

## Werk

**Titel:** Vom mechanischen Äther zur elektrischen Materie

**Autor:** Born, M.

**Ort:** Berlin

**Jahr:** 1919

**PURL:** [https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X\\_0007|log106](https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X_0007|log106)

## Kontakt/Contact

Digizeitschriften e.V.  
SUB Göttingen  
Platz der Göttinger Sieben 1  
37073 Göttingen

✉ [info@digizeitschriften.de](mailto:info@digizeitschriften.de)

von Organen durch Mehrgebrauch und Übung. In Wahrheit ist natürlich mit dieser Gleichsetzung noch keine Erklärung gegeben, denn der Mechanismus der Übungshypertrophie bedarf selbst noch der Erklärung. Daß aber die Dinge noch tiefer liegen, verraten eigentümliche Erfahrungen, die man bei Versuchen gemacht hat, bei normalen Organismen durch Einpflanzung eines Organes oder Organstückes einen Mehrbesitz zu erzielen. Dies gelingt nicht; das Eingepflanzte geht innerhalb kurzer Zeit zugrunde. Solche Versuche wurden angestellt, um als Gegenstück zu Krankheitsbildern, die auf dem Fehlen gewisser Organe mit innerer Sekretion beruhen, solche zu erzeugen, von denen man annimmt, daß sie durch eine erhebliche Steigerung der normalen Leistung des betreffenden Organes zustande kommen. Ganz anders wird die Sache, wenn man vorher das der Untersuchung dienende Organ entfernt hat und nun von einem anderen Individuum der gleichen Art das fehlende Organ ersetzt. Jetzt gelingt die Implantation, erkennbar daran, daß sowohl der morphologische wie auch der funktionelle Beweis für das Erhaltenbleiben des implantierten Organes erbracht werden kann. Der amerikanische Chirurg *Halsted* hat diesen Tatbestand durch den Satz zu formulieren versucht, daß erst der Ausfall die Bedingungen zur Ermöglichung des anatomischen und funktionellen Implantationserfolges schafft. Hier tritt demnach ein neuer Faktor, der Ausfall mit seinen Folgen, in den Mechanismus für die Entstehung der nachfolgenden Anpassung ein. Der Ausfall mit seinen Folgen muß in doppelter Weise wirken, indem er einerseits den Boden verändert, auf dem Einwachsen stattfinden soll, andererseits die individuellen Fremdzellen wachstums- und assimilationsfähig macht, was sie vorher nicht waren. Worin die Bodenveränderungen bestehen könnten, darüber besitzen wir noch keinen Einblick, wohl aber können wir eine Aussage darüber machen, was Zellen zum Wachstum befähigt macht. Die größte Wachstumsbefähigung besitzen Zellen im Embryonalzustande. Es liegt daher nahe, die Annahme zu machen, daß in die Mechanik derjenigen Anpassungsvorgänge, zu deren Ermöglichung gesteigertes Zellwachstum gehört, die Umwandlung der Zellen in solche mit Embryonalcharakter gehört. Möglicherweise spielt dieser Umwandlungsprozeß auch dort eine maßgebende Rolle, wo es sich um den Vorgang der Leistungssteigerung nicht völlig fehlender, sondern nur in ihrer Menge verminderter Organteile handelt. Die Gesamtheit dieser Ausführungen sollte zeigen, daß wir jetzt zwei Faktoren kennen, die in die Mechanik der augenblicklich geschilderten Anpassungsvorgänge eingehen, nämlich Ausfall und Umwandlung von Zellen zu solchen mit embryonalen Eigenschaften.

Nur andeutungsweise sei hier darauf hingewiesen, daß nach *Ehrlichs* geistvoller Seitenkettentheorie der „Ausfall“ ein sehr wichtiges Glied in

der Kette der Ereignisse ist, die zur Immunisierung bei der Injektion von Heilsera führen, Immunisierungen, die wir nicht anders als zu den Anpassungsvorgängen rechnen können. Es muß auf manche bekannte vorzügliche Darstellungen der Ehrlichschen Lehre in der Literatur der Immunitätsforschung verwiesen werden.

