

Hans-Dieter Barke, Reinhard Rölleke

24. RÖNTGEN, VON LAUE und BRAGG: die Struktur der Kristalle

„Im Jahre 1912 entdeckte Laue, dass Röntgenstrahlen an Kristallen gebeugt werden“. Mit diesem Satz leiten die Autoren des Schulbuchs „Chemie heute“ [1] den Exkurs „Röntgenstrukturanalyse“ ein und beschreiben Prinzip und Ziel dieser wichtigen Analysemethode in heutigen Laboratorien. Es ist vollkommen richtig und wichtig, Schülern und Schülerinnen diese und andere Methoden der Instrumentellen Analytik näher zu bringen.

Hinsichtlich des Erkenntnisprozesses in den Naturwissenschaften erscheint allerdings die Geschichte der Entdeckung der Beugung von Röntgenstrahlen an Kristallen noch interessanter zu sein, insbesondere die geniale Idee des MAX VON LAUE. Er selbst kommentiert seinen entscheidenden Gedanken folgendermaßen [2]: „Die Entdeckungsgeschichte der Röntgenstrahlinterferenz kennzeichnet so recht den Wert der wissenschaftlichen Hypothese. Viele haben schon lange vor Friedrich und Knipping Röntgenstrahlen durch Kristalle gesandt. Aber ihre Beobachtungen beschränkten sich auf den direkt hindurchgehenden Strahl, an welchem außer der Schwächung durch den Kristall nichts Bemerkenswertes zu sehen war; die viel weniger intensiven gebeugten Strahlen entgingen ihnen. Erst die Hypothese der Raumgitter brachte die Idee, doch einmal dessen Umgebung zu durchforschen“.

Der naturwissenschaftliche Erkenntnisprozess wird für Lernende an diesem Beispiel sehr deutlich, der „Wert der wissenschaftlichen Hypothese“ ist so einmalig und spannend zu vermitteln, wie es mit nahezu keiner anderen historischen Hypothese möglich ist. MATUSCHEK und JANSEN [3] haben diesbezüglich das historisch-problemorientierte Unterrichtsverfahren konzipiert: „Bedeutsame Entdeckungsgeschichten sollten Chemielehrerinnen und Chemielehrer kennen, um im Unterricht einmal große Forscherpersönlichkeiten vorzustellen oder Wege wichtiger Entdeckungen in der Geschichte mit den Schülern zu gehen“.

Zunächst wird die historische Entwicklung bis zu LAUE's Idee aufgezeigt und danach auf das naturwissenschaftliche Erkenntnisverfahren übertragen: Auf diesem Weg spielen sowohl die Kristallgittertheorien von BRAVAIS und SOHNCKE als auch die Arbeiten von RÖNTGEN eine große Rolle. Für den entsprechenden Chemieunterricht wird vorgeschlagen, zum einen mit Laserstrahl und optischen Gittern anschauliche Modellexperimente zur Röntgenstrukturanalyse durchzuführen. Zum anderen werden Möglichkeiten aufgezeigt, mit einem Schulröntgengerät sowohl die Entdeckungsgeschichte LAUE's nachzuvollziehen, als auch die modernen Formen der Röntgenstrukturanalyse zu veranschaulichen.

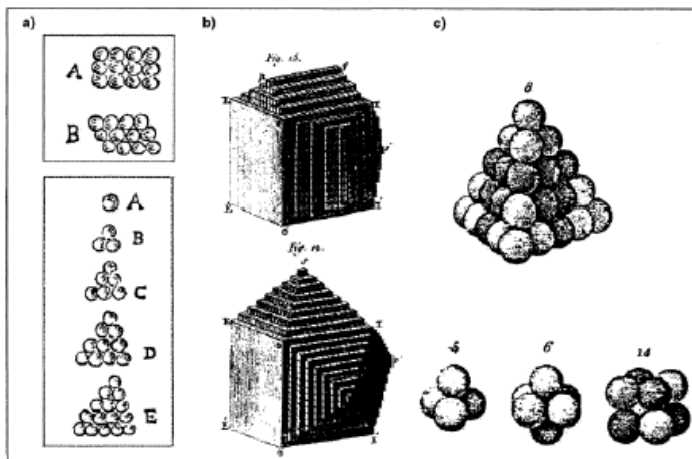


Abb. 24.1: Vorstellungen vom Aufbau der Kristalle von KEPLER, HAÜY und WOLLASTON

24.1 Kristallgitterhypothesen von KEPLER, HAÜY, BRAVAIS und SOHNCKE

Obwohl die gesamte Menschheit in Ländern, in denen es im Winter immer wieder schneit, schon immer sechseckige Schneeflocken beobachtet hat, dauerte es bis zum Jahre 1611, als erste wissenschaftliche Hypothesen zur Erklärung der Kristallform der Schneeflocke versucht wurden. KEPLER [4] stellte nach Beobachtungen zum „sechseckigen Schnee“ fest: „Da stets, wenn es zu schneien beginnt, die ersten Schneeflocken die Figur von sechsstrahligen Sternen zeigen, muss es eine bestimmte Ursache dafür geben. Denn es wäre Zufall, warum fallen sie nicht fünfstrahlig oder siebenstrahlig, warum immer sechsstrahlig?“ [4].

KEPLER nahm für den Wasserdampf der Luft „Dunstkügelchen“ an und diskutierte deren Anordnung bei der Kondensation zur Schneeflocke durch Modellkugeln (vgl. (a) in Abb. 24.1): „Wenn man in einer waagerechten Ebene gleich große Kugeln zusammenschiebt, so dass sie sich berühren, legen sie sich entweder in Dreiecks- oder in Vierecksform zusammen; dort umgeben sechs, hier vier Kugeln eine mittlere. Die Fünfecksform kann eine gleichmäßige Bedeckung nicht ergeben, und die Sechsecksform lässt sich auf die Dreiecksform zurückführen“. Des Weiteren diskutierte KEPLER die Schichtung dicht gepackter Kugeln im Dreiecksmuster, fand die dichteste Kugelpackung und deren Koordinationszahl 12: „Und wieder wird eine Kugel von zwölf anderen berührt, nämlich von sechs benachbarten in derselben Ebene und von je dreien oben und unten“. Indem KEPLER also Kugeln als kleinste Wasser-Teilchen annahm und ihre dichteste, hexagonale Anordnung im Raum diskutierte, konnte er die permanent auftretende sechseckige Kristallform der Schneeflocken zutreffend postulieren: Er fand damit den Zusammenhang von äußerer Kristallform und innerer Ordnung kleinster Teilchen!

