Über die Entdeckung der Röntgenstrahlinterferenzen durch Laue und die Bestätigung der Kristallgittertheorie

Autor(en): **Wiederkehr, Karl Heinrich**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Gesnerus : Swiss Journal of the history of medicine and sciences**

Band (Jahr): **38 (1981)**

Heft 3-4

PDF erstellt am: **30.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-521555

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Über die Entdeckung der Röntgenstrahlinterferenzen durch Laue und die Bestätigung der Kristallgittertheorie [1]

Von Karl Heinrich Wiederkehr

Im Jahre 1979 gedachte man auf mehreren Veranstaltungen in festlichem Rahmen des 100. Geburtstages von Albert Einstein, Otto Hahn, Lise Meitner und Max von Laue, und von berufener Seite wurde der Mensch M. von Laue und seine Verdienste um die Wissenschaft gewürdigt [2].

Wir beschränken uns hier auf Laues schönste Entdeckung, die der Beugung von Röntgenstrahlen an einem Kristallgitter (1912). Dabei versuchen wir, das geschichtliche Umfeld miteinzubeziehen und insbesondere die Einstellung zu der Kristallgitterhypothese näher zu beleuchten.

M. von Laue war 1909 als Privatdozent von Berlin nach München an das Sommerfeldsche Institut für theoretische Physik übergewechselt. Er galt als Spezialist für optische Fragen; den Fresnelschen Mitführungskoeffizienten konnte er 1907 in einfacher Weise mit dem relativistischen Additionstheorem deuten, und auf Wunsch Arnold Sommerfelds übertrug man ihm den Artikel über optische Interferenzen in der Enzyklopädie der Mathematischen Wissenschaften. Paul Ewald hatte sich gerade das Arbeitsthema für seine Doktorarbeit von Sommerfeld geholt; er sollte untersuchen, ob eine gitterförmige Anordnung von Resonatoren optische Doppelbrechung erzeugen kann. Sommerfeld hoffte damit, der Bestätigung und Verwertung der damaligen Strukturtheorie der Kristalle und der Raumgitterhypothese einen Schritt näher zu kommen. Als Ewald ein Problem beunruhigte – ein sehr wesentliches der dynamischen Theorie der Röntgenstrahlinterferenzen, wie sich später herausstellte –, suchte er bei Laue Rat [3]. Doch dieser hörte nur mit halbem Ohr zu und bei dem Stichwort «Gitter» fragte er nach den Abständen der Resonatoren. Sicher hatte Laue die vermutete Größenordnung der Wellenlänge des Röntgenlichts, genauer die «Impulsbreite», im Kopf, und bei dieser Unterhaltung, die für Ewald nichts brachte, oder kurz danach, kam Laue die Idee des Beugungsversuchs.

Die Frage nach der Natur der Röntgenstrahlen war immer noch nicht zufriedenstellend beantwortet, obwohl sich die Waagschale zu der Wellenauffassung hinneigte. Bereits 1896 und 1897 zogen E. Wiechert, G. G. Stokes

und J.J. Thomson aus der Maxwell-Lorentzschen Elektrodynamik den Schluß, daß ein abgebremstes Elektron einen elektromagnetischen Impuls aussendet[4]. W. Wien schätzte 1907 die Wellenlänge von Röntgenlicht richtig ab, als er den lichtelektrischen Effekt von Röntgenlicht mit der Einsteinschen Formel für Lichtquanten deutete – eine Hypothese, die damals noch nicht allgemein anerkannt war[5]. Auf einem anderen Wege wurde die Impulsbreite λ, die sich formal nach der Gleichung $\lambda = c \cdot \tau$ berechnet, wobei τ die Brems- oder Stoßzeit ist, zu etwa gleicher Größenordnung gefunden. H. Haga und C. H. Wind stellten schon 1902 Versuche zur Beugung der Röntgenstrahlen an einem keilförmigen Spalt an[6]. B. Walter und R. Pohl machten sieben Jahre später ähnliche Experimente[7]. Mit einem eigens dafür konstruierten Mikrofotometer maß P. P. Koch, damals Assistent Röntgens, die Beugungsbilder nach und kam zu dem gleichen Ergebnis für die Impulsbreite $\lambda \approx 10^{-9}$ cm. Die Diskussion der Fehlerquellen entwertete das Ergebnis jedoch beträchtlich[8].

Im ersten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts war der englische Physiker Charles Glover Barkla führend in der Erforschung der Röntgenstrahlen[9]. Auch er war ein eifriger Verfechter der elektromagnetischen Wellennatur dieser Strahlen und brachte dafür gewichtige experimentelle Gründe. Barkla zeigte nämlich, daß primäre Röntgenstrahlen bei leichteren Elementen, wie z. B. Kohlenstoff, eine Streustrahlung, ähnlich der Rayleighschen bei sichtbarem Licht, hervorrufen, und daß diese Röntgenstreustrahlung ebenfalls linear polarisiert ist. Zum Nachweis wandelte er die sekundäre Strahlung in eine tertiäre um und stellte die Strahlungsrichtungen bzw. die Strahlungsintensitäten mit einer Ionisationskammer fest[10]. Eine weitere Analogie zum Licht fand Barkla mit den Röntgenspektrallinien. Anfangs bezeichnete er diese als homogene X-Strahlung, dann als charakteristische und zuletzt als fluoreszierende X-Strahlen. Die Ursache hierfür lag seiner Meinung nach in einer periodischen Bewegung der Elektronen; die Bremsstrahlung dagegen wird durch eine gleichmäßig verzögerte Bewegung der Elektronen hervorgerufen. Statt von der Wellenlänge sprach Barkla von der Härte der X-Strahlen, die mit der Absorption durch ein Aluminiumblättchen gemessen wurde. Und er erkannte bereits den Zusammenhang zwischen der Härte der charakteristischen Röntgenstrahlen und dem Atomgewicht des Stoffes. Zusammen mit C. A. Sadler wies Barkla in den Jahren 1907–1909 nach, daß die charakteristische Strahlung die Stokessche Regel befolgt, nach der Fluoreszenz nur durch Licht höherer Frequenz erzeugt wird. So betrachteten Barkla und Sadler z. B. die drei Elemente Fe, Cu und Zn, deren

Atomgewicht in der Reihenfolge von links nach rechts zunimmt. Jedes dieser drei Metalle sendet, als Antikathode benutzt, eine Primärstrahlung aus, die sich aus der Bremsstrahlung und einer überlagerten charakteristischen Strahlung zusammensetzt. Die Zn-Antikathode kann die charakteristische Cu-Strahlung erregen, – die Primärstrahlung einer Fe-Antikathode kann dies nicht. Eine zweite Spektrallinie haben Barkla und Sadler zuerst bei Ag gefunden. 1909 benutzten sie für die beiden Spektrallinien noch die Bezeichnung A und B; um aber eine sinnvolle Bezeichnung für eventuell noch andere zu bezeichnende X-Strahlungsreihen offen zu halten, wählten sie später dafür die Buchstaben K und L. So sind historisch die Bezeichnungen für die Elektronenschalen entstanden. H. Moseley führte diese Untersuchungen systematisch weiter und formulierte 1913 dann sein bekanntes Gesetz, das einem chemischen Element seine Stellung im Periodensystem zuwies[11].

Dennoch traten damals namhafte Physiker energisch für die korpuskulare Natur der Röntgenstrahlen ein. William Henry Bragg (1862–1942), der sich vor der Laueschen Entdeckung eingehend mit der Strahlung radioaktiver Substanzen befaßte, schrieb den γ-Strahlen und X-Strahlen wohl Gleichartigkeit zu. Aber die experimentell gesicherte Tatsache, daß beim Abbremsen eines Elektrons ein «Röntgenstrahl» entsteht und dieser wieder durch Auslösen eines Elektrons verloren geht – wobei dem letzteren Elektron etwa die gleiche Energie erteilt wird, wie sie das abgebremste Elektron vorher besaß –, war ihm Grund genug, von einer «auswechselbaren Korpuskularform» zwischen Elektron und «korpuskularen Einheiten oder Quanten» der Röntgenstrahlung zu sprechen[12]. Joh. Stark stellte sich die Röntgenstrahlen ebenfalls korpuskular, aus «Lichtzellen» konstituiert, vor, und diese Korpuskeln sollten in bestimmten Richtungen innerhalb des Kristalls, in den «Kristallschächten», am leichtesten durchkommen[13].

