Trägheit sei, und dass in jedes ponderable Atom in gleichen Zeiten

---

1) B. Riemann, Ges. Werke, p. 503.

stets gleiche, seiner Masse proportionale Mengen einströmen und dort verschwinden. Die Gravitationserscheinungen sind dann aus dem Druck des Aethers zu erklären. Verwandt mit dieser Riemann'schen Theorie ist die von Helm.<sup>1)</sup> Die Vorstellungen von Helm sind complicirter, als die von Riemann, dafür wird aber dabei die Annahme eines Verschwindens von Stoff vermieden. Nach Helm soll der Aether in den ponderablen Molecülen flüssig sein, ausserhalb derselben aber wie ein fester Körper sich verhalten, der von jedem Molecül Zugspannungen erfährt, die proportional der Masse desselben sind. Die auf die ponderablen Körper ausgeübte Kraft soll proportional und gleichgerichtet den Verrückungen der anstossenden Aetherelemente sein. Es folgt dann das Newton'sche Gesetz.

Die Theorie von Yarkovski<sup>2)</sup> ist noch näher mit der Riemann'schen verwandt. Gerade wie bei Riemann soll der Aether in die Materie einströmen, aber dort nicht verschwinden, sondern sich zu Materie, d. h. zu chemischen Elementen verdichten. Die eigentliche Masse eines Planeten nimmt also fortdauernd zu, trotzdem seine Anziehungskraft nicht, da diese nach dem Verfasser nur von der Einströmungsintensität des Aethers abhängt. Es ist dabei aber übersehen, dass diese Strömungsintensität offenbar auch der eigentlichen Masse proportional gesetzt werden muss, dass erstere also doch mit der Zeit zunehmen müsste, und daher auch die Gravitation. Auf andere, noch phantastischere Punkte der Theorie gehe ich nicht ein.

Hydrodynamische Untersuchungen von Bjerknæs<sup>3)</sup> sind mehrfach als Bilder der Gravitation sowohl, als der electricisch-magnetischen Fernkräfte zu verwerthen gesucht. Kugeln, welche in einer incompressibelen Flüssigkeit mit gleicher Oscillationsdauer und Phase pulsiren, ziehen sich nach dem

1) G. Helm, Wied. Ann. 14. p. 149. 1881.

2) J. Yarkovski, Hypothèse cinétique de la Gravitation universelle et connexion avec la formation des éléments chimiques. Moscou 1888.

3) Bjerknæs, Vid. Förh. Christiania 1871. — ibid. p. 386. 1875. — Gött. Nachr. p. 245. 1876. — Compt. Rend. 1879, 1881. — Journ. de Phys. 1880. — Bestätigende hydrodynamische Versuche wurden gemacht von Bjerknæs und Schjötz, Gött. Nachr. p. 291. 1877.

Newton'schen Gesetze an, wenn ihre Dimensionen sehr klein im Vergleich zu ihrer Entfernung sind; sind ihre Schwingungsphasen gerade entgegengesetzt, so stossen sie sich ab. Das Problem ist ferner behandelt von Stokes<sup>1)</sup>, Hicks<sup>2)</sup>, Pearson<sup>3)</sup>, Basset<sup>4)</sup>, Riecke<sup>5)</sup>, Voigt<sup>6)</sup>. — Zur Erklärung der electrostatischen Wirkung ist das Vorzeichen, mit welchem diese hydrodynamischen Kräfte auftreten, hinderlich. Es sind mehrfach die Voraussetzungen abgeändert worden, um eine Umkehr des Vorzeichens zu erreichen. Schwedoff<sup>7)</sup> glaubte dieses Resultat durch Ersatz der incompressibelen Flüssigkeit durch eine compressibele zu erreichen, Bäcklund<sup>8)</sup> durch Aenderung der Pulsationsform der Kugeln. Beide Resultate sind aber von Korn<sup>9)</sup> beanstandet worden. Letzterer sucht jenes Resultat zu erreichen, indem er die Kugeln von poröser Oberfläche annimmt, in welche die incompressibele Flüssigkeit periodisch ein- und ausströmen kann. Ausserdem soll die Oberfläche der Kugeln selbst auch Pulsationen ausführen. Leahy<sup>10)</sup> hat gezeigt, dass bei Pulsationen in einem festen elastischen Medium jene Umkehr des Vorzeichens möglich ist.

---

1) G. Stokes, Papers **1.** p. 230. 1880.

2) Hicks, Trans. Roy. Soc. 1880. (2) p. 455. — Proc. Cambr. Phil. Soc. **3.** p. 276; **4.** p. 29. 1880.

3) Pearson, Quart. Journ. Math. **20.** p. 60. 184. 1883. (Uebertragung auf Ellipsoide.)

4) Basset, Proc. Lond. Math. Soc. **18.** p. 369. 1887.