Am Schluß unserer Ausführungen angelangt, sollen die wesentlichsten Gesichtspunkte noch einmal hervorgehoben werden, welche aus einer Betrachtung der experimentell beobachtbaren Tatsachen der funktionellen Anpassung sich darbieten. Vielleicht am wichtigsten erscheint mir die Erkenntnis, daß das Vermögen, welches in den Anpassungsvorgängen zutage tritt, eine elementare Eigenschaft jeder belebten Substanz ist, ihr in gleicher Weise und unauslösbar innewohnend, wie andere elementare Lebenseigenschaften, ohne welche wir uns den Bestand des Lebens nicht denken können. Mit dieser Auffassung steht im Einklang, daß Anpassung beobachtet werden kann bis herab zu den letzten Einheiten, welche der Experimentator noch im Besitz des Vollzugs der physiologischen Funktionen zu isolieren vermag. Ferner stimmt damit überein, daß die Anpassung nicht notwendigerweise der Zeit bedarf, um in Wirksamkeit zu treten, sondern daß sie bereit steht, sobald die Erfordernisse es erheischen. Die Anpassung kann auch völlig unabhängig von dem morphologischen Aufbau zur Entfaltung kommen, eine Unabhängigkeit, die eigentlich ein Postulat ist, wenn man sich vergegenwärtigt, daß die Form selbst ein Geschaffenes und nicht ein Schöpfer der Funktion ist, was freilich nicht mit den sekundären funktionellen Leistungen gewisser Formen verwechselt werden darf. Viele Biologen sind geneigt, dem Zufall einen nicht geringen Anteil an dem Werden der Organismen beizumessen. Die hier vorgetragene Auffassung von dem Anpassungsvermögen als einer elementaren Eigenschaft der belebten Substanz entkleidet dieselbe des gedachten Charakters der Zufälligkeit. Sie sind Regeln unterworfen, die zwar anderer Art, aber nicht minder streng sind als diejenigen für die Vorgänge in der unbelebten Natur. Es steht zu hoffen, daß die Behandlung der Anpassung als eines Problems der allgemeinen, funktionell gerichteten Physiologie berufen sein wird, an der Lösung von Fragen mitzuwirken, die mehr erstreben als einen Einblick in die Geschehnisse, welche die individuelle Existenz ausmachen.

### Vom mechanischen Äther zur elektrischen Materie

Von Prof. Dr. M. Born, Berlin.

Es ist noch nicht lange her, da war die physikalische Literatur mit Abhandlungen erfüllt, die die *mechanischen Eigenschaften des Äthers*

erörterten, und einige Überreste solcher Betrachtungen haben sich bis auf unsere Tage erhalten. Im ganzen aber hat sich die Physik neuen Anschauungen zugewandt, die man mit einem kurzen Schlagwort als die *Lehre von der elektrischen Natur der Materie* bezeichnen könnte.

Es handelt sich dabei um eine gründliche Umstellung der Gedankenwelt; was früher als das Einfache, Primäre galt (die Mechanik), wird heute zum Abgeleiteten, Sekundären, und umgekehrt wird das, was ehemals der Zurückführung auf elementare Gegebenheiten bedürftig schien (der Äther als Träger der elektromagnetischen Erscheinungen), zum Fundament des ganzen Gebäudes der Wissenschaft gemacht. Es lohnt der Mühe, diesen Wandel der Ideen zu überblicken und sich klar zu machen, ob er einen Fortschritt der Erkenntnis bedeutet.

Die „Physik des Äthers“ nahm ihren Ausgang am Anfange des 19. Jahrhunderts mit der Optik. In dieser Zeit hatte die Mechanik jene Vollkommenheit erreicht, die sie zur Königin der Wissenschaften machte. Neben der Mechanik der Massenpunkte, die ihre Triumphe in der Astronomie feierte, war die Mechanik der kontinuierlich verbreiteten Medien, die elastische Theorie der Gase, Flüssigkeiten und festen Körper, entwickelt worden. So konnte es nicht ausbleiben, daß die mechanischen Gesetze auch auf die optischen Vorgänge angewandt wurden. Die Lichtwellen wurden mit den elastischen Wellen in materiellen Körpern verglichen; es entstand die erste elastische Theorie des Äthers.

In elastischen Körpern gibt es aber zwei Arten von Wellen, solche, bei denen die Teilchen in der Richtung der Wellenfortschreitung hin- und herschwingen (longitudinale Wellen), und solche, bei denen die Teilchen quer zur Fortpflanzungsrichtung pendeln (transversale Wellen). Es ließ sich nun nachweisen, daß die Lichtwellen streng transversal sind; bis zum heutigen Tage hat man keine Andeutung optischer Longitudinalwellen gefunden. Da nun longitudinale Schwingungen offenbar mit Dichteänderungen verknüpft sind, so mußte man aus dem Fehlen der longitudinalen Lichtwellen schließen, daß der Äther sich nicht (wie ein Gas) zusammendrücken läßt; andererseits aber muß er äußerst elastisch sein, da er (wie ein fester Körper) transversale Wellen sehr gut fortpflanzt.

Man kam also zu dem Schluß: Der Äther ist ein inkompressibler, vollkommen elastischer, fester Körper. Und trotzdem bewegen sich durch den Äther die Himmelskörper mit ungeheuren Geschwindigkeiten völlig reibungs- und störungsfrei.

Neben dieser Denkschwierigkeit traten bei der Durchführung der elastischen Lichttheorie noch andere Mängel zutage, so daß es keines allzu starken Stoßes bedurfte, um diese Lehre zu stürzen.