HAÜY [5] dachte ebenfalls an den Aufbau von Kristallen aus kleinsten Teilchen, nahm aber nicht Kugeln als deren Form an, sondern gab ihnen die Form der Spaltstücke des jeweiligen Kristalls. Am Beispiel des Calcit-Kristalls äußerte er seine Vorstellungen (vgl. (b) in Abb. 24.1): „Diese, gewissermaßen an der Gränze der mechanischen Theilung gebrachten Rhomboiden sind das, was wir hier Integral-theilchen (*molécules intégrantes*) des Kalkspats nennen, um sie von den Elementartheilchen (*molécules élémentaires*) dieser Substanz zu unterscheiden, welche theils die des Kalks und theils die der Kohlensäure sind“ [5]. Zu Kristallen mit Bausteinen von kubischer Form zeichnete er seine Vorstellungen auch auf (vgl. (b) in Abb. 24.1).

WOLLASTON [6] kehrte zurück zur Kugelform und begründete sie mit den ungerichteten Bindekräften der kleinsten Teilchen im Kristall: „The existence of atoms requires merely mathematical points endued with powers of attraction and repulsion equally on all sides, so that their extent is virtually spherical“ [6]. Darüber hinaus hob er dichteste Kugelpackungen und deren Lücken als Strukturprinzip für Kristalle hervor und zeichnete entsprechende Modelle auf, wie sie in heutigen Lehrbüchern verwendet werden (vgl. (c) in Abb. 24.1). WOLLASTON war sich bei diesen Zeichnungen stets um das Spekulative bewusst: „Es ist vielleicht zu viel, zu hoffen, dass die geometrische Anordnung der Atome jemals genau bekannt sein wird“ [6].

In diesbezüglichen Spekulationen ging BRAVAIS [7] noch einen Schritt weiter: Er löste sich vollkommen von Vermutungen zu Kristallstrukturen und beschrieb eher mathematisch aufgrund von Symmetriebetrachtungen mögliche dreidimensionale, sich in alle Raumrichtungen wiederholende Punktmuster. Er gelangte zu den 14 bekannten Elementargittern, die durch Translation in drei Raumrichtungen unendliche Raummuster ergeben (vgl. (a) in Abb. 24.2).

In seinem Lehrbuch von 1879 greift SOHNCKE [8] die Symmetriebetrachtungen von BRAVAIS auf und erklärt: „Krystalle – unbegrenzt bedacht – sind regelmäßige unendliche Punktsysteme, d.h. solche, bei denen um jeden Massenpunkt herum die Anordnung der übrigen diesselbe ist, wie um jeden anderen Massenpunkt. Ein Krystall ist ein endliches Stück eines unendlichen regelmäßigen Punktsystems“. Es stellt sich die Aufgabe, „alle überhaupt möglichen regelmäßigen Punktsysteme von allseitig unendlicher Ausdehnung zu finden“. Schließlich baute er sogar eigene Strukturmodelle (vgl. (b) in Abb. 24.2): „Um die Anschauung von den regelmäßigen unendlichen Punktsystemen zu erleichtern, habe ich einfache Modelle konstruirt, in welchen Wachspen von 6 - 7 mm Durchmesser, mit Siegellack an Stricknadeln befestigt, die Systempunkte vorstellen“ [8].

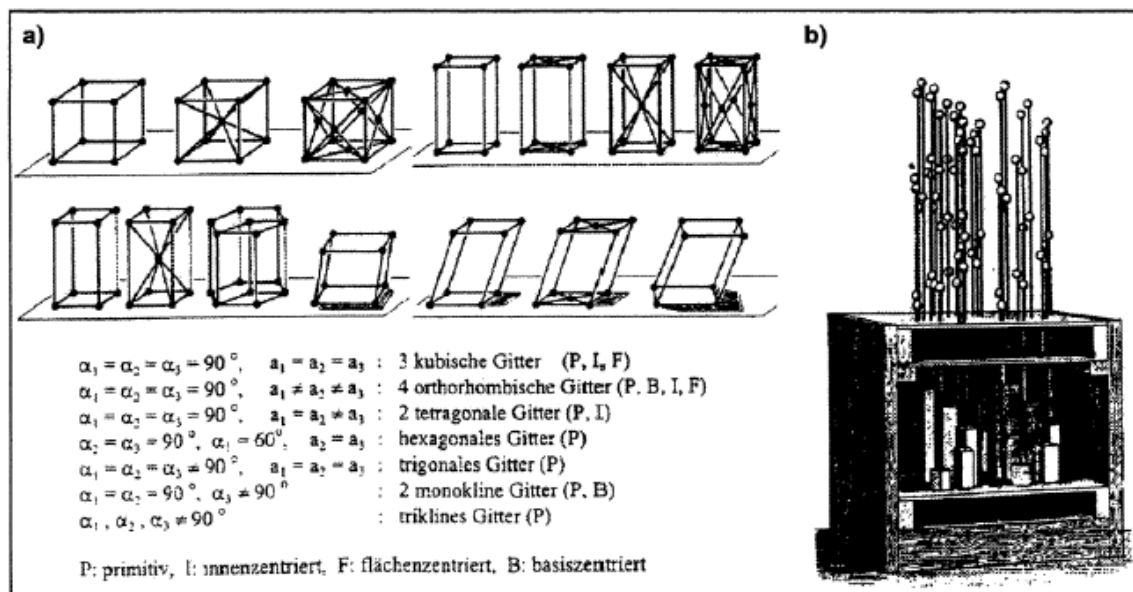


Abb. 24.2: Strukturvorstellungen von BRAVAIS und SOHNCKE [8]

In seinem Werk „Prüfung der Theorie an der Erfahrung“ stellt SOHNCKE eine interessante Verbindung zwischen den rein theoretischen Punktsystemen und Formen existierender Kristalle her, ist sich aber über die reine Spekulation vollkommen im Klaren: „Welche von den regelmäßigen Punktsystemen möglich sind, ist ganz unentschieden geblieben. Vielleicht kann es gelingen, einen Zusammenhang zwischen dem Bau der Molekel und der Strukturform zu entdecken. So eröffnet diese Theorie die Aussicht auf eine, wenn auch wohl noch ferne, Beantwortung dieser Frage“ [8].