5) E. Riecke, Math. Annal. **30.** p. 309. 1887. — Gött. Nachr. p. 347. 1888. (Pulsirende Quellen ergeben wechselnde Vorzeichen der Kräfte.)

6) W. Voigt, Gött. Nachr. p. 37. 1891.

7) Schwedoff, Se. de la Soc. de Phys. franç. p. 16. 1880. — Ueber die Gesetze der Verwandlung der Wärme in Electricität. Odessa 1870 (russisch).

8) Bäcklund, Math. Annal. p. 371. 1889.

9) A. Korn, „Eine Theorie der Gravitation und der electricischen Erscheinungen auf Grundlage der Hydrodynamik.“ Berlin 1892. 1894.

10) Leahy, Cambr. Phil. Trans. **14.** (1) p. 45. 188. 1885. Hier wird auch darauf aufmerksam gemacht, dass in einer, selbst sehr wenig compressibelen Flüssigkeit in grosser Entfernung (die die halbe Wellenlänge im Medium überschreitet) Umkehr des Vorzeichens der ponderomotorischen Kräfte eintreten muss. Eventuell kann daher ausserhalb des Sonnensystems das Vorzeichen der Massenwirkung wechseln.

Um die electrodynamische Fernwirkung nachzuahmen, dienen pulsirende Ringe etc. Man kann sich aber wohl nicht verhehlen, dass alle diese theoretischen und experimentellen Untersuchungen ein hohes hydrodynamisches Interesse haben, aber zur Erklärung der Fernwirkungen im Aether nicht voll befriedigen können. Zunächst sind die Electro-Inductionswirkungen nicht gegeben und die Identität mit den Maxwell-Hertz'schen Grundgleichungen der electricischen Theorie nicht erreicht; und selbst wenn man diese hydrodynamischen Versuche nur zur Erklärung der Gravitation heranziehen wollte, so ist doch die von der Temperatur unabhängige, bei allen ponderabeln Theilchen mit gleicher Periode und Phase stattfindende Pulsation eine recht künstliche Voraussetzung.

Ueberhaupt steht jedes Bild zur Erklärung der Gravitation, welches fortdauernde Schwingungen benutzt, an Einfachheit zurück hinter den nun zu besprechenden Bildern der Stossvermittlung. Denn zu einer Schwingung ist stets eine das Gleichgewicht erhaltende Kraft und eine Art Trägheit (oder Selbstinduction) erforderlich, und solange man in dieser Beziehung das Zustandekommen der Schwingung nicht näher erläutert, ersetzt man nur das Räthsel der Schwerkraft durch andere complicirtere, künstlich geschaffene Räthsel.

b) *Stossvermittlung*. Der Begründer der hier zu besprechenden Klasse von Theorien ist Le Sage.<sup>1)</sup> Nach ihm sollen aus dem Unendlichen (ultramundane) Körperchen in allen verschiedenen Richtungen herbeiströmen und beim Auftreffen auf die materiellen Körper, denselben einen Stosseffect ertheilend, mit etwas vermindeter Geschwindigkeit weiter gehen.<sup>2)</sup> Ein völlig isolirter materieller Körper bleibt in Ruhe, weil die von allen Seiten in gleicher Stärke wirkenden Stösse der ultramundanen Theilchen sich gegenseitig neutralisiren, zwei materielle Körper *A* und *B* müssen aber gegeneinander getrieben werden, weil der Körper *A* den Körper *B* theilweise schirmt auf der nach *A* zu liegenden Seite. Es lässt sich nun leicht

1) Le Sage, „Lucrèce Newtonien, Nouv. Mém. de l'acad. Roy. de Berl. 1782. p. 404. Vgl. auch P. Prévost, Deux Traités de Phys. Méc. Paris 1818.

2) Wie dies zu denken ist, folgt aus der unten erörterten Porosität der Körper.

übersehen, dass diese Schirmwirkung, und daher auch die scheinbare Fernkraft zwischen  $A$  und  $B$  umgekehrt proportional dem Quadrate ihrer gegenseitigen Entfernung sein muss.<sup>1)</sup> Grössere Schwierigkeiten macht die Proportionalität der Kraft mit den Massen der Körper  $A$  und  $B$ . Jede Stosswirkungstheorie ergiebt zunächst einen Effect, der proportional zu der Oberfläche der Körper ist. Um die Proportionalität mit der Masse zu erhalten, wird angenommen, dass die ponderablen Körper für die stossenden Aetherströme ungeheuer porös sind, indem jeder Körper aus sehr kleinen Molecülen oder Atomen bestehen soll mit relativ sehr grossen Zwischenräumen. Um den Zusammenhang der ponderablen kleinsten Theilchen zu einem zusammenhängenden Gebilde zu begreifen, können dieselben durch feste Stäbchen miteinander verbunden sein. Man erhält dadurch als Bild der Materie sogenannte Kastenatome. Es würden dadurch ungeheuer viel mehr Aetheratome (ultramundane Körperchen) durch die Materie hindurchgehen, als gegen sie anprallen. Der Stosseffect wäre immer noch proportional der getroffenen Oberfläche, die wirkliche Oberfläche eines Körpers ist aber zu unterscheiden von der scheinbaren Oberfläche, erstere ist der Anzahl der Atome proportional und damit der Masse, d. h. einer von der scheinbaren Oberfläche unabhängigen constanten Eigenschaft eines ponderablen Körpers.