Doch nun wieder zu unserem Ausgangspunkt zurück, nämlich zu dem Gespräch zwischen Laue und Ewald. Walther Friedrich, Assistent von Sommerfeld, der sich gerade mit Experimenten zur Röntgenstrahlstreuung beschäftigte, hörte von dem Laueschen Gedanken und erbot sich sofort, Versuche hierfür zu machen. Sommerfeld hielt von dieser Idee nicht viel; und Röntgen war skeptisch, denn er hatte schon früher Kristalle mit Röntgenlicht durchstrahlt und nichts dergleichen beobachtet. Erst als Paul Knipping (1883–1935), ein Doktorand Röntgens, seine Unterstützung anbot, konnte der Plan realisiert werden.

Friedrich schätzte sofort die Expositionszeit für die Photoplatten ab und kam dabei auf die Größenordnung von Stunden. Zuerst nahmen Friedrich und Knipping einen Kupfervitriol-Kristall, weil sie glaubten, daß die Fluoreszenzstrahlung eventuell eine Rolle spielen würde. Der erste Versuch mit seitlich aufgestellten Fotoplatten brachte keinen Erfolg; als sie aber die Platte hinter den Kristall, senkrecht zum Primärstrahlbündel setzten, zeigten sich symmetrisch angeordnete Punkte. Daraufhin besorgten sich die beiden Experimentatoren einen schönen Zinkblende-Kristall; ZnS kristallisiert im kubischen System. Parallel zu einer Würfel-, Oktaeder- und Rhombendodekaeder-Fläche ließen sie dünne Platten herausschneiden und polieren. Die Photogramme zeigten wunderbar deutlich an den Beugungsmustern die erwartete Achsenabhängigkeit. Auch von anderen Substanzen wie Bleiglanz, Steinsalz und Diamant wurden Photogramme angefertigt. In der Sitzung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften am 8. Juni 1912 legte A. Sommerfeld die Abhandlung «Interferenzerscheinungen bei Röntgenstrahlen» vor. Laue behandelte darin den theoretischen Teil, Friedrich und Knipping den experimentellen Teil. Die für die Enzyklopädie verfaßte Theorie der flächenhaften Punktgitter erweiterte Laue für den Raum. Durch das Hinzukommen eines dritten Kegelsystems werden verhältnismäßig wenige Punkte durch ein Wertetripel festgelegt, das die Ordnungszahlen der Interferenzmaxima in der jeweiligen Achsenrichtung enthält. Nur einige wenige enge Spektralbereiche erfüllen gleichzeitig alle drei Bedingungen. – Als Gitterkonstante in allen drei zueinander senkrechten Achsen setzte Laue bei seinen theoretischen Betrachtungen und Rechnungen die Kantenlänge a eines Würfels an. In die Eckpunkte dieses Würfels dachte sich Laue die ZnS-Moleküle gesetzt. Er nahm also ein kubisch einfach primitives Gitter an. Mit dem Molekulargewicht von ZnS, der Dichte dieser Substanz und der Avogadroschen Konstanten fand Laue die Gitterkonstante a zu $3{,}38 \cdot 10^{-8}$ cm. Für den Spektralbereich des Röntgenlichts gab er in der 1. Abhandlung $1{,}3 - 5{,}2 \cdot 10^{-9}$ cm an; in der 2. Abhandlung zur «Quantitativen Prüfung der Theorie» setzte er bei seinen Rechnungen für die Ordnungszahlen h_1, h_2, h_3 kleine ganze Zahlen, beginnend mit $h_3 = 1$, ein und fand so die zu den Interferenzpunkten zugeordneten Wellenlängen. Die Ordnungszahlen h waren bis auf ihr Verhältnis dabei nicht ganz gesichert, sondern nur wahrscheinlich und dementsprechend auch die Wellenlängen[14].

Neben der Wellennatur des Röntgenlichts setzt die Lauesche Idee auch eine molekulare Konstitution der Kristalle mit Gitterstruktur voraus. Hier

stellt sich dem Physikhistoriker die zentrale Frage, ob und wie weit die Wissenschaftler damals die Vorstellungen eines gitterartigen Aufbaues akzeptiert hatten. Waren derartige Vorstellungen noch «eine zweifelhafte Hypothese», die bei den Pysikern «ein ziemlich unbekanntes Dasein» fristete, wie Laue sagt[15] – und P. P. Ewald schloß sich dieser Meinung an – oder erschien den Physikern der gitterartige Aufbau eines Kristalles und festen Körpers trotz des Fehlens eines direkten Beweises «gesicherter ... als die Gesetze der Mechanik», wie Paul Forman behauptet[16]? Hieran entzündete sich eine heftige Kontroverse zwischen Forman und Ewald. Anlaß dazu war «Fifty Years of X-Ray Diffraction», hrsg. von Ewald 1962, eine Festschrift, die zur Geschichte der Röntgenstrahlen unter anderem auch persönliche Erinnerungen enthält[17]. Als besondere, wenn nicht sogar einmalige Situation betrachtet Ewald in München das gemeinsame Wirken von Röntgen, Sommerfeld und des Mineralogen Paul Groth (1843–1927). Groth war unter dem Einfluß Leonhard Sohnckes (1842–1897) zu einem eifrigen Verfechter der Strukturtheorie der Kristalle geworden; in den Glasschränken der physikalischen Sammlung des Sommerfeldschen Instituts standen noch die Gittermodelle aus Stricknadeln und Glasperlen, die nach Sohncke angefertigt worden waren. Forman schwingt sich in seinem Artikel dazu auf, von der Schaffung eines Mythos, einer Legende, durch die Crystallographers, genauer: durch die chieftains dieses Clans, zu sprechen. Ewalds Replik «The Myth of Myths» ist nicht minder gepfeffert[18]. Unwillkürlich wird man an Napoleon Bonapartes Ausspruch erinnert: Geschichte ist eine Fabel, auf die man sich geeinigt hat. – Ich möchte versuchen, die damaligen Standpunkte Für und Wider eine atomistische Grundkonzeption kurz zu umreißen – und ebenfalls die Einstellung zur Gitterstrukturtheorie.

Namhafte Wissenschaftler, insbesondere solche, die sich um eine tragfähige erkenntnistheoretisch-philosophische Grundlage der Physik und Chemie bemühten, wollten damals alles nicht direkt Wahrnehmbare, speziell das Atom, aus der Naturwissenschaft verbannen. Wilhelm Ostwald (1853–1932) hatte 1895 auf der Naturforscherversammlung in Lübeck die «mechanistische Weltansicht» in seinem Vortrag «Die Überwindung des wissenschaftlichen Materialismus» angeprangert, um an ihre Stelle «ein Weltbild auf energetischer Grundlage» zu setzen. Für ihn ist Materie ein Gedankending; das Wirkliche, d.h. das, was auf uns wirkt, ist nur die Energie. Ostwald will also schon 1895 den Substanzbegriff in dem der Energie aufgehen lassen[19]. Ernst Mach (1838–1916) hat ebenfalls eine Abneigung gegen das «Hypothetisch-Fiktive»; er entwickelt eine Theorie

der «ökonomischen Darstellung des Tatsächlichen» und will den «Glauben an die Realität der Atome» zerstören[20]. Stefan Meyer, ein früherer Assistent L. Boltzmanns, berichtet uns, wie Mach kurz vor seinem Tode nach einem Blick in das Spinthariskop an die «Existenz der Atome [dann doch] glaubte»[21]. Nach Laue (Nobelvortrag) hegten damals nur «manche Philosophen Zweifel an der Wirklichkeit der Atome»[22]. Die Atomistik hatte sich glänzend bewährt; stichwortartig sei nur auf einige schöne Erfolge in jenen Jahren hingewiesen. Einstein hatte 1905 die Brownsche Molekularbewegung untersucht, und angegeben, wie die Avogadro-Konstante (Loschmidtsche Zahl), genauer bestimmt werden konnte[23]. Die kinetische Wärmetheorie wurde in den experimentellen Arbeiten von W. Nernst 1910 über die spezifischen Wärmen bei tiefen Temperaturen mit Hilfe des Quantenkonzepts erfolgreich fortgeführt[24]. C. T. R. Wilson war es 1911 gelungen, die Flugbahn eines einzelnen Elektrons in einer Nebelkammer sichtbar zu machen[25]. Die atomistische Konstitution elektrischer Substanzen hatten mehrere Forscher schon vor der Jahrhundertwende (1896) nachgewiesen[26]. Und E. Rutherford zog 1911 aus dem verblüffenden Ergebnis der Streuung von α-Teilchen den Schluß, daß ein Atomkern existieren müsse[27].