24.2 RÖNTGEN's Entdeckung einer „neuen Art von Strahlen“

WILHELM CONRAD RÖNTGEN machte im Jahre 1895 eine Entdeckung, die zu damaliger Zeit im wahrsten Sinn des Wortes unglaublich gewesen sein muss und als wissenschaftliche Sensation in der Weltpresse gehandelt wurde: „Wohl noch nie hatte in der Geschichte der Wissenschaft eine Entdeckung oder Erfindung in wenigen Tagen eine solche Verbreitung gefunden. Die Entdeckung der X-Strahlen hinterließ beim Publikum einen derart tiefen Eindruck, dass selbst profilierte Wissenschaftler und Freunde Röntgens an der Echtheit der erhaltenen Bilder gezweifelt hätten, wäre ihnen nicht die exakte und zuverlässige Art der Arbeit Röntgens bekannt gewesen“ [9]. So schreibt Lummer: „Denn wahrlich beim Lesen der einige Tage vorher von Professor Röntgen mir zugesandten vorläufigen Mitteilung: ‘Über eine neue Art von Strahlen’ konnte ich mich des Gedankens nicht erwehren, ein Märchen vernommen

zu haben, wenn auch der Name des Autors und dessen stichhaltige Beweise mich von diesem Wahne schnell genug befreien. Wohl stand es schwarz auf weiß gedruckt, dass man Metallgewichte in einem geschlossenen Holzkasten photographieren und die Knochen der lebenden Hand auf die Platte zaubern könnte“ [9].

Eines der wenigen Interviews, das der den Medien gegenüber scheue RÖNTGEN zu Beginn des Jahres 1896 dem Berichterstatte H.J.W. DAME im Auftrag einer amerikanischen Zeitschrift gab, zeigt besonders anschaulich die Entdeckungsgeschichte auf [9]: „Ich interessierte mich schon seit langer Zeit für die Kathodenstrahlen, wie sie von Hertz und speziell von Lenard in einer luftleeren Röhre studiert worden waren. Ich hatte mir vorgenommen, einige selbständige Versuche in dieser Beziehung anzustellen. Ich war noch nicht lange bei der Arbeit, als ich etwas Neues beobachtete.“ „Welches Datum war es?“ „Der 8. November.“ „Und welcher Art war die Beobachtung?“ „Ich arbeitete mit einer Hittorf-Crookeschen Röhre, welche ganz in schwarzes Papier eingehüllt war. Ein Stück Bariumplatinzyanür-Papier (Bariumtetracyanoplatinat, $\text{Ba}[\text{Pt}(\text{CN})_4]$) lag daneben auf dem Tisch. Ich schickte einen Strom durch die Röhre und bemerkte quer über das Papier eine eigentümliche schwarze Linie.“ „Was dachten Sie da?“ „Ich dachte nicht, sondern ich untersuchte. Ich vermutete, dass die Wirkung von der Röhre herkommen müsse und prüfte nach dieser Richtung hin genauer. Bald war jeder Zweifel ausgeschlossen. Es kamen ‘Strahlen’ von der Röhre, welche eine lumineszierende Wirkung auf den Schirm ausübten. Ich wiederholte den Versuch mit Erfolg in immer größeren Entfernungen, fast bis zu 2 Metern. Anfangs hielt ich sie für eine neue Art von Licht. Sicher aber war es etwas Neues, noch Unbekanntes.“ „Ist es Licht?“ „Nein, denn es kann weder reflektiert noch gebrochen werden.“ „Ist es Elektrizität?“ „Nicht in der bekannten Form.“ „Was ist es dann?“ „Ich weiß es nicht“ [9].

Da die entdeckte Strahlung für RÖNTGEN kein Licht war und er nicht ahnen konnte, dass sie sich später als besonders kurzwellige elektromagnetische Strahlung herausstellte, die sich vom sichtbaren Licht nur in der Wellenlänge unterscheidet, nannte er sie in seiner ersten Veröffentlichung eine „neue Art von Strahlen“ [10] und beschrieb sie in 17 Punkten sehr genau: Die Durchlässigkeit vieler Materialien in Abhängigkeit von Dichte, Schichtdicke und Entfernung, die besondere Undurchlässigkeit von Blei und Bleiverbindungen, die chemische Wirkung auf fotografische Platten, die Erzeugung von Schatten auf Schirm oder Fotoplatte, etc. Die Ablenkung oder gar Reflexion der neuen Strahlen konnte RÖNTGEN nicht finden, ebenfalls nicht die bei üblichem Licht gut bekannten Interferenzen an einem optischen Gitter von bis zu 100 Strichen pro mm Glasplatte oder an einer feinen Bleilochblende: „15. Nach Inter-

ferenzererscheinungen der X-Strahlen habe ich viel gesucht, aber leider, vielleicht nur infolge der geringen Intensität derselben, ohne Erfolg“ [10].

Von ganzem Erfolg gekrönt war dagegen das „Durchleuchten“ von Materie mit X-Strahlen: RÖNTGEN konnte mit den Fotos seiner durchleuchteten Hand nicht nur die sensationellen Anwendungen in der Medizin aufzeigen (vgl. Abb. 24.3), sondern anhand von Fotos des Inneren seines Jagdgewehres ebenfalls anschaulich machen, welche Materialprüfungen ohne Zerstörung der geprüften Gegenstände möglich sind: „Etwa fünfhundert Publikationen erschienen allein in dem einen Jahr 1896. Schon am 13. Januar 1896 wurde Röntgen zur Vorführung der neuen Strahlen zu Kaiser Wilhelm II. nach Berlin befohlen; am 26. Januar hielt er in Würzburg den – soweit mir bekannt – einzigen öffentlichen Vortrag, an dessen Schluss der Anatom KÖLLICKER den Vorschlag machte, die X-Strahlen ‘Röntgenstrahlen’ zu nennen“ [11].