In der Theorie von Le Sage haben die durch einen ponderablen Körper hindurchtretenden Aetherströme an Energie eingebüsst. Man könnte sich dies zunächst so denken, dass

---

1) In einigen physikalischen Lehrbüchern findet sich die Behauptung, dass jede sich stetig durch den Raum ausbreitende Kraft proportional zu  $1/r^2$  sein müsse. Dieser Schluss würde aber nur gestattet sein, wenn man die auf jeder Ausbreitungsfläche in summa vorhandene Kraft (nach der Flächennormale genommen) als constant annehmen darf. Mit dem Energieprincip ist diese Annahme absolut nicht zu rechtfertigen und man kann ja auch thatsächlich leicht Fälle finden (z. B. bei einem Molecularmagneten), in denen die Kraft nicht proportional zu  $1/r^2$  ist. Ein solcher deductiver Schluss ist also falsch, und es ist z. B. die grundlegende Bedeutung des Coulomb'schen Gesetzes als eine Erfahrungsthatfache durch keine Ueberlegungsgründe zu ersetzen. Der Maxwell'sche und Faraday'sche Begriff der Kraftlinienzahl gründet sich erst auf reine Erfahrungsthatfachen.

dies deshalb geschieht, weil eine allerdings verhältnissmässig kleine Zahl von Aetheratomen an den materiellen Atomen reflectirt ist.<sup>1)</sup> Von dieser Reflexion sieht Le Sage einfach ab; wie daher Vaschy<sup>2)</sup> bemerkt, ist die Le Sage'sche Betrachtung unstreng. Die gegenseitige Schirmwirkung zweier materieller Körper *A* und *B* kann theilweise, wahrscheinlich sogar ganz<sup>3)</sup> compensirt werden durch den Reflexionseffect an den einander zugewandten Seiten von *A* und *B*. Es ergibt sich aus der Le Sage'schen Betrachtung eine fortdauernde Verminderung der Energie des Universums und in der That soll nach Le Sage die Gravitation ein Ende haben.

Um nun mit dem Princip der Erhaltung der Energie in Uebereinstimmung zu bleiben und trotzdem keine volle Compensation der Schirmwirkung zweier Körper *A*, *B* durch die Reflexionswirkung zu erhalten, macht W. Thomson<sup>4)</sup> die Annahme, dass bei der Reflexion der Aetheratome an den materiellen Atomen nur ihre fortschreitende Energie, welche für die Gravitationswirkung allein in Betracht kommt, Einbusse erleide, dass sich diese Energiedifferenz dagegen in vermehrte innere Energie (Rotations- und Vibrationsbewegung) der Aetheratome umsetze. Für diese reflectirten Atome stellt sich allmählich beim Stoss mit anderen Aetheratomen das normale Verhältniss ihrer fortschreitenden Energie zur inneren Energie wieder her, denn es ist ein von Maxwell<sup>5)</sup> gefundener Satz

1) Von der Energie dieser Aetheratome wäre nur ein Bruchtheil in Abzug zu bringen, der sich nämlich auf die rückwärts reflectirten Atome bezieht. Die sehr schief reflectirten Atome dagegen würden trotzdem einen Energiebetrag zum durchströmenden Aether liefern.

2) M. Vaschy, Journ. de Phys. (2) 5. p. 165. 1886.

3) Eine erschöpfende mathematische Analyse habe ich über diesen Punkt nicht finden können. Diese muss um so weniger überflüssig erscheinen, als A. Jarolimек (Wien. Ber. (2) 88. p. 897. 1883) durch Reflexionswirkungen die Molecularkräfte (Repulsion z. B.) erklären will. Auch Maxwell (Encyclop. Brittan. 9. edit. Artikel „Atom“) sagt, dass keine Gravitationswirkung eintreten könne, falls nicht die Aetheratome bei der Reflexion einen Verlust an fortschreitender kinetischer Energie erfahren. Ebenso schliesst P. du Bois-Reymond in Naturw. Rdsch. 3. p. 169. 1888.

4) W. Thomson, „On the Ultimundane Corpuscles of Le Sage.“ Proc. Roy. Soc. Edinb. 7. p. 577. 1872.

5) Cl. Maxwell, Cambr. Phil. Trans. 12. 1878.

der kinetischen Gastheorie, dass im stationären Zustande constante Verhältnisse der einzelnen Energieantheile sich herstellen.