Dieser Stoß kam durch die elektromagnetische Lichttheorie von *Maxwell*. Danach wird der Äther nicht mehr als elastischer Körper vorgestellt, aber er behält doch die Natur eines kontinuierlich verbreiteten Mediums mit bestimmten Eigenschaften, die als elektrisches und magnetisches Feld in die Erscheinung treten. Schnelle Schwingungen der Felder sind Lichtwellen, ihre Geschwindigkeit läßt sich durch rein elektromagnetische Messungen ermitteln.

Diese Theorie erfordert eine beträchtliche Abstraktion. Was ist eigentlich dieser Äther, der zwar ein kontinuierliches Medium, aber von den bekannten Körpern, seien sie gasförmig, flüssig oder fest, verschieden sein soll? Das Bedürfnis nach Vorstellbarkeit, Bildhaftigkeit der Theorien fordert Zurückführung auf Bekanntes, und schon *Maxwell* ist diesem Bedürfnis durch Angabe mechanischer Modelle für gewisse Eigenschaften des Äthers entgegengekommen. Später ist die Frage der Zurückführung des Maxwellschen Äthers auf mechanische Grundlagen eine ganze Wissenschaft geworden. Besonders große Erfolge hat *Bjerknes* erzielt, der den Äther als Flüssigkeit und die elektrischen Ladungen als pulsierende Kugeln darin auffaßte, eine Lehre, die von *Korn* weiter ausgebaut wurde und noch heute vertreten wird.

Neue Entdeckungen sind auf diesen Wegen nicht gemacht worden. Gleichwohl wäre das Interesse daran vielleicht erhalten geblieben, hätte nicht die Relativitätstheorie die Vorstellung eines materiellen Äthers überhaupt unmöglich gemacht. Allerdings erfordert sie eine noch höhere Abstraktion, einen stärkeren Verzicht auf die gewöhnliche Anschaulichkeit, und darum blickt mancher Physiker wehmütig zurück auf die gute alte Zeit des soliden Äthers (ohne es öffentlich einzugestehen, wie der Amerikaner auf die „good old colonial times“).

Die Erkenntnis schreitet nach der Tiefe durch Abstraktionen fort, in die Breite aber durch die lebendige Anschauung, und wenn die Theorie nichts anderes zuwege gebracht hätte, als die prinzipielle Undurchführbarkeit aller mechanischen Bilder des Äthers und seiner Eigenschaften zu erweisen, so hätte sie der Forschung einen schlechten Dienst geleistet. Aber ein Rückblick auf die Physik in den letzten Jahren zeigt deutlich, daß die Experimentierkunst in enger Fühlung mit der Theorie ihre größten Erfolge erzielt hat; also muß diese wohl der Anschauung, der Intuition neue, lebendige Bilder liefern, die fruchtbarer wirken als die Mechanisierung des Äthers. Das „elektromagnetische Weltbild“ der heutigen Physik mag in den Grundlagen abstrakt genannt werden; in seinem Ausbau ist es reich an Farben und Formen.

Die Quelle dieses Reichtums beruht auf der Vereinigung der abstrakten Maxwellschen Äthervorstellung (bzw. ihrer relativistischen Vertiefung) mit der Atomistik.

Nicht nur die Materie wird heute atomistisch aufgefaßt, die Elektrizität selber wird in Atome, Elektronen genannt, aufgelöst. Atome und Elektronen aber sind anschaulich leicht zu fassen; auch wer dem Formelwust der Maxwell'schen Elektrizitätstheorie mißtrauisch gegenübersteht, kann mit den Bewegungen und wechselseitigen Wirkungen der Elektronen und Atome erfolgreich operieren. Der Höhepunkt dieser Entwicklung ist der Versuch, die Atome selbst aus Elektronen aufzubauen; da in dieser Zeitschrift in letzter Zeit mehrfach über diese Arbeiten, die sich an die Quantenhypothese Plancks anschließen, berichtet worden ist, wollen wir hier nicht darauf eingehen<sup>1)</sup>.

Dagegen wollen wir über einige Fortschritte berichten, die den oben geschilderten Weg vom mechanischen zum elektrischen Weltbilde der Physik besonders grell beleuchten.

Sie betreffen die Konstitution der festen Körper und die Natur der Kräfte, die sie zusammenhalten. Die festen Körper sind entweder amorph (glasig) oder kristallinisch. Doch pflegt man heute nur die Kristalle (bzw. Gemenge von

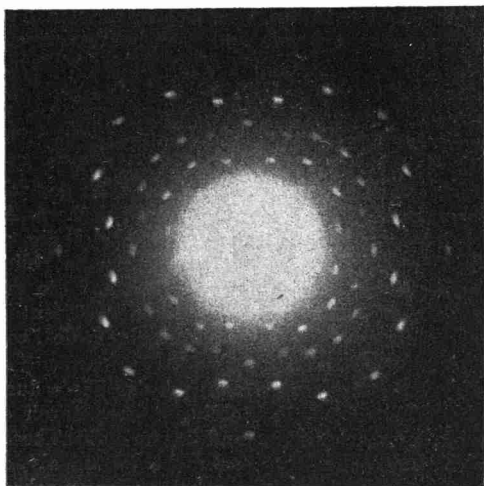


Fig. 1.