Der zentrale Punkt in der Kontroverse Forman-Ewald ist der: War damals, zur Zeit der Laueschen Entdeckung, die Gitterstruktur eines Kristalls für Mineralogen und Physiker schon selbstverständlich, oder wurde sie noch in Zweifel gezogen? Und wie weit war die Strukturtheorie der 230 Raumgruppen bekannt und angenommen? Es geht hier um eine Atomistik höherer Stufe mit einer mathematisch-geometrischen Komponente. Im Kristall sind molekulare Bausteine der Materie gesetzmäßig gelagert, und aus dieser Anordnung muß sich die Kristallgestalt ergeben. Um Hemmnisse und Gegenströmungen, die sich in unseren Augen einem folgerichtig entwickelten und auch schon abgeschlossenen Konzept entgegenstellten, verstehen zu können, ist es – so meinen wir – unerläßlich, die unterschiedlichen Auffassungen über die Ursachen der Kristallbildung zurückzuverfolgen.

Ende des 18. und Anfang des 19. Jahrhunderts machten Romé Delisle (1736–1790) und René-Just Haüy (1743–1822) die Kristallographie zu einem eigenständigen Zweig in den Naturwissenschaften. In Anlehnung an Delisle wählte Haüy sechs Primitivformen oder Kerngestalten aus; aber im Gegensatz zu seinem Vorgänger konnte Haüy die geometrischen Gesetzmäßigkeiten angeben (1784), nach denen aus einem Kern (noyau) (z. B. aus dem Rhomboeder beim Kalkspat) durch Aufsetzen sich verjüngender Schichten

die vielfältigen Sekundärformen (beim Kalkspat z. B. eine sechsseitige Säule, die oben und unten in einer Ecke ausläuft, oder das trigonale Skalenoeder, bei den Bergleuten auch Schweinszahn genannt) hervorgehen[28]. Haüy spricht hier von einer Dekreszenz (décroissemens), die eine Sekundärform bestimmt. Der Kern läßt sich oft durch Spalten mit einem Messer herauslösen. Haüy war nicht nur Kristallograph und Mineraloge, sondern auch Chemiker, und dabei Anhänger einer besonderen Atomistik, sagen wir «Gestaltsatomistik». Nicht nur die Kerne, auch die «integrierenden Moleküle» (Molécules intégrantes) und die «elementarischen Moleküle» (Molécules elémentaires oder simples) – wir würden heute von Molekülen und Atomen sprechen – sind bei ihm massive Polyeder. Jeder chemischen Verbindung, jedem integrierenden Molekül, ist ein Polyeder besonderer Form und Größe zugeordnet[29]. Für die Kristallstruktur ist jedoch, wenn das integrierende Molekül nicht schon selbst parallelepipedische Gestalt hat, ein parallelepipedischer Baustein höherer Ordnung, das «Subtraktivteilchen» (Molécul soustractive) von entscheidender Bedeutung. An den Kern – z. B. an das Rhomboeder beim Kalkspat – werden nach Haüy Schichten dieser Subtraktivteilchen aufeinander gestapelt, wobei sich diese Schichten durch Wegnahme einer oder mehrerer Reihen von Subtraktivteilchen gesetzmäßig verkleinern. In Haüys Dekreszenzgesetz steckt das Gesetz der rationalen Flächenstellung, kurz Rationalitätsgesetz genannt. Die uns geläufige Form kann es nicht besitzen, weil der Begriff der Kristallachsen noch fehlt. Das Subtraktivteilchen entspricht einer heutigen Elementarzelle. Legen wir nämlich in die Mitte eines parallelepipedischen Teilchens, genauer in seinen Schwerpunkt, kleine Massekugeln, oder setzen wir solche Kugeln in die Eckpunkte des Epipeds, erhalten wir ein Translationsgitter. In diesem Sinne vereinfachte als erster 1824 L. A. Seeber (1793–1855) die Haüyschen Anschauungen und machte sie so schmiegsamer[30]. Die Seebersche Modifikation schlug auch wieder eine Brücke zu der chemischen Atomistik Boylescher Prägung, wie sie von Dalton und vor allem von Berzelius in jenen Jahrzehnten wiederbelebt worden war.

In Frankreich schritt G. Delafosse (1796–1878), ein ehemaliger Schüler und Mitarbeiter Haüys, auf diesem Weg weiter. Delafosse arbeitet mit parallel liegenden Ebenen bzw. Spaltungsflächen von gleichem Abstand. Die Lage eines Massenpunktes im Kristall wird durch den Schnittpunkt dreier Spaltungsebenen bestimmt[31]. Den krönenden Abschluß in dieser Entwicklungslinie bildet Bravais' Entdeckung der 14 Raumgittertypen 1849[32].

Mit dieser eben skizzierten Entwicklungsrichtung, die eine atomistische Grundkonzeption hat, konkurrierte sehr bald eine andere Richtung mit einer dazu konträren Auffassung von der Materie. Es sind die «Dynamiker» oder «Dynamisten» mit ihrer Kontinuumstheorie, die eine «mechanische» (= atomistische) Grundansicht bekämpfen[33]. Nach Ansicht eines damals bekannten Wörterbuchautors (J. C. Fischer) steht ein Physiker gewissermaßen vor einer «metaphysischen Entscheidung», wenn er zwischen dem atomistischen und dynamischen System wählen soll. Die Dynamiker berufen sich auf den großen Königsberger Philosophen Immanuel Kant (1724–1804) und dessen Schriften «Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels» (1755) und «Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft» (1786)[34]. In der deutschen romantischen Naturphilosophie, zu der L. Oken (1779–1851), F. W. J. v. Schelling (1775–1854) und J. W. Ritter (1776–1810) gehörten, wurden derartige Gedanken weiter fortgeführt. Auch Christian Samuel Weiß (1780–1856) zählt zu diesem Kreis; als junger Privatdozent wurde er von dem preußischen Oberbergrat und Kurator der Königlichen Mineralien-Sammlungen D. L. G. Karsten zur Übersetzung des epochemachenden Haüyschen Werkes «Traité de Minéralogie» (1801 und 1802) herangezogen[35]. Weiß besaß Selbstvertrauen genug, schon in dem ersten Band seine eigenen Ideen über die Vorgänge bei der Kristallisation auszusprechen, obwohl sie den Haüyschen Vorstellungen gerade entgegenliefen[36]. Er beginnt mit den Worten: «Es soll die Form, die Figur [des Kristalls] dynamisch erklärt werden.» Seine Kernsätze lauten: «Es gibt in der Natur nicht bloß eine chemische Anziehung, ein Bestreben heterogener Materien, sich zu durchdringen und zu vereinigen (chemische Verwandtschaft) sondern auch eine entgegengesetzte Kraft der chemischen Repulsion, ein Streben homogener Körper, sich in heterogene aufzulösen, sich zu entzweien oder zu zerspalten.»[37] – «Die Kristallisation ist ein Phänomen der chemischen Repulsion, bei welcher es nicht zum Auseinandertreten, zur Absonderung der Produkte voneinander, gekommen ist, sondern wo die chemische Trennungskraft noch gehemmt worden ist, ohne ihr Ziel erreichen zu können, und daher bloß als Tendenz erscheint.»[38] Die Anisotropie eines Kristalls, d. h. seine Vektorialität in den Grundeigenschaften, vor allem die in den Spaltungsflächen (eigentlich senkrecht zu diesen Flächen) herabgesetzten Anziehungskräfte, sollen mit dem Begriff des «Abstoßungswinkels» erfaßt werden. In seiner ersten Abhandlung im Lehrbuch der Mineralogie von Haüy deutet Weiß auch schon eine Gesetzmäßigkeit an – wenn auch recht vage –, die offenbar mit dem Rationalitätsgesetz zusammenhängt[39].