Abb. 24.3: Hand des Anatomen von KOELLIKER, aufgenommen am 23.1.1896 [9]

Auch der erste Nobelpreis für Physik wurde RÖNTGEN im Jahr 1901 zuerkannt. Allerdings fand man über die genannten, sensationellen Anwendungen hinaus keine neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse bezüglich der Interferenz der Röntgenstrahlen. RÖNTGEN selbst und viele Kollegen suchten intensiv nach Interferenzphänomenen – aber vergeblich: „Die Physik der Röntgenstrahlen machte siebzehn Jahre lang nur höchst bescheidene Fortschritte“ [9] – bis zu LAUE’s Arbeiten im Jahre 1912!



Abb. 24.4: Nobelpreisträger RÖNTGEN und LAUE [13]

24.3 LAUE's geniale Idee

Wie für viele Entdeckungen die jeweilige Zeit reif gewesen ist, war sie auch 1912 reif bezüglich des Nachweises von Beugungserscheinungen durch Röntgenstrahlen. GERLACH stellte fest: „Dass Max Laue seine Entdeckung in München machte, kommt einfach daher, dass er damals in München war. Aber hier waren auch Röntgen, Sommerfeld, Groth, Debye, Ewald, Wagner, Koch, Friedrich – die Münchener Luft war voll von Röntgenstrahlen, von Interferenzen, von Kristallen, von Wellentheorie des Lichts“ [11].

Privatdozent LAUE, der aus Göttingen kommend seit 1909 an SOMMERFELD's Institut arbeitete, war dann auch derjenige, der einen Zugang sowohl zu Fragen der optischen Beugung, als auch zur Kristallgitterhypothese hatte, und deshalb entscheidende Verknüpfungen zu erkennen vermochte. Die ersten beeindruckenden Beobachtungen zur Interferenz des Lichtes erlebte LAUE [14] übrigens bereits als Schüler: „Weiter besprachen wir viel die optischen Erscheinungen, namentlich die Interferenz des Lichtes und die damals so rätselhafte Beugung. Der große Reiz, den diese Vorgänge ausübten, beruhte wohl darauf, dass man sie ohne Messinstrumente unmittelbar sinnlich wahrnehmen kann. Das besondere Interesse für Optik, das sich später bei den Röntgenstrahlen auswirkte, stammt aus diesen Schülerzeiten“. Auch seine Universitätsausbildung schloss LAUE mit einer diesbezüglichen Thematik ab: „Gegen Semesterende ging ich zu Planck und bat ihn um ein Thema für eine Dissertation. Im Hinblick auf eine

Vorlesung von Lummer gab er mir die Theorie der Interferenzerscheinungen an den planparallelen Platten auf. Und daran habe ich bis zum Sommer 1903 gearbeitet“ [14].

Während seiner Zeit als „Postdoc“ in Göttingen intensivierte er die Studien im Fach Physik und belegte das Fach Chemie zur Erlangung der Lehrbefähigung an Höheren Schulen: „Da ich dabei Chemie als ein Prüfungsfach gewählt hatte, musste ich auch ein Examen in Mineralogie ablegen. Aus Büchern hatte ich mir die allerelementarste Kristallographie, d.h. die Kenntnis der Kristallklassen, angeeignet“ [14]. Seine ersten praxisbezogenen Begegnungen mit Strukturmodellen bezüglich der Kristallographie hatte er während der Zeit als Privatdozent in München: „Von besonderer Bedeutung für mich wurde es, dass in München noch die Tradition der Raumgitterhypothese für die Kristalle lebendig war, von der man anderswo kaum noch sprach. Das lag zum Teil daran, dass sich von den Zeiten Leonhard Sohnckes, der bis 1897 in München gewirkt und zu ihrer mathematischen Durcharbeitung viel beigetragen hatte, Gittermodelle in den Sammlungen der Universitätsinstitute zu sehen waren. In erster Linie aber gebührt das Verdienst daran dem Mineralogen Paul von Groth, der in seinen Vorlesungen stets auf sie hinwies“ [14].

LAUE hatte somit Interferenzerscheinungen *und* Kristallgitterhypothese verinnerlicht. Er diskutierte im Münchener Gelehrtenkreis zum einen über die aktuellen Fragen zu Röntgenstrahlen und sann diesbezüglich über Korpuskular- oder Wellentheorien und Möglichkeiten zur Interferenz nach. Zum anderen begegneten ihm zwangsläufig in Sammlungen der Institute ständig die Gittermodelle aus den Zeiten von SOHNCKE: Sie sind in seiner Anschauung möglicherweise zur überzeugenden Theorie geworden, während die Raumgitterhypothese für seine Kollegen „als zweifelhafte Hypothese ein ziemlich unbekanntes Dasein fristete“ [14].

In seinem Vortrag nach der Verleihung des Nobelpreises in Stockholm schilderte LAUE die entscheidenden Schritte zu seiner genialen Idee folgendermaßen [14]: „So standen die Dinge, als im Februar 1912 eines Abends P.P. Ewald zu mir kam. Er arbeitete auf Sommerfelds Veranlassung an der mathematischen Untersuchung, wie sich lange elektromagnetische Wellen in einem Raumgitter verhalten. In diesem Gespräch kam mir der naheliegende Gedanke, einmal nach dem Verhalten von Wellen zu fragen, welche gegen die Gitterkonstanten des Raumgitters kurz sind. Und hier sagte mir mein optisches Gefühl sogleich: Dann müssen Gitterspektren auftreten. Dass die Gitterkonstante bei Kristallen in der Größenordnung 10^{-8} cm ist, war aus Dichte und Molekulargewicht leicht zu begründen. 10^{-9} cm war die von Wien und Sommerfeld geschätzte Größenordnung der Wellenlänge der Röntgenstrahlen. Also war das Verhältnis von Wellenlänge und Gitterkonstanten außer-ordentlich günstig, wenn man Röntgen-

strahlen durch einen Kristall sendete. Ich sprach sogleich Ewald gegenüber aus, dass ich dabei Interferenzerscheinungen an Röntgenstrahlen erwartete“.