Kristallen, wie die meisten Metalle) im eigentlichen Sinne als fest anzusprechen, während die amorphen Substanzen in vieler Hinsicht als besonders zähe Flüssigkeiten zu gelten haben.

Das Wesen der Kristalle ist ihr regelmäßiger Aufbau aus den Atomen und Molekeln. Dieser kann, wie v. Laue entdeckt hat, mit Hilfe von Röntgenstrahlen direkt auf der photographischen Platte sichtbar gemacht werden<sup>2)</sup>. Fig. 1 gibt

<sup>1)</sup> Ausführliche Darstellungen der Quantentheorie und ihrer Anwendungen auf die Atomstruktur findet man in dem Planck-Hefte dieser Zeitschrift (6. Jahrg., Heft 17, 1918).

<sup>2)</sup> Darstellungen dieser Entdeckung und ihrer Ausarbeitung sind in dieser Zeitschrift mehrere erschienen: H. Löwy, 1. Jahrg., S. 105, 1913. A. Sommerfeld,

eine solche Aufnahme eines Steinsalzkristalls (NaCl) wieder<sup>1)</sup>. Wir kennen heute die Feinstruktur oder das „Gitter“ einer großen Anzahl von Kristallen; so ist z. B. das Steinsalz aus Natrium- und Chloratomen nach Art eines „dreidimensionalen Schachbretts“ aufgebaut, wie die Fig. 2 zeigt. Die Kristalle sind also in Wirklichkeit gar keine kontinuierlichen Medien. Es ist vielmehr eine Aufgabe, deren Lösung viel Mühe und Scharfsinn gekostet hat, nachzuweisen, daß solche Raumgitter bei grober Betrachtung sich mechanisch wie die kontinuierlichen Festkörper der alten Elastizitätstheorie verhalten. Der Ausgangspunkt der mechanischen Äthertheorien ist damit eigentlich von Grund aus zerstört; denn diese gehen von dem kontinuierlichen Festkörper als einer durch ursprüngliche Erfahrung oder Anschauung gegebenen Grundlage aus und fordern die Zurückführung aller andern Phänomene auf die Eigenschaften solcher Medien. Nun ist aber doch die kontinuierliche, elastische Substanz einfach eine Täuschung, hervorgerufen durch die Grobheit unserer Sinne. Die scheinbaren Kontinua sind in Wirklichkeit diskontinuierliche Gitter, zwischen ihren Atomen sind Lücken. Denkt man diese durch Äther erfüllt, welchen Sinn hat es dann noch, ihm Eigenschaften zuzuschreiben, die dem Verhalten der Gitter im groben, als scheinbare Kontinua, entsprechen? Dies hieße offenbar, sich im Kreise drehen.

Die heutige Physik nimmt darum einen andern Standpunkt ein, der nicht nur konsequenter ist, sondern auch zu greifbaren Resultaten geführt hat. Das elektromagnetische Feld im Äther wird als empirisch gegeben hingenommen. Der feste Körper, der Kristall, ist eine regelmäßige Anordnung elektrischer Ladungen, die nach den Feldgesetzen aufeinander wirken. Hieraus entspringen jene groben Eigenschaften, die das Kristallgitter mit dem elastischen Kontinuum der alten Mechanik gemein hat.

Diese Auffassung führt nun zu dem Schluß: *die mechanischen, elastischen Kräfte der festen Körper sind in Wahrheit elektrische Kräfte.* Wenn wir die Ladungen und Abstände der Atome in den Kristallgittern kennen, sind aber alle elektrischen Wechselwirkungen grundsätzlich bekannt; es muß also möglich sein, die elastischen Eigenschaften quantitativ vorauszuberechnen.

An dieser Stelle gelangt man über die Streitfragen der theoretischen Auffassung hinaus zu Problemen, deren Lösung die Überlegenheit des neuen Standpunkts durch zahlenmäßige Rechnung erweisen würde<sup>2)</sup>. Der Weg zu dieser Lösung

4. Jahrg., S. 1, S. 13, 1916. F. Rinne, 5. Jahrg., S. 48, 1917. M. Siegbahn, 5. Jahrg., S. 512, S. 528, 1917; außerdem zahlreiche kleinere Mitteilungen.

<sup>1)</sup> Die Figur stammt aus F. Rinne, Beiträge zur Kenntnis der Kristall-Röntgenogramme. 1. Mitteilung. Ber. d. math.-phys. Kl. d. kgl. sächs. Ges. d. Wiss. zu Leipzig. LXVII. Bd., S. 303, 1915.

<sup>2)</sup> In der kinetischen Gastheorie verhielt es sich ähnlich. Auch hier bestand der Gegensatz zwischen

war ziemlich weit. Erst mußten die Zusammenhänge aller möglichen mechanischen, thermischen, elektrischen, optischen Eigenschaften der Kristalle auf Grund der Gittertheorie geklärt und formal auf die Kräfte zwischen den einzelnen Partikeln des Kristallgitters zurückgeführt werden<sup>1)</sup>. Wir wollen die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungen an dem Beispiel des oben erwähnten Steinsalzkristalls erläutern.