Und in seinen Zusätzen zum Feldspat, Epidot und Glimmer im 3. Teil des Lehrbuches führt Weiß den Begriff der «Zone» ein (das sind Kristallflächen mit parallelen Kanten, die oft gürtelartig um den Kristall liegen), der für die Kristallmorphologie sich als außerordentlich fruchtbar erwies[40]. Ein Jahrzehnt später kann Weiß sein Zonenverbandsgesetz angeben, das alle Flächen einer Kristallart untereinander verknüpft[41].

Zur Charakterisierung einer Kristallform führt Weiß die kristallographischen Achsen ein und beginnt, das Kristallreich nach diesem Gesichtspunkt zu ordnen. Mit Hilfe der Achsenabschnitte kann er die Kristallflächen, die ganze Kristallform rationell beschreiben. Haüy hatte hier schon versucht, eine Art Kurzschrift, eine Symbolik unter Benutzung der Dekreszenzen zu schaffen; aber die Dekreszenzen waren zu hypothetisch und oft strittig[42]. Weiß hatte das Glück, einen mathematisch genialen Schüler und Mitarbeiter in dem jungen Franz Neumann (1798–1895), dem späteren großen theoretischen Physiker, zu finden. Mit seiner Projektionsmethode konnte F. Neumann das Zonenverbandsgesetz seines Lehrers in bewundernswerter Weise verdeutlichen und das Rationalitätsgesetz, wie wir es kennen, formulieren. Weiß und F. Neumann sehen es dabei als Verdienst R.-J. Haüys an, das Gesetz der rationalen Indizes empirisch (!) gefunden zu haben[43].

Eine systematische Einteilung der Kristallformen nach dem Symmetrieprinzip führte als Erster der Marburger Mineraloge J. F. C. Hessel (1796–1872) durch und fand 1830 die 32 Kristallklassen[44]. Zunächst entwickelt Hessel nach seinem Prinzip eine allgemeine Gestaltenlehre. Dann werden die Polyeder ausgewählt, die das «Gerengesetz», das ist das Rationalitätsgesetz, erfüllen. Sie sind die möglichen kristallographischen Polyeder. Hessel führt dann den Begriff der Symmetrieachse ein und weist nach, daß es in der Kristallographie nur 2-, 3-, 4- und 6zählige Achsen geben kann. Erstaunlicherweise wurde dieser außerordentliche Fortschritt in der theoretischen Kristallkunde von Mineralogen und Kristallographen jahrzehntelang nicht beachtet[45] – ein Phänomen, das sich in kleinerem Maße nach der Entdeckung der 230 möglichen Raumgruppen (1891) wiederholte, wenn wir die Physiker miteinbeziehen. Der finnländische Mineraloge und Petersburger Akademiker Axel Gadolin (1828–1893) leitete nochmals auf einfachere Weise 1867, und auch ohne irgendwelche Annahme über die Molekularstruktur der Kristalle die 32 Kristallklassen her[46].

Bravais stellte fest, daß die sieben einfachen Raumgitter unter den 14 von ihm gefundenen den sieben Kristallsystemen entsprachen. Die 14

Raumgitter bieten die Symmetrieverhältnisse der höchstsymmetrischen (= holoedrischen) Formen gut dar. Aber die niedrigersymmetrischen Formen bereiteten große Schwierigkeiten. Bravais hatte dies auch schon bemerkt und schrieb deshalb den Massepunkten in den Gittern selbst wieder Polyedergestalt von geringerer Symmetrie zu[47]. M. L. Frankenheim (1801–1869), der sich mit dem Problem der Raumgitter ebenfalls seit 1835 beschäftigt hatte, wies in einer Abhandlung von 1856 auf einen eventuellen Ausweg hin, wenn man den Begriff Molekül benutze. «Ob diese Molecule ... als Punkte anzusehen seyen oder als Körper von endlicher, wenn auch sehr kleiner Ausdehnung, oder als Gruppen solcher Punkte oder Körperchen, ist für unseren Zweck gleichgültig», schrieb Frankenheim in seiner Abhandlung. Und am Schluß heißt es: «Ich wage es ... nicht, die Gesetze der Krystallographie als einen empirischen Beweis für die Richtigkeit der Molecular-Theorie anzunehmen.»[48]

Auch L. Sohncke (1842–1897), der in Deutschland die Bravais'sche Theorie diskutierte, machte darauf aufmerksam, daß in den Bravais-Gittern gewissermaßen eine Parallelstellung der Moleküle enthalten ist. Und er gelangt zu einer umfassenderen Strukturtheorie, indem er auch andere stabile Lagen des Gleichgewichts außer der parallelen Orientierung zuläßt. Indem er als Deckbewegungen Schiebungen, Drehungen und Schraubungen benutzt, kann er 65 regelmäßige Punktsysteme herleiten[49]. Diese bieten wohl geringer symmetrische Kristallformen dar, aber sie können keine Rechenschaft von allen 32 Kristallklassen geben. Den Abschluß all dieser Bestrebungen bildet die Aufstellung der allgemeinen Theorie der Kristallstruktur von A. Schoenflies (1853–1928) und E. St. von Fedorow (1853–1919) im Jahre 1891[50]. Sie nahmen zu den Sohnckeschen Deckoperationen auch die Spiegelung sowie deren Kombination mit Drehungen hinzu.

Noch ein dritter Kristallograph, William Barlow (1845–1934), kam auf eigenem Wege zu den 230 Raumgruppen, – wenn auch drei Jahre später. Seine Arbeit bestätigte die Ergebnisse von Schoenflies und Fedorow. Barlow war zu Beginn seiner Tätigkeit auf diesem Gebiet ein Amateur mit eigenwilligen Ideen und Methoden. Besondere Bedeutung erlangten seine Überlegungen über die Kristallstruktur der Alkalihalogenide[51].

Barlow nahm an, daß Atome und Moleküle bestimmte Raumteile nach Lage und Größe im Kristall besetzen. Doch steht bei ihm der Gesichtspunkt der Raumerfüllung im Vordergrund. Die Wirkungssphäre der Grundteilchen eines Kristalls nimmt er der Einfachheit halber als kugelig an und sucht nach regelmäßigen, möglichst dichten Kugelpackungen. Als Beispiel führt

er einen Haufen gleich großer Kanonenkugeln an, wie man ihn gelegentlich als Pyramide bei Kriegerdenkmälern sieht. Offenbar war ihm anfangs nicht bekannt, daß schon Joh. Kepler (1571–1630) derartige Packungen in der Ebene und im Raum 1611 mit Hilfe von Erbsen studiert hatte[52]. Aber Barlow findet im Gegensatz zu Kepler nicht nur eine, sondern zwei dichteste Kugelpackungen; eine davon entspricht dem flächenzentrierten Gitter, die andere ist die hexagonal dichteste Packung, deren Kugelmittelpunkte kein Gitter bilden[53]. Barlow betrachtet aber auch Packungen verschieden großer Kugelsorten. Diejenigen mit zwei verschiedenen Kugeldurchmessern betrachtet er als Modellstudien für die kubisch kristallisierenden Alkalihalogenide[54]. 1897 gelangt er so zu einer Struktur, wie sie NaCl tatsächlich besitzt. Zwei flächenzentrierte Gitter von Na- und Cl-Atomen (besser Ionen) sind ineinander geschoben und dabei um eine halbe Kantenlänge des Würfels zueinander versetzt. W. J. Pope (1870–1939), der mit Barlow zusammenarbeitete, waren diese Untersuchungen bekannt, und er schlug W. L. Bragg diese Struktur vor.