FRIEDRICH und KNIPPING führten bekanntermaßen die entsprechenden Experimente erst mit einem Kupfersulfatkristall bei zufälliger Durchstrahlrichtung aus und hofften auf Reflexe zurückgeworfener Strahlen *vor* dem Kristall – ohne Erfolg. BRAGG vermutete: “When hope had been practically abandoned, Knipping tried placing the photographic plate *behind* the crystal, so as to catch rays bent through a small angle, and this fortunate shot in the dark hit the mark“ [15]. Noch war also nicht klar, wo man Beugungspunkte um den Primärstrahl herum erwarten konnte. Nach dem ersten Erfolg mit dem Kupfersulfat-Kristall (vgl. (a) und (b) in Abb. 24.5) nahm man mit Zinkblende einen kubisch symmetrischen Kristall und fand die allseits bekannten Beugungsmuster bei Durchstrahlung längs einer vierzähligen und längs einer dreizähligen Symmetrieachse (vgl. (c) und (d) in Abb. 24.5).

Berechnungen und Theorie konnte LAUE ziemlich schnell fertig stellen: „Ein großes Glück war es, dass mir Sommerfeld den Artikel ‘Wellenoptik’ für die Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften zu bearbeiten gab“ [14]. Mit diesem Artikel lagen – zufällig? – die Berechnungen für Interferenzen an zweidimensionalen Kreuzgittern bereits vor und waren nur auf dreidimensionale Raumgitter zu übertragen.

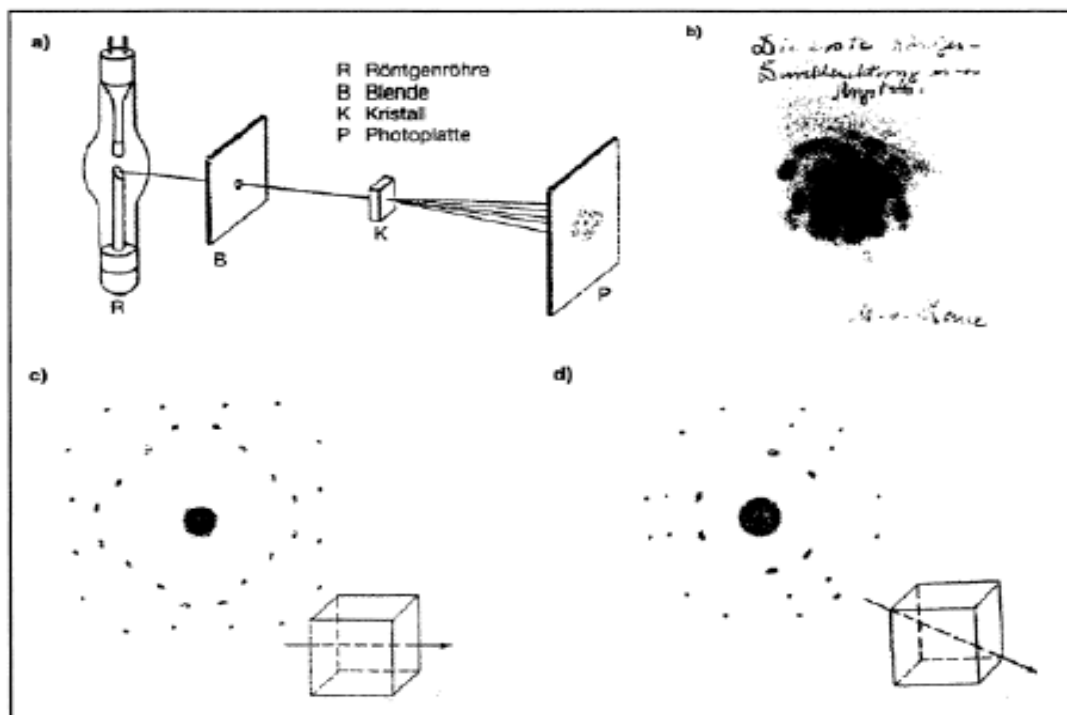


Abb. 24.5: Schema einer Apparatur zur Röntgeninterferenz und erste Laue-Beugungsmuster [12]

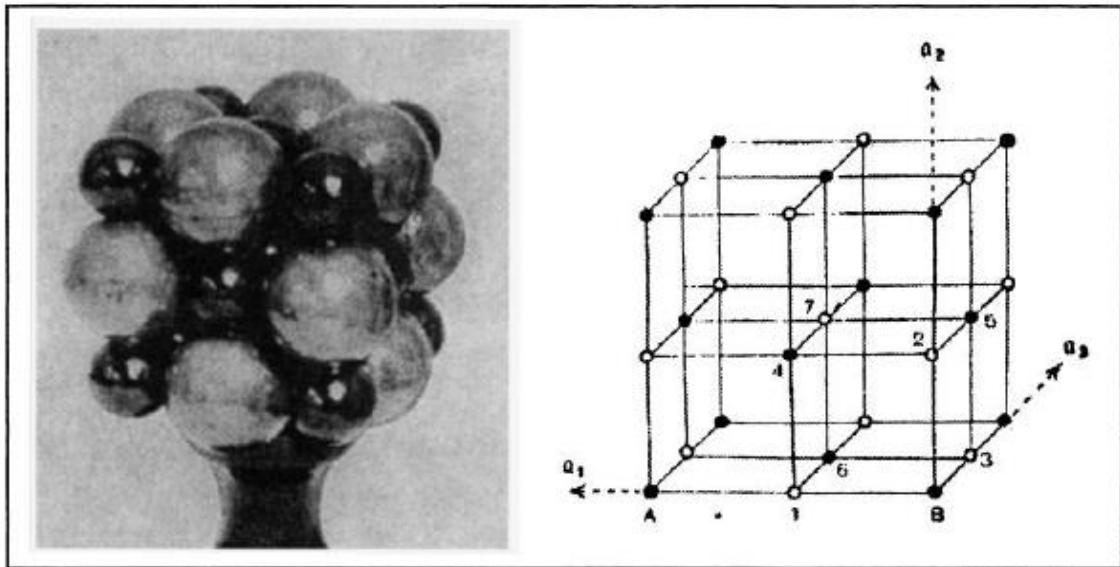


Abb. 24.6: Modelle der Natriumchlorid-Struktur von BRAGG [15] und LAUE [12]