Wie wir schon sahen, ist das Gitter dieses Kristalls nicht aus NaCl-Molekeln, sondern aus einzelnen Na-Atomen und Cl-Atomen aufgebaut (Fig. 2); dies wird nicht nur durch die Röntgenaufnahmen nach v. Laue bewiesen, sondern auch durch das thermische Verhalten des Kristalles. Die Wärme der Körper besteht in Bewegungen ihrer kleinsten Teile; bei den Kristallen sind es Schwingungen um Gleichgewichtslagen. Nach einem fundamentalen Satz der statistischen Mechanik verteilt sich bei höheren Temperaturen die Energie dieser Schwingungen auf die einzelnen

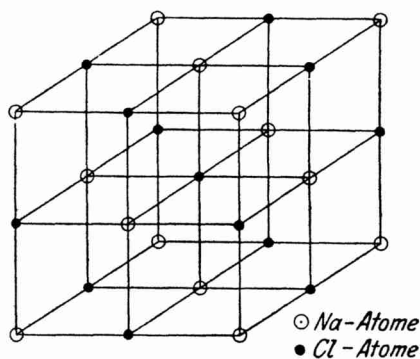


Fig. 2.

Partikel so, daß im Mittel über längere Zeit jedes Partikel *dieselbe* Energie bekommt, deren Betrag aus der kinetischen Gastheorie wohl bekannt ist, gleichgültig, wie das Partikel beschaffen ist. Mit Hilfe von thermischen Messungen läßt sich somit feststellen, wieviele Partikel, jedes mit diesem Energiebetrage versehen, in der Masseneinheit vorhanden sein müssen, damit der beobachtete Wärmehalt herauskommt. Man findet so, daß die Partikel nicht die NaCl-Molekel sein können; denn dann hätte die Masseneinheit nur halb so viele Partikel, als im Falle selbständiger Atome, also auch nur die Hälfte des beobachteten Wärmehalts.

Löst man ein Stück Steinsalz in Wasser auf, so wird die Lösung ein Leiter des elektrischen

Kontinuums- und Atomtheorie, die so lange gleichwertig blieben, als die letztere nur die formalen Zusammenhänge darstellen konnte; erst als es der atomistischen Auffassung gelang, Koeffizienten der Formeln zahlenmäßig zu bestimmen (wie das Verhältnis der spezifischen Wärmen, das Verhältnis der Koeffizienten von Wärmeleitung und innerer Reibung usw.), war ihr Sieg gesichert.

<sup>1)</sup> M. Born, Dynamik der Kristallgitter (B. G. Teubner, Leipzig, 1915).

Stroms, ein sogenannter Elektrolyt. Ein solcher unterscheidet sich von einem metallischen Leiter dadurch, daß der Stromdurchgang mit Transport der gelösten Materie verknüpft ist; das zeigt sich daran, daß sich an den Eintritts- und Austrittsstellen des Stroms (den Elektroden) Natrium bzw. Chlor abscheidet. Faraday hat das Gesetz dieses Vorgangs entdeckt; er fand, daß beim Durchgang einer bestimmten Elektrizitätsmenge immer die gleichen Mengen der beiden Stoffe abgeschieden werden, und zwar solche Mengen, die sich chemisch gerade zu der Verbindung NaCl absättigen („äquivalent“ sind). Man deutet das atomistisch durch die Annahme, daß jedes Atom die gleiche Elektrizitätsmenge transportiert; das Na-Atom trägt ein positives, das Cl-Atom ein negatives Elektrizitätsatom. Man nennt solche geladene Atome „Ionen“. Dieses Elektrizitätsatom hat man bei vielen andern Erscheinungen wieder gefunden, allerdings immer nur das negative; man hat es „Elektron“ genannt. Die positive Ladung ist immer an die Materie gebunden. Das neutrale Atom besteht aus einem positiven Kern, der von einer Anzahl von Elektronen umgeben ist. Das Cl-Ion ist gewissermaßen die chemische Verbindung eines neutralen Cl-Atoms mit einem Elektron. Das positive Na-Ion muß man sich dadurch entstanden denken, daß dem Bestande des neutralen Na-Atoms ein Elektron entrissen ist. Die Größe der Ladung des einzelnen Elektrons ist eine bestimmte Naturkonstante, die man auf mannigfaltige Weise bestimmen kann; sie beträgt  $e = 4,76 \cdot 10^{-10}$  elektrostatische Einheiten.

Wenn man eine solche NaCl-Lösung eindampft, so daß das Steinsalz auskristallisiert, so besteht der Vorgang darin, daß sich die einzelnen Na- und Cl-Atome zu dem oben besprochenen Gitter zusammensetzen. Was wird dabei aus der Ladung der Atome? Tauschen sie diese aus oder behalten sie auch im festen Zustande ihren Ionencharakter?