Ein Blick auf ein Forschungsgebiet in der Physik, das sich mit den magnetischen Eigenschaften eines Kristalls befaßte, zeigt uns, daß die Gitterstrukturtheorie in der Weise, wie sie von Kristallographen vertreten wurde, noch nicht Allgemeingut war. V. Quittner, ein Schüler des berühmten Magnetikers Pierre Weiss (1865–1941), will in seiner Doktorarbeit die komplizierten Verhältnisse beim Magnetisieren des kubisch kristallisierenden Magnetits dadurch erklären, daß er in dem Kristall gesetzmäßig angeordnete mikroskopische Hohlspaltensysteme annimmt. Die Spalten sollen parallel zu den Oktaederflächen liegen und in den verschiedenen Richtungen sogar in ihrer Breite variieren können. Durch die entmagnetisierende Wirkung der Spalten könnte so die Abweichung magnetischer Größen von der regulären Symmetrie erklärt werden[55]. – Auch für W. Voigt (1850–1919), einen damals führenden Kristallphysiker, haben die Ergebnisse von Fedorow und Schönflies 1910 noch einen überwiegend mathematischen Charakter. «Über den physikalischen Wert derartiger Betrachtungen zu urteilen, wäre durchaus verfrüht», schreibt er in seinem bekannten «Lehrbuch der Kristallphysik», und die Anzahl von 230 möglichen Raumgruppen findet er «erdrückend»[56].

Die Nachricht über das Laue-Experiment mußte sich wie ein Lauffeuer verbreitet haben; nach England ist sie vermutlich durch W. Voigt gelangt, der an der 250-Jahr-Feier der Royal Society in London im Juli 1912 teilnahm[57]. W. H. Bragg beschäftigte sich zu jener Zeit auch mit Röntgen-

strahlexperimenten, seine Korpuskularhypothese erwähnten wir bereits; und gemeinsam mit seinem 22jährigen Sohn William Lawrence (*1890) griff er sofort in die Forschung auf diesem neuen Gebiet mit ein. Eine Serie bahnbrechender Arbeiten erschien innerhalb der nächsten zwei Jahre; sie ergänzten und erweiterten Laues Entdeckung und Werk auf das glücklichste[58]. W. L. Bragg konnte das Punktmuster des Laue-Photogramms in einfacherer Weise mit Hilfe von Reflexion der Röntgenstrahlen an parallelen Netzebenen des Kristalls deuten. Er kam auf diesen Gedanken durch eine ihm geläufige optische Erscheinung, nämlich der Reflexion von Licht an äquidistanten Zwillingslamellen[59]. Das Ergebnis dieser Analogiebetrachtung ist das bekannte Glanzwinkelgesetz ($n\lambda = 2\,d \sin \Theta$). Mit dieser neuen Methode, dem «Reflexionsgesichtspunkt», berechnet W. L. Bragg die Lage der Flecken im Laue-Photogramm. Er kommt zu dem Schluß, daß das Röntgenspektrum nicht nur aus den von Laue berechneten diskreten Wellenlängen besteht (Laue gab eigentlich nur ihre Verhältnisse an), sondern daß es kontinuierlich ist. Subtile Kenntnisse aus der Optik und die kristallographischen Kenntnisse dichter Kugelpackungen nach W. Barlow und W. J. Pope waren das «Kapital», das der junge Bragg in die «Familienfirma» einbrachte[60]. In einem im Dezember 1912 in «Nature» erschienenen Brief berichtete W. L. Bragg über die erste Beobachtung eines reflektierten Röntgenstrahlenbündels; als Reflektor benutzte er ein Glimmerstück, weil er annahm, daß die Spaltungsflächen dicht gepackte Netzebenen seien. W. H. Bragg (Vater) wies durch Ionisation und Absorption nach, daß die gebeugten Wellen tatsächlich alle Eigenschaften der Röntgenstrahlen besaßen. Daß dieser «Reflexionsgesichtspunkt» nichts grundsätzlich Neues gegenüber der von Laue beschriebenen Beugung darstellte, wies Georg Wulff 1913 zum erstenmal nach[61]. Dennoch war eine völlig neue Methode gefunden, die genaue quantitative Messungen auch hinsichtlich der Intensität ermöglichte; und gerade dies war für die Aufklärung der Kristallstrukturen äußerst wichtig. W. H. Bragg konstruierte 1913 das Röntgenstrahlenspektrometer; als Vorlage diente ihm ein gewöhnlicher Prismenspektralapparat. Auf dem Prismentisch befand sich ein drehbarer Kristall, vor dem Kollimatorspalt die Röntgenröhre mit einer Antikathode aus einem bestimmten Schwermetall wie Platin oder Rhodium. Dem Fernrohr entsprach eine schwenkbare Ionisationskammer, die mit einem geeichten Blättchenelektroskop verbunden war. Die Intensitätskurve des reflektierten, besser gebeugten Röntgenstrahlbündels zeigte neben dem mit zunehmendem Winkel erwarteten kontinuierlichen Abfall drei Spitzen, die sich wiederholten.

Sie entsprechen der charakteristischen Strahlung des Pt; qualitativ war diese Strahlung schon vorher von Barkla gefunden worden. Mit der Formel für den Glanzwinkel lassen sich bei konstantem Netzebenenabstand die Verhältnisse der Wellenlängen dieser Linien finden. Absolut kann man diese Wellenlängen angeben, wenn es gelingt, den Gittertyp zu finden, oder anders ausgedrückt: wenn es gelingt, die Lage der Atome zueinander aus den Glanzwinkeln und den Intensitäten der Maxima zu erschließen. Auf Anraten von Pope untersuchten die Braggs die Alkalihalogenide Steinsalz, Sylvin, Kaliumbromid und Kaliumjodid. Und aus der Tatsache, daß Würfelflächen und Oktaederflächen Maxima mit geraden und ungeraden Ordnungszahlen unterschiedlicher Intensität lieferten, konnten die beiden Braggs die Lage der Alkali- und Halogen-Atome zueinander genau angeben.

Laue schreibt in seiner Selbstbiographie: «Die Braggs brachten die Liebe zum Einzelstoff mit, sie vermochten sich mit Hingebung in die Strukturen von Natriumchlorid, von Diamant und so fort bis zu den verwickeltsten Silikaten zu vertiefen.» – Von sich selbst sagt Laue, daß ihn «vor allem die großen allgemeinen Prinzipien auf allen Gebieten der Physik» interessiert haben[62].

Anmerkungen

[1] Die wesentlichen Gedanken dieser Abhandlung wurden auf der 43. Physikertagung 1979 in Ulm in der Fachsitzung Geschichte der Physik vorgetragen.

[2] In Berlin z. B. eröffnete der damalige Bundespräsident eine Gedächtnisausstellung in der Staatsbibliothek Preußischer Kulturbesitz; siehe *Physikalische Blätter 35* (1979), H. 5, S. 189–199. – Paul Peter Ewald, Max von Laue – Mensch und Werk, in: *Physikalische Blätter 35*, H. 8, S. 337–349.

[3] P. P. Ewald, S. 346.

[4] Vgl. hierzu R. Pohl, *Die Physik der Röntgenstrahlen,* Braunschweig 1912, S. 17 ff.
E. Wiechert, Theorie der Elektrodynamik und die Röntgen'sche Entdeckung, in: *Schriften der physikalisch-ökonomischen Gesellschaft zu Königsberg 37* (1896), S. 1–48.
G. G. Stokes, On the nature of the Röntgen Rays, in *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 9* (1896), S. 215–216.
J. J. Thomson, A Theory of the Connexion between Cathode and Röntgen Rays, *Philosophical Magazine and Journal of Science,* 5. Ser., Vol. 45, London (1898), S. 172–183 (eingereicht Dezember 1897).