Nach dieser Thomson'schen Modification der Le Sage'schen Theorie würde also die Energie erhalten bleiben, auch die Gravitation nicht allmählich mit der Zeit abnehmen; aber es ist zu bemerken, dass Thomson sogar die Aetheratome als körperliche Gebilde auffasst, da sie ausser translatorischer auch innere (rotatorische und vibratorische) Energie besitzen sollen. Nach der Auffassung Thomson's, dass jedes Atom ein Wirbelring<sup>1)</sup> sei, ist ja natürlich die Möglichkeit innerer Energie zulässig, aber es ist hier wohl daran zu erinnern, dass man aus dem Verhältniss der specifischen Wärmen die Ausdehnungslosigkeit, d. h. das Fehlen innerer kinetischer Energie, schon bei materiellen Molecülen, nämlich bei den einatomigen Gasen (z. B. Quecksilberdampf), erschlossen hat. Dieser Schluss gründet sich auf gewisse Vorstellungen der kinetischen Gastheorie, die gerade in diesem Gebiete eine gute experimentelle Bestätigung erfahren durch den Vergleich der einatomigen mit den zwei- und mehratomigen Gasen.

Ausserdem ist in der Thomson'schen Theorie noch der Schluss willkürlich, dass sich beim Stoss stets die translatorische Energie des Aetheratoms zu Gunsten seiner inneren Energie umsetzen solle, denn es sind offenbar auch Stösse denkbar, bei denen das Umgekehrte eintritt. Auf letzteren Punkt hat Isenkrahe<sup>2)</sup> aufmerksam gemacht.

In anderer Weise erklärt Rysánek<sup>3)</sup> den Energieverlust der Aetheratome bei ihrem Aufprallen auf die Materie, indem er annimmt, dass von ersterem auf letztere fortdauernd Energie übertragen wird und dadurch die innere Wärme der Himmelskörper entstehe. Für die Deckung des Strahlungsverlustes der Sonne würde in der That auf diese Weise ein wesentlich anderer Gesichtspunkt gewonnen sein.<sup>4)</sup> Rysánek macht aber

---

1) W. Thomson, „On Vortex atoms“, Proc. Roy. Soc. Edinb. **6**. p. 94. 1869.

2) C. Isenkrahe, Ztschr. f. Math. u. Phys. **37**. p. 163. Suppl. 1892.

3) A. Rysánek, Exner's Repertor. **24**. p. 90. 1888.

4) Dieser ist wohl zuerst von Leray in Compt. Rend. **69**. p. 615. 1869 ausgesprochen worden.

darauf aufmerksam, dass dieser, die Gravitation veranlassende Aether wesentlich verschieden sein muss vom Lichtäther, weil die mittlere fortschreitende Geschwindigkeit des ersteren weit grösser als  $5 \cdot 10^{19}$  cm/sec sein müsste, damit der Neptun keine beträchtliche Störung seiner Bewegung durch den Widerstand des Aethers erfährt. Zu ähnlichen Resultaten führen die weiter unten zu besprechenden Untersuchungen von Bock. — Auch Browne<sup>1)</sup> betont dieses Resultat der Verschiedenheit des hypothetischen Schwereäthers und des Lichtäthers: da nach Maxwell'schen Untersuchungen die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit in einem Gase  $\sqrt{5}:3$  mal so gross, als die fortschreitende mittlere Geschwindigkeit der Gaspartikelchen ist, so würde für letztere, wenn man für erstere die Lichtgeschwindigkeit einsetzt, ein Werth resultiren, der für den Schwereäther viel zu gering wäre, in Anbetracht des unmerklichen Bewegungswiderstandes, den die Himmelskörper bei ihrer Bewegung erfahren. Browne schliesst daher, da er zwei verschiedene Aether für eine zu grosse Complication hält, dass die Gravitation nicht auf Nahewirkung zu reduciren möglich sei.

Die von Rysánek benutzte Energieübertragung des Aethers auf die Materie könnte zu einem Einwande Anlass geben, den Maxwell<sup>2)</sup> ausgesprochen hat: Im stationären Zustande müssen die mittleren kinetischen Energien der aufeinander prallenden Theile gleich sein. Da nun die kinetische Energie eines Aetheratoms in Anbetracht seiner ungeheuren Geschwindigkeit sehr gross ist, wofern wenigstens die Anzahl der Aetheratome in der Volumeinheit nicht ausserordentlich gross ist, so müssten die ponderablen Molecüle durch den Aetherhagel in Weissgluth gerathen. Indess kann man sich diesem Einwande entziehen, wie Preston<sup>3)</sup> betont, da man die Anzahl der Aetheratome in der Volumeinheit beliebig hoch annehmen

1) W. R. Browne, Phil. Mag. (5) 10. p. 437. 1880.

2) Cl. Maxwell, Encyclop. Britann. 9. Edit. Artikel „atom“, p. 46. 1875.