Die Antwort auf diese Frage hat Madelung<sup>1)</sup> gegeben durch die Deutung einer optischen Eigenschaft der Kristalle wie NaCl. Denken wir uns etwa ein Stück Steinsalz zwischen zwei parallele, geladene Metallplatten gebracht; dann ist das in Fig. 2 dargestellte Gitter einem elektrischen Felde ausgesetzt (Fig. 3). Da nun die Na-Atome positiv, die Cl-Atome negativ geladen sind, werden die ersteren in der Richtung des Feldes, die letzteren in entgegengesetzter Richtung eine Kraft erfahren; diese wird wegen der Festigkeit des Kristallgefüges im allgemeinen nur äußerst kleine Verschiebungen der Na- gegen die Cl-Ionen hervorrufen. Man erinnere sich nun aber an die bekannte Erscheinung der Resonanz; wenn man eine Schaukel im Rhythmus ihrer eignen freien Schwingungen anstößt, kann man sie mit äußerst geringer Anstrengung zu großen Ausschlägen bringen. Ebenso wird ein periodisch wechselndes elek-

<sup>1)</sup> E. Madelung, Nachr. d. K. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, math.-phys. Kl. 1909, 1910.

trisches Feld, wenn sein Rhythmus geeignet gewählt wird, das Kristallgefüge äußerst heftig erschüttern können. Die Lichtwellen sind solche periodischen elektrischen Felder; man wird also erwarten dürfen, daß Licht von geeigneter Schwingungszahl den Kristall merklich beeinflusst und natürlich umgekehrt von ihm beeinflusst wird. *Rubens*<sup>1)</sup> hat diese Wirkung tatsächlich entdeckt; er fand, daß sehr langwelliges (nicht mehr sichtbares) Licht von bestimmter Schwingungsdauer von dem Kristall äußerst stark reflektiert wird, während Licht von ein wenig anderer Schwingungsdauer unbeeinflusst hindurchgeht. Durch mehrfache Reflexionen konnte er dieses selektiv reflektierte Licht sauber isolieren und nannte es deswegen „Reststrahlen“.

Die Reststrahlen beweisen die Ladung der Ionen; daß diese bei Kristallen vom Typus NaCl genau ein Elektron beträgt, hat man dadurch zeigen können, daß die Schwingungsdauer sich aus der Elektronenladung, den Massen der Ionen und den meßbaren elastischen Kräften des Kristalls richtig berechnen läßt.

Neuerdings ist die Ionenladung von *Debye* und *Scherrer*<sup>2)</sup> aber auch direkt durch Röntgen-

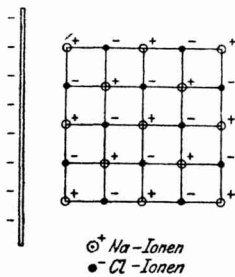


Fig. 3.

aufnahmen nachgewiesen worden. Die Röntgenwellen erschüttern die Elektronen des Atoms und erzeugen dadurch sekundäre Wellen, die von den Atomen ausgehen; diese liefern durch ihre Interferenz die von *Laue* entdeckten Erscheinungen (Fig. 1). Die Stärke der Interferenzflecke wird somit von der Anzahl der in den Atomen vorhandenen Elektronen abhängen; umgekehrt kann man durch Ausmessen der Stärke der Interferenzflecke einen Rückschluß auf die Anzahl der Elektronen der Atome ziehen. Auf diese Weise wurde für den Kristall Lithiumfluorid gefunden, daß das Li-Atom ein Elektron zu wenig, das F-Atom eines zu viel hat gegenüber dem neutralen Zustande. Das Entsprechende gilt unzweifelhaft für alle Salze der Alkalimetalle (Li, Na, K, Rb, Cs) mit den Halogenen (F, Cl, Br, J).

Damit haben wir die Tatsachen gesammelt, die über die Konstitution der Kristalle bekannt

<sup>1)</sup> *Nichols* u. *Rubens*, Wied. Ann. 60, 438, 1897, *Rubens* u. *Aschkinass*, Wied. Ann. 67, 459, 1899. *H. Rubens*, Wied. Ann. 69, 576, 1899, und viele weitere Arbeiten.

<sup>2)</sup> *P. Debye* u. *P. Scherrer*, Phys. Zeitschr. 19, S. 474, 1918.

sein müssen, ehe an eine absolute Berechnung ihrer mechanischen Eigenschaften aus den elektrischen Daten gegangen werden kann<sup>1)</sup>.

Stellen wir uns nun den Steinsalzkrystall mit seinen abwechselnd geladenen Na- und Cl-Atomen vor (Fig. 2), so sehen wir sofort, daß aus den Ladungen notwendig ein Kontraktionsbestreben des Gitters folgt; denn benachbarte entgegengesetzt geladene Teilchen ziehen sich an, gleiche Teilchen stoßen sich zwar ab, aber wesentlich schwächer, weil sie weiter voneinander abstehen und die elektrische Kraft nach dem bekannten Gesetz von *Coulomb* umgekehrt wie das Quadrat der Entfernung abnimmt.