[5] W. Wien, Über eine Berechnung der Wellenlänge der Röntgenstrahlen aus dem Planckschen Energie-Element, in: *Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen aus dem Jahre 1907,* math.-physik. Klasse, Nachdruck 1967, S. 598–601.

[6] H. Haga und C. H. Wind, Die Beugung der Röntgenstrahlen, *Annalen der Physik,* hrsg. von P. Drude, 4. Folge, Bd. 10 (1903), S. 305–312.

[7] B. Walter und R. Pohl, Zur Frage der Beugung von Röntgenstrahlen, *Annalen der Physik*, hrsg. von W. Wien und M. Planck, 4. Folge, Bd. 25 (1908), S. 715–727.
Dies., Weitere Versuche über die Beugung der Röntgenstrahlen, *Annalen der Physik*, 4. F., Bd. 29 (1909), S. 331–354.

[8] P. P. Koch, Über die Messung der Schwärzung photographischer Platten in sehr schmalen Bereichen, mit Anwendung auf die Messung der Schwärzungsverteilung in einigen mit Röntgenstrahlen aufgenommenen Spaltphotogrammen von Walter und Pohl, in: *Annalen der Physik*, hrsg. von W. Wien und M. Planck, 4. Folge, Bd. 38 (1912), S. 507–522.

[9] Ch. G. Barkla, Der Stand der Forschung über die sekundäre Röntgenstrahlung, in: *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, hrsg. von Johannes Stark, 5. Bd. (1908), S. 246–324.
Ders., Die Spektren der fluoreszierenden Röntgenstrahlen, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 8. Bd. (1911), S. 471–488.

[10] Die ionisierende Wirkung der X-Strahlen hatte schon W. C. Röntgen in seiner zweiten Mitteilung *Über eine neue Art von Strahlen* (die er der Würzburger Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft am 9. März 1896 einreichte) beschrieben. (Abgedruckt in O. Glasser, *W. C. Röntgen und die Geschichte der Röntgenstrahlen*, Berlin 1931, S. 158–161.) Mit der Ionisationskammer arbeitete als einer der ersten J. Perrin (1897); die Ionentheorie der elektrischen Leitung in Gasen entwickelte J. J. Thomson in seinem Werk: *Conduction of Electricity trough Gases*, Cambridge 1903. Deutsche Übersetzung von E. Marx, *Elektrizitätsdurchgang in Gasen*, Leipzig 1906.
Siehe dazu auch R. Pohl, *Die Physik der Röntgenstrahlen*, a. a. O., S. 131 ff.

[11] H. G. J. Moseley, The high-frequency spectra of elements, *Philosophical Magazine 26* (1913), S. 1024–1034.

[12] W. H. Bragg, *Durchgang der α-, β-, γ- und Röntgen-Strahlen durch Materie*, deutsch von M. Ikle, Leipzig 1913, insbesondere S. 171 und 173.

[13] Johannes Stark, Bemerkungen über Zerstreuung und Absorption von β-Strahlen und Röntgenstrahlen in Kristallen, in: *Physikalische Zeitschrift 13* (1912), S. 973–977. Siehe auch M. v. Laue, *Gesammelte Schriften und Vorträge*, 3 Bde. Braunschweig 1961, insbesondere Bd. 1, S. 235.

[14] Laue, zusammen mit W. Friedrich und P. Knipping, Interferenzerscheinungen bei Röntgenstrahlen, *Sitzungsberichte der Bayerischen Akademie der Wissenschaften* (1912), S. 303–323, und Laue, *Ges. Schr. und Vortr.*, Bd. 1, S. 183–207, mit 5 Tafeln.
Laue, Eine quantitative Prüfung der Theorie für die Interferenzerscheinungen bei Röntgenstrahlen, *Sitzungsberichte der Bayerischen Akademie der Wissenschaften* (1912), S. 363–373, und Laue, *Ges. Schr. u, Vortr.*, Bd. 1, S. 208–218.
Ein Protokollblatt, mit dem 4. Mai 1912 datiert, sollte den drei Forschern die Priorität sichern. In der Sitzung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften am 8. Juni 1912 wurde von Sommerfeld die erste Abhandlung vorgelegt, die zweite am 6. Juli 1912. Die Berechnung der Gitterkonstante a führte Laue so durch:

$$1 \text{ Mol ZnS} : (65{,}4 + 32) \text{ kg} = 97{,}4 \text{ kg}$$

$$\text{Avogadro-Konstante } N_A = 6{,}17 \cdot 10^{26} \text{ kg-mol}^{-1} \text{ (heute 6,02!)}$$

$$\text{Dichte } \varrho = 4{,}06 \cdot \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}; \text{ 8 Eckpunkte} : 1 \text{ Molekül ZnS } (1\ \mu);$$

$$\varrho = \frac{1\ \mu \cdot \text{ZnS}}{a^3}; \quad a^3 = \frac{1 \text{ Mol ZnS}}{N_A \cdot \varrho}$$

$$a^3 = \frac{97{,}4 \text{ kg} \cdot 10^{-6} \text{ m}^3}{6{,}17 \cdot 10^{26} \cdot 4{,}06 \cdot 10^{-3} \text{ kg}} = 3{,}98\ 10^{-29} \text{ m}^3$$

$$a = 3{,}38 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

[15] M. v. Laue, *Ges. Schr. u. Vortr.*, Bd. 3, S. 10, Nobelvortrag: Über die Auffindung der Röntgenstrahlinterferenzen (1920).

[16] P. Forman, The Discovery of the Diffraction of X-Rays by Crystals; A Critique of the Myths, in: *Archive for History of Exact Sciences 6* (1969/1970), S. 38–71, besonders S. 44.

[17] P. P. Ewald (Hrsg.), *Fifty Years of X-Ray Diffraction,* Utrecht 1962.

[18] P. P. Ewald, The Myth of Myths; Comments on P. Forman's Paper on «The Discovery of the Diffraction of X-Rays in Crystals», in: *Archive for History of Exact Sciences 6* (1969/70), S. 72–81.

[19] W. Ostwald, Die Überwindung des wissenschaftlichen Materialismus (Vortrag auf der Naturforscherversammlung in Lübeck 1895), in: *Zeitschrift für Physikalische Chemie 18* (1895), S. 305–320.

[20] E. Mach, Die Leitgedanken meiner naturwissenschaftlichen Erkenntnislehre und ihre Aufnahme durch die Zeitgenossen, in: *Physikalische Zeitschrift 11* (1910), S. 599–606; *Scientia,* Vol. 7, Anno 4 (1910), S. 225–240.

[21] J. Thiele, Bemerkung zu einer Äußerung im Vorwort der «Optik» von Ernst Mach, in: *NTM, Schriftenreihe für Geschichte der Naturwissenschaft, Technik und Medizin,* 2. Jg. (1965), H. 6, S. 10–19, insbesondere S. 16.

[22] M. v. Laue, Nobelvortrag, *Ges. Schr. u. Vortr.*, Bd. 3, S. 5–18, besonders S. 10.

[23] A. Einstein, *Untersuchungen über die Theorie der «Brownschen Bewegung»,* Ostwalds Klassiker Nr. 199, hrsg. von R. Fürth; erste Arbeit in den *Annalen der Physik,* 4. Folge, Bd. 17 (1905), S. 549–560.

[24] Siehe A. Hermann, Die Quantentheorie der spezifischen Wärme, in: A. Einstein et al., *Die Theorie der spezifischen Wärme,* München 1966, S. 7–19.

[25] C. T. R. Wilson, On a Method of making Visible the Path of Ionising Particles trough a Gas, in: *Proceedings of the Royal Society of London,* Ser. A, Vol. 85, London 1911, S. 285–288.
Ders., On an Expansion Apparatus for making Visible the Tracks of Ionising Particles in Gases and some Results obtained by its Use, in: *Proceedings of the Royal Society of London,* Ser. A, Vol. 87, London 1912, S. 277–292.