Ein Weg war gefunden, Kristallstrukturen zu bestimmen: „Wenn die Röntgenstrahlen in elektromagnetischen Wellen bestehen, so war zu vermuten, dass die Raumgitterstruktur bei einer Anregung der Atome zu freien oder erzwungenen Schwingungen und zu Interferenzerscheinungen Anlass gibt; und zwar zu Interferenzerscheinungen derselben Natur, wie die in der Optik bekannten Gitterspektren. Die Konstanten dieser Gitter lassen sich aus den kristallographischen Daten leicht errechnen“ [14].

Diese ersten Beugungsexperimente waren so bahnbrechend, weil sie zweierlei bestätigten: die Wellentheorie der Röntgenstrahlen *und* die Raumgitterhypothese der Kristalle! Auf beiden Gebieten konnten Physiker und Chemiker aufgrund von LAUE's Arbeiten weiterforschen: Die Wellenlängen der Röntgenstrahlen wurden jetzt ermittelt und man wandte sich der Spektroskopie im Bereich der Röntgenstrahlen zu. Der regelmäßige Aufbau der Kristalle aus Atomen, Ionen oder Molekülen musste von letzten Zweiflern akzeptiert werden und man eröffnete das Forschungsfeld der Röntgenstrukturanalyse, das bis heute von überragender Bedeutung für die Analytik geblieben ist.

Vater H.W. BRAGG und Sohn L. BRAGG [15] fanden 1913 die selektive Reflexion von Röntgenstrahlen und auf dieser Grundlage die nach ihnen benannte Reflexionsbedingung. Damit war das Drehkristallverfahren geboren und die Voraussetzung geschaffen, gezielt die Struktur von Kristallen herauszufinden und diesbezügliche Strukturmodelle zu bauen (vgl. (1) in Abb. 24.6). Sie waren sich auch bewusst darüber, dass keine Moleküle in Kristallen der

Salze vorliegen: „For instance, chemists had talked of common salt, sodium chloride, as being composed of ‘molecules’ of NaCl. My very first crystal determination showed that there are no molecules of NaCl consisting of one atom of sodium joined to one of chlorine. The atoms are arranged like the black and white squares of a chessboard, though in three dimensions. Each atom of sodium has six atoms of chlorine around it at the same distance, and each atom of chlorine has correspondingly six atoms of sodium around it“ [16].

Es stellte sich allerdings heraus, dass viele Chemiker und Physiker dieser Zeit nicht bereit waren, die Vorstellung von NaCl-Molekülen aufzugeben: „Some chemists at that time were very upset indeed about this discovery and begged me to find that there was just a slight approaching of one atom of sodium to one of chlorine so that they could be regarded as a properly married pair“ [16]. An anderer Stelle forderte BRAGG deshalb, den Molekülbegriff für anorganische Substanzen völlig zu ignorieren: „Further work has shown that nearly all inorganic substances are of this continued type of pattern with no molecular association; the concept of the molecule should hardly have any place in textbooks of inorganic chemistry because it is so rarely necessary“ [15].

Auch LAUE ließ seine Berechnungen in eine Zeichnung zur Natriumchlorid-Struktur münden (vgl. (2) in Abb. 24.6) und kommentierte: „Der Begriff des Moleküls verliert nach diesen Modellen für das feste NaCl und KCl jede Bedeutung. Jedes Cl-Atom hat sechs Metallatome in genau gleichem Abstand neben sich“ [12]. In ihren Beschreibungen denken sowohl LAUE als auch BRAGG immer noch an Atome als Teilchen der Salze, obwohl die Publikationen des ARRHENIUS aus dem Jahre 1884 schon 20 Jahre alt waren. Für die Bildunterschrift des Strukturmodells von BRAGG (vgl. (1) in Abb. 24.6), die 1943 verfasst worden ist, liest man dann schließlich doch: „Crystal models which illustrate the packing together of ions“ [15].

Sowohl LAUE als auch Vater und Sohn BRAGG erhielten für ihre zukunftsweisenden Forschungen nicht nur den Nobelpreis, sondern alle wurden sie in ihrem Heimatland geadelt: LAUE hieß nun MAX VON LAUE, die BRAGG’s durften sich Sir nennen. Auch RÖNTGEN erhielt den – sogar aller ersten – Nobelpreis und auch er sollte geadelt werden. Doch er nahm den in Würzburg von der Regierung verliehenen „persönlichen Adel“ nicht an: „Er wolle das bleiben, was er aus eigener Kraft geworden war: der Wissenschaftler“ [11].