Die strenge Berechnung dieses Kontraktionsbestrebens ist neuerdings *Madelung*<sup>2)</sup> gelungen. Er hat folgendes gezeigt: Man denke sich zunächst alle Ionen in unendlicher Entfernung voneinander und baue sie dann unendlich langsam zu dem Kristallgitter zusammen; wegen des Kontraktionsbestrebens leisten sie dabei eine gewisse Arbeit, die von der absoluten Dimension des Gitters abhängt. Ist  $\delta$  der Abstand zweier längs einer Würfelkante benachbarter gleicher Ionen eines Kristalls vom Typus NaCl, so findet man für diese Arbeit  $13,94 e^2/\delta$ , wo  $e$  die oben genannte Ladung des Elektrons ist.

Warum bleiben nun aber die Ionen in diesem bestimmten, durch  $\delta$  gemessenen Abstände stehen? Warum stürzen sie nicht ganz zusammen? Das läßt sich offenbar nur durch eine Abstoßungskraft erklären, die bei großer Annäherung wirksam wird und dem Kontraktionsbestreben das Gleichgewicht hält. Überlegungen sehr allgemeiner Art führen darauf, für die Arbeit, die diese Kraft bei dem soeben geschilderten Prozeß der Entstehung des Kristalls aus isolierten Ionen leistet, einen Ausdruck der Form  $b/\delta^n$  anzusetzen, wo  $n$  eine ganze Zahl und  $b$  eine Konstante ist; wie nämlich das strenge Kraftgesetz auch beschaffen sein mag, wenn es auf dem Zusammenwirken der elektrischen Ladungen des Atominnern beruht, muß es sich doch mit großer Näherung durch eine solche Formel darstellen lassen.

Die Konstante  $b$  aber läßt sich durch den Ionenabstand ausdrücken. Um das einzusehen, betrachte man als Modell für das Gleichgewicht einer kontrahierenden und einer dilatierenden Kraft (Fig. 4) einen Bogen, jene Waffe primitiver Völker. Das Holz strebt sich gerade zu strecken, die Sehne zieht die Enden zusammen. Würde man die Kraft der elastischen Biegung des Holzes und der elastischen Dehnung der Sehne kennen, so würde sich daraus die tatsächliche Gleichgewichtsfigur des Bogens und die Länge der Sehne (die etwa dem Ionenabstand  $\delta$  analog ist) berechnen lassen. Denkt man sich nun nur die Kontraktionskraft der Sehne, aber nicht die Dilatationskraft des Holzbogens bekannt, aber

<sup>1)</sup> *M. Born* u. *A. Landé*, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 20, 187, 1918.

<sup>2)</sup> *E. Madelung*, Phys. Zeitschr. 19, S. 524, 1918.

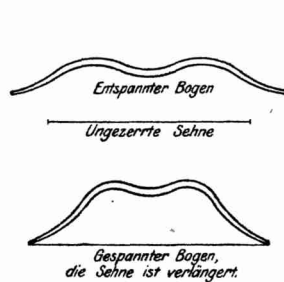


Fig. 4.

außerdem die Sehnenlänge bestimmt, so kann man umgekehrt die Kraft des Holzbogens aus den beiden gegebenen Größen berechnen. Das entspricht nun genau unserem Falle: die Kontraktionskraft ist bekannt, der Ionenabstand  $\delta$  läßt sich aus der Dichte und den Atomgewichten einfach berechnen, folglich liefert die Gleichgewichtsbedingung eine Beziehung zur Berechnung der Abstoßung  $b/\delta^n$ . Unbekannt bleibt dann nur noch der Exponent  $n$ .

Bis auf diesen ist also die bei Entstehung des Kristalls aus seinen Ionen geleistete Arbeit vollständig bekannt, und damit sind nach allgemeinen Gesetzen der Dynamik alle von dem Ionenabstand  $\delta$  abhängigen Eigenschaften des Kristalls mitbestimmt. Setzt man den Kristall einem gleichförmigen, allseitigen Drucke aus, so wird er komprimiert; diese Volumenänderung<sup>1)</sup>

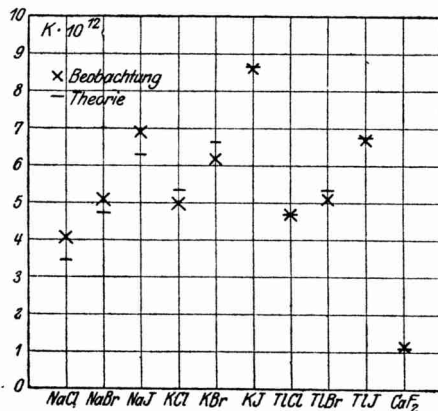


Fig. 5.