[26] Siehe W. Gerlach, Die Entwicklung der Atomistik der Elektrizität, in: = *Technikgeschichte 33* (1966), S. 373–387.
Schon im 8. und 9. Jahrzehnt des 19. Jahrhunderts hatten Wilhelm Weber (1804–1891) und Carl Friedrich Zöllner versucht, hypothetisch die Atome der chemischen Elemente aus positiven und negativen Urbausteinen aufzubauen. W. Weber, Über die Bewegungen der Elektricität in Körpern von molekularer Konstitution, in: *Annalen der Physik,* hrsg. von J. C. Poggendorff, Bd. 156 (1875), S. 1, und *Wilhelm Webers Werke,* 6 Bde., hrsg. von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Berlin 1892–1894, Bd. 4, S. 312, und Nachlaß in Bd. 4.
J. C. F. Zöllner, *Principien einer elektro-dynamischen Theorie der Materie,* Leipzig 1876.
Siehe dazu auch K. H. Wiederkehr, *Wilhelm Eduard Weber,* Erforscher der Wellenbewegung und der Elektrizität, 1804–1891, Stuttgart 1967, Bd. 32 der Reihe *Große Naturforscher,* hrsg. von H. Degen. Weber und Zöllner entwarfen schon ein Planetenmodell des Atoms.

[27] E. Rutherford, The Scattering of the α and β Rays and the Structure of the Atom, in: *Proc. Man. Lit. Soc. 55* (1911) und *Collected Papers,* Bd. 2, S. 212–213.
Siehe dazu auch J. L. Heilbron, The Scattering of α and β Particles and Rutherford's Atom, in: *Archive for History of Exact Sciences 4* (1967/68), S. 247–307, und U. Hoyer, Ernest Rutherford, in: *Die Großen der Weltgeschichte,* Bd. IX, Zürich 1970, S. 815–825.

[28] Haüys sechs Kerngestalten sind: 1. das regelmäßige Tetraeder, 2. das Parallelepiped, welches auch rhombisch oder kubisch sein kann, 3. das Oktaeder, dessen Oberflächendreiecke gleichseitig, gleichschenklig und ungleichseitig sein können, 4. die regelmäßige sechsseitige Säule, 5. das Rhombendodekaeder, auch Granatoeder genannt, 6. die hexagonale Dipyramide. – Die wesentlichen Elemente seiner Strukturlehre gab Haüy in seiner Abhandlung: *Essai d'une théorie sur la structure des cristaux, appliquée à plusieurs genres de substances crystallisées*, Paris 1784. – Siehe hierzu auch K. H. Wiederkehr, R.-J. Haüys Strukturtheorie der Kristalle, in *Centaurus 21* (1977), S. 278–299.

[29] Siehe dazu K. H. Wiederkehr, René-Just Haüys Konzeption vom individuellen integrierenden Molekül, ihre Widerlegung, und seine Ansichten über kristallbildende Kräfte, in: *Centaurus 22* (1978), S. 131–156.

[30] L. A. Seeber, Versuch einer Erklärung des inneren Baues der festen Körper, in: *Annalen der Physik*, hrsg. von L. W. Gilbert, 76. Bd. (1824), S. 230–248 und 349–372.

[31] G. Delafosse, Recherches sur la cristallisation considérée sous les rapports physiques et mathématiques, in: *Mémoires présentés par divers savants à l'Académie Royal des Sciences de l'Institut de France*, T. 8, Paris 1843.

[32] A. Bravais, Mémoire sur les systèmes formés par des points distribués régulièrement sur un plan ou dans l'espace, in: *Journal de l'Ecole Polytechnique*, Bd. 19 (1850). Die Abhandlung wurde ins Deutsche übersetzt von C. und E. Blasius, Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 90, Leipzig 1897.
Siehe auch K. H. Wiederkehr, Das Weiterwirken der Haüyschen Idee von der Polyedergestalt der Moleküle in der Chemie, die Umgestaltung der Haüyschen Strukturtheorie durch Seeber und Delafosse, und Bravais' Entdeckung der Gittertypen, in: *Centaurus 22* (1978), S. 177–186.

[33] J. C. Fischer, *Physikalisches Wörterbuch oder Erklärung der vornehmsten zur Physik gehörigen Begriffe und Kunstwörter sowohl nach atomistischer als auch nach dynamischer Lehrart betrachtet*, 5 Bde., Göttingen 1798–1804, (5 Supplementbde. und Register bis 1827); insbesondere 1. Teil, S. 159.

[34] Siehe hierzu auch Peter Plaaß, *Kants Theorie der Naturwissenschaft*. Eine Untersuchung zur Vorrede von Kants «Metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft», Göttingen 1965.

[35] R.-J. Haüy, *Traité de Minéralogie*, Vol. 4 und Atlas, Paris 1801/02; ins Deutsche übersetzt mit Anmerkungen und Zusätzen von Dietrich Ludwig Gustav Karsten und (ab 3. Teil) von Christian Samuel Weiß, *Lehrbuch der Mineralogie*, 4 Teile und ein Tafelband mit einer systematischen Aufstellung, auch nach dem Tableau comparatif (1809), Paris und Leipzig 1804–1810.

[36] Zusatz von Christian Samuel Weiß im *Lehrbuch der Mineralogie I*, S. 305: Dynamische Ansicht der Krystallisation.

[37] *Lehrbuch der Mineralogie I*, S. 367.

[38] *Lehrbuch der Mineralogie I*, S. 371.

[39] *Lehrbuch der Mineralogie I*, S. 383.

[40] *Lehrbuch der Mineralogie III*, S. 141.

[41] Siehe dazu auch E. Fischer, Christian Samuel Weiß und seine Bedeutung für die Entwicklung der Kristallographie, in: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Humboldt-Universität zu Berlin, mathem.-naturwiss. Reihe, Jg. 11* (1962), S. 249–255.

Ders., Christian Samuel Weiß und die Zeitgenössische Philosophie (Fichte, Schelling), in: *Forschungen und Fortschritte 37* (1963), S. 141–143.
Weiß hatte sich, obwohl er im Bannkreis der romantischen Naturphilosophie stand, den Sinn für exakte, auf Messungen beruhende Naturwissenschaft bewahrt. E. Fischer sieht in dem allmählichen Abwenden von der physikalisch-dynamischen Theorie der Materie und dem Hinwenden zu einer mathematisch-geometrischen Kristallmorphologie den entscheidenden Fortschritt im Werdegang des großen Kristallographen Weiß. Wir können uns dieser Meinung nicht anschließen. Denn Faraday kam durch ähnliche Gedanken auf den Begriff der Polarisation in einem Dielektrikum und auch auf den des elektrischen Feldes im Vakuum. Den Kristallisationsvorgang beschrieb Weiß als eine chemische Trennungstendenz, die im Materie-Kontinuum das Übergewicht bekommt und die Materie in zwei entgegengesetzte Pole auseinandertreibt, dann aber auf halbem Wege stehenbleibt. – Bei Faraday wird das Dielektrikum bei Anlegen der Spannung an die Kondensatorplatten ebenfalls in einen Polarisationszustand versetzt. Als Beispiel betrachtet er Eis als Dielektrikum; eine elektrolytische Scheidung erfolgt dabei noch nicht. Diese kann erst stattfinden, wenn das Eis zu Wasser geworden ist. In beiden Fällen ist im Polarisationszustand die chemische Trennung als Tendenz vorhanden. – Siehe dazu: Michael Faraday, *Experimentaluntersuchungen über Elektricität.* Deutsch von S. Kalischer, 3 Bde., Berlin 1889–1891, Bd. 1, S. 325, 326 und 328 (Artikel Nrn. 1162, 1164 und 1167), S. 480 und 482 (Art. Nrn. 1667 ff. und 1685 ff.), dazu auch S. 262 und 263 (Art. Nrn. 961 ff.) und Bd. 3, S. 598, Brief vom 10. 12. 1855. Und K. H. Wiederkehr, Die Vorstellungen vom molekularen Aufbau der Dielektrica in historischer Sicht, in: *Sudhoffs Archiv 52* (1968), S. 67, insbesondere S. 69–71. – Es bleibt noch zu untersuchen, auf welchem Wege derartige Gedanken von der deutschen romantischen Naturphilosophie oder sogar von Christian Samuel Weiß zu Faraday kamen.