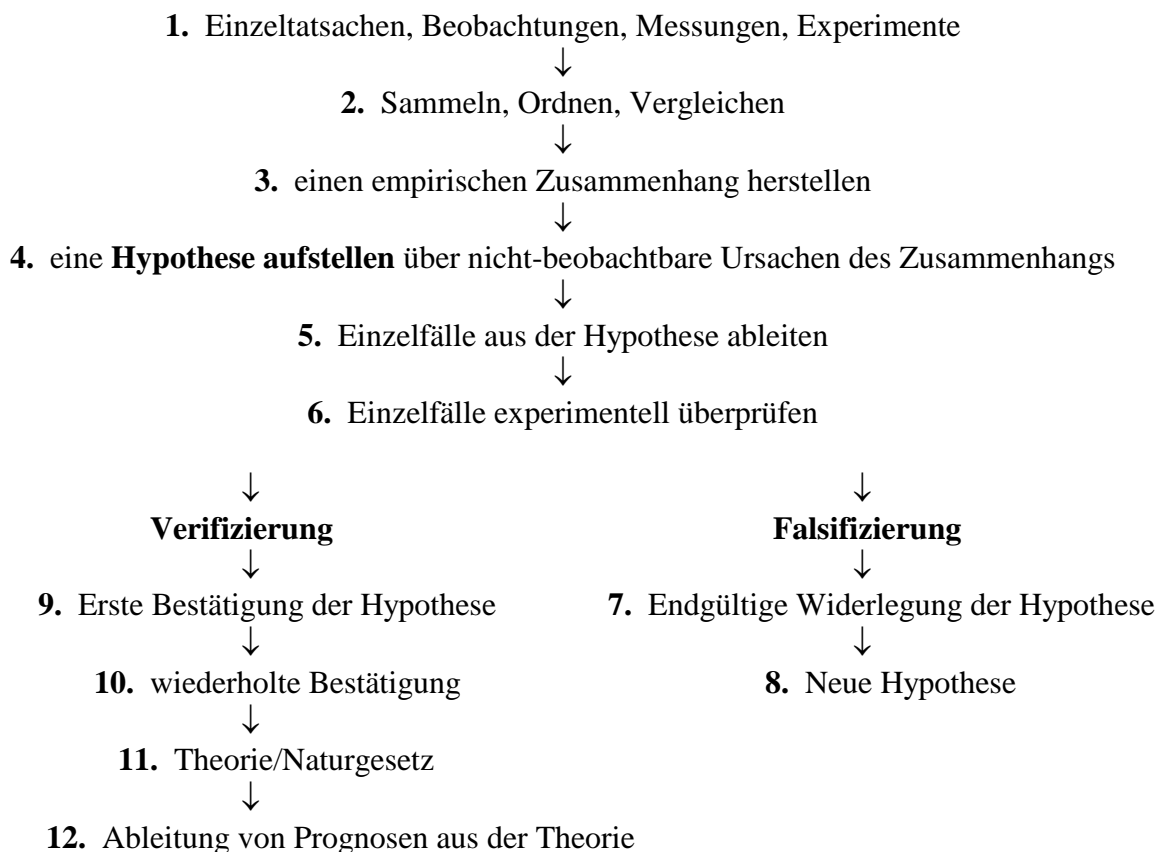
24.4 Chemiedidaktische Relevanz

Es besteht Konsens darüber, dass die Lernenden das empirische Erkenntnisverfahren in den Naturwissenschaften exemplarisch kennen lernen sollen, dass die Kompetenz „Erkenntnisge-

winnung“ in allen neuen Lehrplänen und Richtlinien gefordert wird. An Beispielen sollen im Chemieunterricht möglichst Hypothesenprüfungen selbständig geplant und durchgeführt werden. Schmidkunz und Lindemann [17] beschreiben diesbezüglich das forschend-entwickelnde Unterrichtsverfahren und veranschaulichen es an Themen der Schulchemie – beispielsweise wird die Oxidationstheorie als Beispiel für die Prüfung einer Hypothese gewählt.

Um auch die Prüfung fachwissenschaftlicher Hypothesen nachvollziehen zu können, wird ein spezifisches Übersichtsschema gewählt (vgl. Tab. 24.1, siehe auch Kap. 6) – die Schritte der Erkenntnismethode in den Naturwissenschaften werden darin sehr deutlich. Insbesondere legt diese Übersicht Wert darauf, dass aus der Hypothese ein Einzelfall abgeleitet und dieser Einzelfall der experimentellen Prüfung unterworfen wird. Erst die wiederholte Bestätigung von abgeleiteten Einzelfällen verifiziert die Hypothese und bildet die Grundlage dafür, neue Theorien und Gesetze zu formulieren – dieser Gedanke sollte auch Schülern und Schülerinnen vermittelt werden.

Tab. 24.1: Schrittfolge der empirischen Erkenntnismethode in den Naturwissenschaften



Die Schritte der Erkenntnis sind mit den Ziffern versehen worden, um im Folgenden eine Übertragung auf die Entwicklung von LAUE's Idee übersichtlich zu machen (vgl. Tab. 24.2 und 24.3). Tabelle 24.2 zeigt zunächst das Beispiel der Falsifizierung der Hypothese, dass Röntgenstrahlen am optischen Gitter gebeugt werden können. Tabelle 24.3 soll die Verifizierung der LAUE-Hypothese formal nach Tabelle 24.1 wiedergeben.

Tab. 24.2: Die Falsifizierung einer Hypothese am Beispiel der Röntgenstrahlinterferenz

Vergleich empirischer Befunde zu Eigenschaften der Licht- und Röntgenstrahlen		
	Lichtstrahlen	Röntgenstrahlen
1) + 2) + 3)	durchdringen einige Materialien, erzeugen Schattenbilder, schwärzen die Fotoplatte, werden am optischen Gitter gebeugt	durchdringen sehr viele Materialien, erzeugen Schattenbilder schwärzen die Fotoplatte, ?
4)	<i>Röntgenstrahlen besitzen Wellennatur und können gebeugt werden.</i>	
5) + 6) + 7)	Ein ausgeblendeter Röntgenstrahl wird auf ein optischen Gitter, ein schräg gestelltes Gitter und eine Bleilochblende gelenkt: In allen Fällen werden keine Interferenzerscheinungen beobachtet, <i>die Hypothese wird nicht bestätigt.</i>	
8)	Es wird eine sehr viel kleinere Wellenlänge vermutet, das optische Strichgitter muss für ein Auftreten von Interferenzen sehr viel feiner sein als das aller technisch herstellbarer Gitter.	