3) S. T. Preston, Sitz.-Ber. d. k. Acad. d. Wiss. zu Wien 2, 87. p. 795. 1883; Andere Publicationen dieses Autors über die Gravitation sind: Phil. Mag. (5) 4. p. 206. 364. 1877; 5. p. 117. 299. 1878; 11, p. 38. 1881; Nature 48, p. 103, 1893; Dissertation, München 1894.

kann, sodass auf jedes Atom nur ein mässiger Energiebetrag fällt.

Preston führt aus, dass man sich die nach allen Richtungen stattfindenden Aetherströme Le Sage's anschaulich nach der kinetischen Gastheorie vorstellen könne, wenn die mittlere Weglänge der Aetheratome sehr gross angenommen wird, mindestens so gross, wie die Planetenentfernungen.<sup>1)</sup> In der That kann ja in einem Gase auch nach der kinetischen Vorstellung kein Bewegungsantrieb zwischen zwei ponderablen Körpern bestehen, wenn ihre Distanz gross ist im Vergleich zur mittleren Weglänge der Gasmolecüle. Denn in Räumen, die gross sind gegen diese Weglängen, besteht nothwendig überall derselbe Druck. Preston schliesst sich der Thomson'schen Auffassung hinsichtlich des Verlustes der fortschreitenden kinetischen Energie der Aetheratome bei der Reflexion an der Materie an, das normale Verhältniss der fortschreitenden zur inneren kinetischen Energie der Aetheratome kann innerhalb der freien Weglänge natürlich nicht wiederhergestellt werden, sondern erst nach Aufprallen auf zahlreiche andere Aetheratome, d. h. in Räumen, die die freie Weglänge weit übertreffen. Daher muss eine Gravitation zweier so weit entfernter materieller Körper überhaupt nicht mehr bestehen, auch wenn ihre Massen noch so gross wären. Dies würde eine sehr beachtenswerthe Folgerung der kinetischen Theorie sein, und in anschaulicher Weise die oben pag. XXIX von C. Neumann und Seeliger aus Ueberlegungsgründen eingeführten Absorptionscoefficienten der Gravitation erklären<sup>2)</sup>.

Indess ist bei strengerer Betrachtung die Preston'sche Theorie noch zu ergänzen, wie Jarolimek<sup>3)</sup> gezeigt hat. Man muss berücksichtigen, dass die freien Weglängen der Aetheratome zwischen sehr grossen und sehr kleinen Grenzen schwanken, nur der Mittelwerth ist constant. Zur Gravitation

1) Bei genügender Kleinheit der Aetheratome ist dies vorstellbar, selbst wenn die Anzahl der Aetheratome in der Volumeinheit sehr gross ist.

2) Eine wirkliche Absorption würde ja natürlich diese Preston'sche Vorstellung nicht bedeuten, und das ist zur Veranschaulichung des Vorganges auch sehr günstig.

3) A. Jarolimek, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Wien (2) 88. p. 897. 1883.

zwischen zwei Körpern  $A$  und  $B$  können in der That nur solche Atome wirken, deren Weglänge die Distanz  $r$  der Körper  $A$ ,  $B$  überschreitet. Je kleiner  $r$  ist, um so mehr Aetheratome müssen *allein schon aus diesem Grunde* für die Gravitation wirksam werden, und wenn man ausser diesem Grunde noch, wie gewöhnlich, die Abhängigkeit der Schirmwirkung des Aetherhagels von  $r$  proportional zu  $1/r^2$  annimmt, so resultirt im Ganzen, dass die Gravitation schneller wie  $1/r^2$  wachsen muss, wenn  $r$  kleiner wird. Jarolimek zeigt nun aber, dass diese gewöhnliche Ableitung der Abhängigkeit der Schirmwirkung von  $r$  überhaupt falsch ist in Anbetracht der angenommenen enormen Porosität<sup>1)</sup> der materiellen Körper. Nimmt man an, dass letztere nur aus Aggregaten von dimensionslosen Atomen bestehen, so schützt ein Atom  $a$  ein anderes Atom  $b$  nur vor dem Stoss eines einzigen Aetheratoms, welches gerade in der Richtung ihrer Verbindungslinie fliegt, und diese Schirmwirkung ist ganz unabhängig von der relativen Entfernung  $r$  zwischen  $a$  und  $b$ .<sup>2)</sup> Daher besteht eine Abhängigkeit der Gravitation von  $r$  überhaupt nicht wegen wechselnder Schirmwirkung, sondern nur wegen des ersten, von Jarolimek angeführten Grundes, und diese allein liefert das Newton'sche Gesetz in Folge des Satzes: es sind  $n^2$  mal soviel Aetheratome vorhanden, deren Weglängen mindestens gleich  $r$  sind, als Atome, deren Weglängen mindestens gleich  $nr$  sind. — Da nach Jarolimek die Gravitation sich bis zu den grössten erreichbaren Weglängen erstreckt, und diese keine angebbare endliche obere Grenze haben, so würde also auch die Gravitation in jeglichen Distanzen noch wirken.