hängt offenbar nur von der Änderung des Ionenabstands  $\delta$  ab, muß sich also aus unseren Prinzipien ableiten lassen. Das Verhältnis der relativen Volumenänderung zu der dazu nötigen Druckzunahme heißt Kompressibilität und wird mit  $\alpha$  bezeichnet. Es muß also möglich sein, bei geeigneter Wahl des ganzzahligen Exponenten  $n$  dieses  $\alpha$  allein aus der Ladung des Elektrons  $e$  und dem Ionenabstand  $\delta$  (der wieder durch Dichte und Atomgewichte gegeben ist) zu berechnen. Mit  $n = 9$  hat sich eine sehr gute Übereinstimmung ergeben, die durch Fig. 5 veranschaulicht wird<sup>2)</sup>. Darin sind die von Richards und Jones<sup>3)</sup> gemessenen Kompressibilitäten in der Einheit  $10^{-12}$  dyn/cm<sup>2</sup> als Kreuze, die nach unserer Theorie berechneten Werte als Striche eingetragen. Außer 9 Salzen vom Typus NaCl enthält die Figur auch noch den Kristall Flußspat CaF<sub>2</sub>, bei dem ebenso gute Übereinstimmung herrscht; das ist besonders

<sup>1)</sup> Bei dem Beispiel unseres Bogens entspricht diese Volumenänderung etwa der Annäherung der Sehnenenden, wenn der Bogen (zum Schusse) gespannt wird. Bei gegebener Spannkraft ist diese Annäherung offenbar durch die elastischen Eigenschaften von Bogen und Sehne völlig bestimmt.

<sup>2)</sup> M. Born und A. Landé, l. c.

<sup>3)</sup> Th. W. Richards und Gr. Jones, Journ. Amer. Chem. Soc. 31, 158, 1909.

beweisend für die Richtigkeit der Theorie, weil dieser Kristall ein ganz anderes Gitter und daher das Kontraktionsbestreben einen ganz andern Zahlenwert hat ( $38,7 e^2/\delta$ ).

Damit ist der Nachweis erbracht, daß der elastische Widerstand gegen Zusammendrücken auf elektrischen Kräften beruht und im voraus berechnet werden kann. Man wird wohl nicht zögern, dieses Ergebnis zu verallgemeinern.

Es wäre nun noch viel zu sagen über die Bedeutung des Exponenten  $n = 9$ ; dieser Zahlenwert wirft helles Licht auf den inneren Bau der Ionen, die mit großer Wahrscheinlichkeit keine Systeme von ebenen Elektronenringen (nach Bohr) sind, sondern die Form von Würfeln haben. Die Zahl 8 der Würfecken wieder steht wahrscheinlich in engem Zusammenhang mit dem periodischen System der Elemente, dessen ersten beiden Perioden die Länge 8 haben. Auch zeigen sich Beziehungen zwischen chemischen Wärmetönungen und den Ionisierungsspannungen<sup>1)</sup> und manche andere Ausblicke. Doch sind diese Dinge noch zu sehr im Stadium der Entwicklung, um an diesem Orte dargestellt zu werden. Wir können unsere Ausführungen mit der Gewißheit schließen, daß die Wissenschaft ein Stück des Weges vom „mechanischen Äther“ zur „elektrischen Materie“ glücklich überwunden hat.

## Die Reste fossiler Tiere im Volksglauben und in der Sage.

Von Dr. Othenio Abel,

a. o. Professor der Paläobiologie an der Wiener Universität.

(Schluß.)

Wie durch die Untersuchungen Schraders (Sitzungsber. d. Berliner Akad. d. Wiss., 1892) wohl endgültig aufgeklärt wurde, geht die Einhornssage auf die Darstellungen des Ur oder Auerochsen (*Bos primigenius*) zurück, die sich auf altassyrisch-babylonischen Reliefs vorfinden. Diese Darstellungen sind ebenso wie die ägyptischen Wandmalereien und Reliefs streng im Profil wiedergegeben, so daß nur ein Horn abgebildet erscheint. Die Perser ahmten diese Abbildungen nach, ohne das Tier selbst zu kennen, da zur Zeit des Baues des Königspalastes von Persepolis der Ur in Mesopotamien bereits ausgestorben war. Der griechische Arzt Ktesias, Leibarzt von Artaxerxes II., sah diese Darstellungen in Persepolis und brachte von hier die Nachricht von dem merkwürdigen Einhorn nach Hause. Aristoteles, Plinius und Aelianus haben diese Schilderungen übernommen, doch scheint in dieser und in späterer Zeit die Vorstellung des Einhorns durch die auf ägyptischen Reliefs dargestellten Säbelantilopen (*Oryx*) beeinflusst worden zu sein, die in stren-

<sup>1)</sup> Die Ionisierungsspannung ist diejenige Spannung, die nötig ist, um einem Atom ein Elektron zu entreißen; sie ist nach den Untersuchungen von Franck und Hertz (Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 15, 34, 1913) eine charakteristische Konstante des Atoms.