[42] P. Groth, *Entwicklungsgeschichte der mineralogischen Wissenschaften,* Berlin 1926, S. 59 ff.

[43] C. Neumann [Sohn von F. Neumann], *Über die von Franz Neumann gegebene Begründung des Haüyschen Gesetzes,* in: Berichte über die Verhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch-physische Klasse, 21. Bd., Leipzig 1919, S. 35.

[44] J. F. C. Hessel, Artikel «Krystall» im 5. Bd. des *Physikalischen Wörterbuches* von J. S. T. Gehler, neu bearbeitet, Leipzig 1825–1831, S. 1023–1340;
auch in Ostwalds Klassiker Nr. 88 und 89, hrsg. von E. Hess, Leipzig 1897, unter dem Titel: *Krystallometrie oder Krystallonomie und Krystallographie.*

[45] Erst L. Sohncke machte auf die Verdienste Hessels aufmerksam in seiner Abhandlung: Die Entdeckung des Einteilungsprinzips der Krystalle durch J. F. C. Hessel; eine historische Studie, in: Zeitschrift für Krystallographie und Mineralogie, hrsg. von P. Groth, 18. Bd., Leipzig 1891, S. 486–494.

[46] A. Gadolin, Mémoire sur la déduction d'un seul principe de tous les systèmes cristallographiques avec leur subdivisions, in: *Acta Societatis Scientiarum Fennicae,* Helsingfors, T. 9 (1871), S. 1 ff. – Deutsch in Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 75, *Abhandlung über die Herleitung aller krystallographischen Systeme mit ihren Unterabtheilungen aus einem einzigen Prinzipe,* hrsg. von P. Groth, Leipzig 1896.

[47] A. Bravais, Ostwalds Klassiker Nr. 90, a. a. O., S. 139.

[48] P. Groth, *Entwicklungsgeschichte der mineralogischen Wissenschaft,* S. 111. M. L. Frankenheim, Über die Anordnung der Molecüle im Krystall. *Annalen der Physik und Chemie,* 4. Reihe, hrsg. von J. C. Poggendorff, 7. Bd. (1856), S. 337–382.

[49] L. Sohncke, *Die Entwicklung einer Theorie der Krystallstruktur*, Leipzig 1879.

[50] Siehe dazu J. J. Burckhardt, Zur Geschichte der Entdeckung der 230 Raumgruppen, in: *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 4, S. 235–246.

[51] W. T. Holser, William Barlow, in: *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 1, New York 1970, S. 460–463.

[52] J. Kepler, *Strena, seu de Nive Sexangula*, Francofurti ad Moenum 1611 (deutsch: *Neujahrsgabe oder vom sechseckigen Schnee*, Frankfurt am Main 1611); *Gesammelte Werke*, Bd. 4, hrsg. von M. Caspar und F. Hammer, München 1941, S. 263; Übersetzung von F. Rossmann, Berlin 1943. K. H. Wiederkehr, Johannes Keplers Strena vom sechseckigen Schnee (1611), in: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 50* (1977), S. 9–14.

[53] W. Barlow, Probable Nature of the Internal Symmetry of Crystals, in: *Nature 29* (1883–1884), S. 186–288, 205–207, 404.

[54] W. Barlow, Geometrische Untersuchung über eine mechanische Ursache der Homogenität der Stuctur und der Symmetrie; mit besonderer Anwendung auf Krystallisation und chemische Verbindung; übersetzt von J. Stark, in: *Zeitschrift für Krystallographie und Mineralogie*, hrsg. von P. Groth, 29. Bd., Leipzig 1898, S. 433–588, besonders S. 453 mit Figur 8. – A Mechanical Cause of Homogeneity of Structure and Symmetry Geometrically Investigated; With Special Application to Crystals and to Chemical Combination, in: *Scientific Proceedings of the Royal Society of Dublin 8* (1897), S. 527–690.

[55] V. Quittner, Untersuchungen über die magnetischen Eigenschaften von Magnetitkristallen (Auszug aus der Züricher Dissertation), *Annalen der Physik*, hrsg. von W. Wien und M. Planck, 4. Folge, Bd. 30 (1909), S. 289–325. P. Weiss und seine Schule haben von 1896 an bahnbrechende magnetische Untersuchungen an Eisenmineralien vorgenommen. Am Pyrrhotit entwickelte Weiss den Begriff der spontanen Magnetisierung und des inneren Feldes (1905) und schuf damit die Grundlage für die moderne Theorie des Ferromagnetismus.

[56] Woldemar Voigt, *Lehrbuch der Kristallphysik* (mit Ausschluß der Kristalloptik), Göttingen 1910, Nachdruck 1928 und 1966, S. 119.

[57] P. P. Ewald, *Fifty Years of X-Ray Diffraction*, a. a. O., S. 58.

[58] W. L. Bragg, Die Reflexion der Röntgenstrahlen, in: *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, hrsg. von Johannes Stark, 11. Bd. (1914), Leipzig 1915, S. 346–391 (übersichtliche Zusammenfassung). Auf der ersten Seite sind neben anderem auch acht Abhandlungen der beiden Braggs aus den Jahren 1913 und 1914 zitiert. Alle acht Abhandlungen und dazu noch eine neunte Abhandlung von W. H. Bragg mit dem Titel: Die Intensität der Reflexion von Röntgen-Strahlen an Kristallen (1914) wurden von J. Koppel ins Deutsche übertragen und erschienen in: *Zeitschrift für Anorganische Chemie*, hrsg. von G. Tammann und R. Lorenz, 90. Bd., Leipzig und Berlin 1915, S. 153–296. Diese neun Abhandlungen wurden noch einmal, von Druckfehlern gereinigt und mit Erläuterungen im Geleitwort versehen, gesondert von E. Schiebold herausgegeben unter dem Titel: W. H. Bragg und W. L. Bragg, *Die Reflexion der Röntgenstrahlen*, Leipzig 1928, mit Angabe weiterer Literatur bis zu diesem Zeitpunkt.

[59] W. H. Bragg, Die Reflexion der Röntgenstrahlen, *Jahrb. d. Rad. u. El.* (1914), S. 350.

[60] (W.) L. Bragg, *Geschichte der Röntgenspektralanalyse*, Berlin 1947, S. 14 (Broschüre); Originaltitel: *The History of X-Ray Analysis*, London/New York/Toronto 1945.

Eine historisch ausführlichere Darstellung findet sich in: *The Development of X-Ray Analysis* by Sir Lawrence Bragg, hrsg. von D. C. Phillips und H. Lipson, London 1975.

[61] G. Wulff, Über die Kristallröntgenogramme. *Physikalische Zeitschrift 14* (1913), S. 217–222.

[62] M. v. Laue, *Ges. Schr. u. Vortr.*, Bd. 3, S. XXIV.

Summary

The first part of the article deals with the efforts to explain the nature of the X rays. It was in Munich in 1912 that Max von Laue proved their character of electromagnetic waves and at the same time the lattice structure of crystals. On the latter aspect, it began a controversy between the Dynamists and the Atomists, because the lattice theory and the space group theory were not yet regarded as facts. There is shown the role of William Barlow in the structural analysis of alkali-haloids, in which William Henry Bragg and his son William Lawrence Bragg were successful. It follows the description how these two found the way to measure the length of X rays and the size of an elementary cell.

Dr. rer. nat. Karl Heinrich Wiederkehr
Studiendirektor und Privatdozent
Birkenau 24
D-2000 Hamburg 76