Wenn auch dieses letztere Resultat Jarolimek's, wie mir wenigstens scheint, durch eine ausführlichere Analyse corrigirt

---

1) Diese muss ja in der That angenommen werden, um die Gravitation proportional mit der Masse zu bekommen, vgl. oben p. XXXVIII.

2) Mir scheint, dass man auf diesem Wege auch das Resultat erhält, dass in molecularen Distanzen andere Attractionsgesetze gelten. Denn wenn  $a$  und  $b$  sich sehr nahe kommen, so können sie nicht mehr als dimensionslos im Vergleich mit  $r$  aufgefasst werden. Es folgt dann eine Attraction, die proportional zu  $1/r^m$  ist, wo  $m > 2$ . — Andererseits sollen sich bei noch grösserer Nähe von  $a$  und  $b$  Repulsionen durch die Reflexionen der Aetheratome ergeben, wie Jarolimek behauptet. Es könnte also in dieser Weise die Elasticität der Materie veranschaulicht werden.

werden sollte, so trägt die Arbeit Jarolimek's jedenfalls sehr zur Klärung bei; denn es wird in ihr zum ersten Male mit vollem Rechte betont, dass man die völlig porösen materiellen Körper nicht so behandeln darf, als ob sie unporös wären.

Um den (zur Gravitationserklärung nothwendigen) Verlust der fortschreitenden kinetischen Energie der Aetheratome einzuführen, verfährt Isenkrahe<sup>1)</sup> von ganz anderem Standpunkte, indem er direct das Princip der Erhaltung der Energie verwirft und an den Stoss unelastischer Körper anknüpft. Nach Isenkrahe würde man nur ein Räthsel durch ein anderes ersetzen, wollte man zur Gravitationserklärung die räthselhafte Elasticität mit heranziehen. Ausserdem glaubt dieser Autor einen directen Beweis zu erbringen, dass man den unelastischen Stoss verwenden müsse. Er fragt nämlich zunächst, welchen Einfluss hat eine isolirte materielle Kugel auf den umgebenden Aether, wenn derselbe nach den Gesetzen des elastischen Stosses an ihr abprallt? Antwort: Gar keinen. Folglich können auch 2 Kugeln keinen Einfluss haben, und umgekehrt der Aether auf sie nicht, d. h. sie könnten nicht gravitiren. — Wenn wir nun zwar auch gesehen haben, dass sehr wahrscheinlich zur Gravitationserklärung ein Verlust an fortschreitender kinetischer Energie der Aetheratome nothwendig anzunehmen ist, so ist doch diese Isenkrahe'sche Beweisführung nicht stichhaltig. Denn der Fall zweier Kugeln ist ein wesentlich anderer, als der einer isolirten Kugel, weil bei ersterem die vollkommene Symmetrie gestört wird.

Die Abneigung Isenkrahe's zur Benutzung der Gesetze des elastischen Stosses aus philosophischen Gründen scheint mir aber ebenfalls durchaus ungerechtfertigt. Bei der Gravitationserklärung will man ein Bild construiren, welches andere beobachtbare Erscheinungen benutzt, die uns möglichst anschaulich, d. h. verständlich sind. In Wirklichkeit beobachtet man nun aber bei keinem Stosse eine wirkliche Energieverminderung, der unelastische Stoss ist insofern nur viel com-

---

1) C. Isenkrahe, „Das Räthsel der Schwerkraft“, Braunschweig, 1879. — Vgl. auch Ztschr. f. Math. u. Phys. **37**. p. 163. Suppl. 1892. — „Ueber die Fernkraft und das durch Paul du Bois-Reymond aufgestellte dritte Ignorabimus“, Leipzig, Teubner, 1889. Referirt in Wied. Beibl. p. 676. 1890.

plicirter, als der elastische Stoss, weil sich bei ersterem mechanische Energie in innere Wärmeenergie umsetzt. Eine Vereinfachung der Anschauungen wird daher durch Voraussetzung unelastischer Stösse nicht erreicht, sondern nur eine Complication. Man kann wohl die Aetheratome als vollkommen hart<sup>1)</sup> voraussetzen, ohne auf das Energieprincip, d. h. die Gesetze des elastischen Stosses, verzichten zu müssen.

Ausserdem erhält man bei Anwendung des unelastischen Stosses die Schwierigkeit, dass fortwährend einige Aetheratome an den ponderabeln haften bleiben müssen, die durch keinen Stoss anderer Aetheratome würden fortgetrieben werden. Die Stossfläche, d. h. die Masse der Materie, müsste also fort-dauernd zunehmen.

Was die vorausgesetzte Porosität der Materie anbelangt, so macht Isenkrahe mit Recht auf folgende Schwierigkeit aufmerksam: Die volle Geltung des Satzes, dass die Gravitation proportional der Masse eines Körpers sei, besteht nur dann, wenn die Aetheratome gar nicht durch die Materie aufgehoben würden. Andererseits würde dann aber auch keine Gravitationswirkung resultiren. Diese Schwierigkeit ist aber durch die von Bock<sup>2)</sup> angestellte mathematische Analyse hinweggeräumt: Der Stosseffect  $S$  des Aethers soll nach Passiren einer Schicht Materie von der Dicke und Dichte 1 den Werth besitzen:  $S(1 - \kappa)$ . Es könnte  $\kappa$  das Absorptionsmaass der Aetherbewegung genannt werden. Indem nun die Rechnungen bis auf Potenzen  $\kappa^2$  durchgeführt werden, ergibt sich, dass die Constante  $f$  im Newton'schen Attractionsgesetz:

$$K = f \frac{mm'}{r^2}$$

proportional zu  $\kappa^2$  ist, also allerdings sehr klein, bei kleinem  $\kappa$ , aber doch nicht Null.

1) Nach Isenkrahe soll die vollkommene Härte mit dem Energieprincip unvereinbar sein. Mir ist das unverständlich, da ein vollkommen harter Körper ein vollkommen elastischer Körper mit unendlich grossem Compressions- und Deformationswiderstand ist. Auf die Grösse der Deformationen kommt es aber für die Anwendbarkeit der Gesetze des elastischen Stosses gar nicht an.

2) A. M. Bock, „Die Theorie der Gravitation etc.“ Dissertation, München 1891.

Bock drückt ferner  $\kappa^2$  durch  $f$ , durch die Dichte des Aethers, und die Geschwindigkeit der Aetheratome aus. Wählt man für letztere die Lichtgeschwindigkeit, ferner die Thomson'sche Zahl ( $3.10^{-23}$ ) der Aetherdichte, so ergiebt sich  $\kappa > 300$ , also viel zu gross. Um  $\kappa$  genügend klein zu erhalten, um ferner keinen merkbaren Bewegungswiderstand den Planeten in ihrer Bahn zu erhalten, muss die Aetherdichte wesentlich kleiner als die Thomson'sche Zahl, die Geschwindigkeit der Aethermolecüle ganz bedeutend grösser als die Lichtgeschwindigkeit angenommen werden. Immer bleibt dann aber noch eine andere Schwierigkeit bestehen, auf die Bock speciell für die Isenkrahe'sche Gravitationstheorie aufmerksam gemacht hat, die aber wohl in gleicher Weise für alle Stosstheorien gelten würde: Durch Dazwischentreten oder überhaupt Vorhandensein eines dritten Körpers wird die gegenseitige Attraction zweier anderer Körper stark modificirt. Dies würde z. B. bei Mondfinsternissen zu Widersprüchen mit der Beobachtung führen.

Von anderen Stosstheorien, welche zum Theil zu Einwänden Anlass geben, jedenfalls aber nicht einen Fortschritt gegenüber den hier besprochenen kennzeichnen, sind noch anzuführen:

Leray, „Theorie nouvelle de la gravitation“, Compt. Rend. **69**. p. 615. 1869. Besprochen von Taylor, Smiths. Report 1876. Im wesentlichen Le Sage'sche Theorie, Ergänzung der Sonnenstrahlung durch Uebertragung der Energie des Aethers, vgl. Rysánek, oben p. XL.

H. Schramm, „Die allgemeine Bewegung der Materie als Grundursache der Naturerscheinungen.“ Wien 1872. — Vgl. auch Schlömilch's Zeitschr. **17**. p. 99. 1872. (Besprochen von Isenkrahe, Räthsel der Schwerkraft.)

Crookes, Phil. Trans. Roy. Soc. **164**. p. 527. 1874. (Besprochen von Taylor, Smiths. Report.)

H. Fritsch, „Theorie der Newton'schen Gravitation und des Mariotte'schen Gesetzes“, Progr. d. städt. Realgymn. Königsberg 1874. (Besprochen von Isenkrahe). — „Beiträge zur Theorie der Gravitation“, ibid. 1886. (Einfluss longitudinaler Wellen.)

Picart, „Explication des actions à distance etc.“ Compt.

Rend. 83. p. 1042. 1876. (Le Sage'sche Theorie, in Moleculardistanzen soll Repulsion sich ergeben.)

M. Vaschy, „Sur la nécessité de la loi d'attraction de la matière“, Journ. de phys. (2) 5. p. 165. 1886. (Aus der Oscillation der Materie soll Gravitation folgen, ohne Energieverlust der Aetheratome beim Stoss.)

Ueberblicken wir das Gesamtergebn, welches aus den Erklärungsversuchen der Gravitation durch Nahwirkungen gezogen werden kann, so ist dasselbe kein voll befriedigendes zu nennen.<sup>1)</sup> Die Stosstheorien allein würden anschauliche Bilder liefern und sie geben auch direct Gesichtspunkte, um interessante neue experimentelle Ergebnisse zu entdecken; aber der Erfolg hat diesen Erwartungen bisher nie entsprochen. So würde es nach den Stosstheorien wohl wahrscheinlich sein, dass die Anordnung der materiellen Atome von Einfluss auf das Gewicht sein müssten. Indess die oben (p. XXXII) genannten Versuche von Mackenzie und Kreichgauer haben diesen Schluss nicht bestätigt. — Ferner würde, wie Isenkrahe bemerkt, die relative Geschwindigkeit zweier Körper Einfluss auf ihre Attraction haben müssen, sowie ihre Geschwindigkeit vergleichbar mit der der Aetheratome wird. Aber aus den astronomischen Beobachtungen lässt sich, wie oben referirt wurde, nicht mit überzeugendem Zwange die Nothwendigkeit der Einführung einer Art Weber'schen Gesetzes für die Gravitation nachweisen.

Für alle Stosswirkungstheorien bleibt zudem die Schwierigkeit bestehen, dass die Gravitation zwischen zwei Körpern durch die Anwesenheit anderer Körper beeinflusst erscheint (vgl. Bock).

Selbst wenn auch dieser Punkt durch gewisse Modificationen der Theorien noch hinweggeräumt würde, so geht doch aus allen bisherigen Entwicklungen und astronomischen Untersuchungen hervor, dass man den die Gravitationserscheinungen

1) So schliesst ausser Maxwell, Taylor, Browne, P. du Bois-Reymond auch H. Gellenthin, „Bemerkungen über neuere Versuche, die Gravitation zu erklären, insbesondere über Isenkrahe's Räthsel von der Schwerkraft“, Progr. Realgymn. Stettin 1884.

nungen veranlassenden Aether nicht mit dem Lichtäther identificiren könnte, dass also eine Vereinfachung in der Naturbeschreibung durch Ersatz der Gravitation durch Nahwirkungen nicht erreicht wird. Es müsste ja von der höchsten Bedeutung sein, wenn die Erscheinungen der Gravitation nicht völlig eines Zusammenhanges mit den electricisch-magnetischen Erscheinungen entbehrten. Aber auf einen solchen Zusammenhang deuten bisher weder die aufgestellten Theorien, noch irgend welche Erfahrungen. Ein Versuch zur Auffindung letzterer ist vergeblich von Faraday im Jahre 1850 gemacht worden, indem er einen Inductionsstrom beim freien Fall eines Leiters nachzuweisen sich bemühte.<sup>1)</sup>

Aber trotzdem sollen wir nicht mit einem resignirten „Ignorabimus“<sup>2)</sup> einfach verzichten, über die Gravitation weiter nachzudenken. „Denn der wissenschaftliche Werth der Frage: Wie wirken zwei Körper aufeinander, liegt in dem Ansporn zur Untersuchung der Eigenschaften des zwischenliegenden Mediums.“<sup>3)</sup> Die genannten Stosswirkungstheorien zeigen zur Genüge, wie sie zu Experimenten oder Fragestellungen der Wirklichkeit drängen. Bisher kennen wir von den Eigenschaften des Vacuums nur die eine, nämlich die Lichtfortpflanzungsgeschwindigkeit. Erst wenn es gelingt, noch mehrere Eigenschaften zu entdecken, sagen wir z. B. die endlichen Grenzen des Gravitationsgesetzes, so ist Hoffnung vorhanden, die sogenannte Gravitationsconstante mit anderen Erscheinungen oder Thatsachen in numerische Beziehung setzen zu können. Denkbar ist, dass kein grob-sinnliches Bild der Mechanik für die Gesamtheit der Erscheinungen je ausreichend sein wird. Sollte aber eine Nahwirkungstheorie durch Stossvermittelung im vollen Einklang mit sämtlichen Erfahrungen stehen, so wird sich dann auch aus der Masse eines Körpers auf seine wahre Oberfläche, d. h. auf die Gesamtheit der Oberfläche seiner Atome, und auch auf die des Einzelatoms schliessen

---

1) Vgl. Taylor, Smiths. report p. 229—236. 1876.

2) P. du Bois-Reymond, Naturw. Rundsch. 3. p. 169. 1888, behauptete mit diesem Worte die Unmöglichkeit eines näheren Begreifens der Gravitation.

3) Dies sind Worte von Maxwell in der Encyclop. Britt. 9. edit. Artikel „Attraction“ oder Werke 2. p. 485.

lassen. Denn nach jeder Stossvermittlungstheorie der Gravitation muss die **Masse** von der Dimension einer **Fläche** sein.

Es ist auch dann Hoffnung vorhanden, dass man ein wirklich absolutes **Maasssystem** wird schaffen können, welches nicht mehr von den Besonderheiten unserer Erde oder eines speciell gewählten Stoffes abhängig ist sondern das an universelle Eigenschaften, an die des Aethers, anknüpft. Die mittlere freie Weglänge der Aetheratome könnte z. B. das Längenmaass sein, das Zeitmaass würde sich dann sofort aus der Lichtgeschwindigkeit ergeben.