Tabelle 24.3 zeigt den Erkenntnisweg am Beispiel der Prüfung von LAUE's Hypothese: Nachdem alle bekannten Einzeltatsachen und Messungen zu den Problemfeldern „Struktur von Kristallen“ und „Eigenschaften der Röntgenstrahlen“ in sich geordnet und in einen Zusammenhang gebracht wurden (Punkte 1 - 3), konnten beide Hypothesen aufgestellt werden (Punkt 4). Dabei war die Kristallgitterhypothese nur für einen kleinen Kreis von Wissenschaftlern des Jahres 1912 interessant, während die gesamte wissenschaftliche Welt die Bestätigung der Wellentheorie der Röntgenstrahlung durch das Gelingen von Beugungsexperimenten erwartete. LAUE's Gespräche zeigen, dass er für beide Problemkreise sensibilisiert war und deshalb die Idee für die Ableitung eines Einzelfalls hatte, der beide Hypothesen betraf (Punkt 5). Die experimentellen Prüfungen übernahmen FRIEDRICH und KNIPPING (Punkt 6), beide Hypothesen wurden bestätigt (Punkt 9). Nach wiederholten Bestätigungen durch die BRAGG's wurden diesbezügliche Theorien und Gesetzmäßigkeiten formuliert (Punkte 10 - 12). Insofern „kennzeichnet die Entdeckungsgeschichte der Röntgenstrahlinterferenz so recht den Wert der wissenschaftlichen Hypothese“ [2].

Tab. 24.3: Die Verifizierung einer Hypothese am Beispiel der Ideen von LAUE und BRAGG

	Struktur von Kristallen	Eigenschaften der Röntgenstrahlen
1) + 2)	Spaltbarkeit der Kristalle, Winkelkonstanz der Kristallflächen, Gesetz der rationalen Indizes	Sie durchdringen Materien, erzeugen Schattenbilder, schwärzen Fotoplatten, sie werden an optischen Gittern nicht gebeugt.
3)	Theorien von Bravais, Sohncke u. a., Strukturmodelle von Sohncke und Groth	Korpuskulartheorie bzw. Wellentheorie der Röntgenstrahlen
4)	Kristalle bestehen aus kleinsten Teilchen, die ein regelmäßiges Raummuster oder Raumgitter bilden.	Röntgenstrahlen werden gebeugt, wenn das Beugungsgitter viel feiner ist als das optische Gitter.
5)	Laue's Idee: Kristalle können natürliche Beugungsgitter für Röntgenstrahlen sein. Ein ausgeblendeter Röntgenstrahl ist durch einen Kristall zu lenken, um den Primärstrahl herum ist nach Interferenzpunkten zu suchen (vgl. Abb. 23.5).	
6)	Friedrich's und Knipping's Experimente: Auf einen a) Kupfersulfat-Kristall und b) einen Zinkblende-Kristall wird ein ausgeblendeter Röntgenstrahl gelenkt, mit Fotoplatten wird die Umgebung des Strahls untersucht (vgl. Abb. 23.5).	
9)	Es sind jeweils Interferenzmuster zu erkennen, beide Hypothesen [4] werden bestätigt: a) Kristalle bestehen aus kleinsten Teilchen, die regelmäßig im Raum angeordnet sind. B) Röntgenstrahlen lassen sich an Kristallen als natürlichen Beugungsgittern beugen.	
10)	Bragg's Experimente: weitere Kristalle von Steinsalz (NaCl), Cäsiumchlorid (CsCl), Calcit und Aragonit (CaCO ₃), Eisenkies (FeS ₂), Anhydrit (CaSO ₄) werden geprüft, deren vermutete Strukturen durch entsprechende Interferenzmuster bestätigt. In Verbindung mit der Auswertung von Laue-Aufnahmen, deren Indizierung und der Bestimmung von Netzebenenabständen wird die Braggsche Gleichung abgeleitet.	
11) + 12)	Theorie der Kristallstrukturen und deren Aufklärung durch Röntgenstrukturanalyse, Strukturmodelle für den Aufbau verschiedener Kristallgitter, Theorie der elektromagnetischen Röntgenstrahlung, der Röntgenspektren und Röntgenspektroanalyse.	

Die Röntgenstrukturanalyse im Chemieunterricht. In den Richtlinien des Landes Nordrhein-Westfalen [19] ist für Lernende der Sekundarstufe II das „Theoriekonzept: Kristalline und nichtkristalline Festkörperstrukturen – Grundprinzipien für den Aufbau vieler Feststoffe“ vorgesehen. Unter „Obligatorischen Unterrichtsgegenständen“ ist subsummiert:

- Kristalline und amorphe Feststoffe, Atome, Ionen und Moleküle als Bausteine,
- Nahordnung und Fernordnung der Bausteine in Feststoffen,
- Strukturen in Kristallen, Elementarzelle, Gittertypen und Kugelpackungen,
- Aufklärung von Festkörperstrukturen, *Prinzip der Röntgenstrukturanalyse*,
- Struktur-Eigenschafts-Beziehungen.

Um innerhalb des Theoriekonzeptes das Prinzip der Röntgenstrukturanalyse zu verstehen, sollen zunächst Experimente mit Laserstrahlen vorgeschlagen und darauf bezogene Modellvorstellungen entwickelt werden. Danach werden Experimente mit einem Schulröntgengerät vorgestellt und reflektiert. Diese Experimente und Modelle sind in geeigneter Form ebenfalls Jugendlichen der Sekundarstufe I zu vermitteln, um ihnen die Frage zu beantworten, woher man die im Unterricht behandelten Strukturen der Metalle, Salze und anderer Feststoffe kennt.

Experimente zur Interferenz von Laserstrahlen. Interferenzerscheinungen lassen sich im Alltag beobachten. Blickt man durch das Gewebe eines feinmaschigen Regenschirms, durch ein Fliegengitter oder durch eine feine Gardine auf eine entfernte punktartige Lichtquelle, etwa auf eine Straßenlaterne, so sieht man um den Lichtpunkt herum ein gekreuztes Muster von Flecken oder Streifen. Diese Muster lassen sich mit dem Phänomen der *Beugung von Lichtstrahlen* erklären: Die engen Maschen der Textilien streuen Lichtstrahlen, die gestreuten Strahlen verstärken sich an einigen Stellen (helle Lichtzonen des Musters), an anderen Stellen löschen sie sich aus (dunkle Zonen).

Führt man den roten oder grünen Lichtstrahl eines Laserpointers auf ein feines Strichgitter (optisches Gitter der Physiksammlung), so sieht man auf der Leinwand links und rechts vom Primärstrahl zwei symmetrische Reihen von Punkten (vgl. (1) in Abb. 24.7).

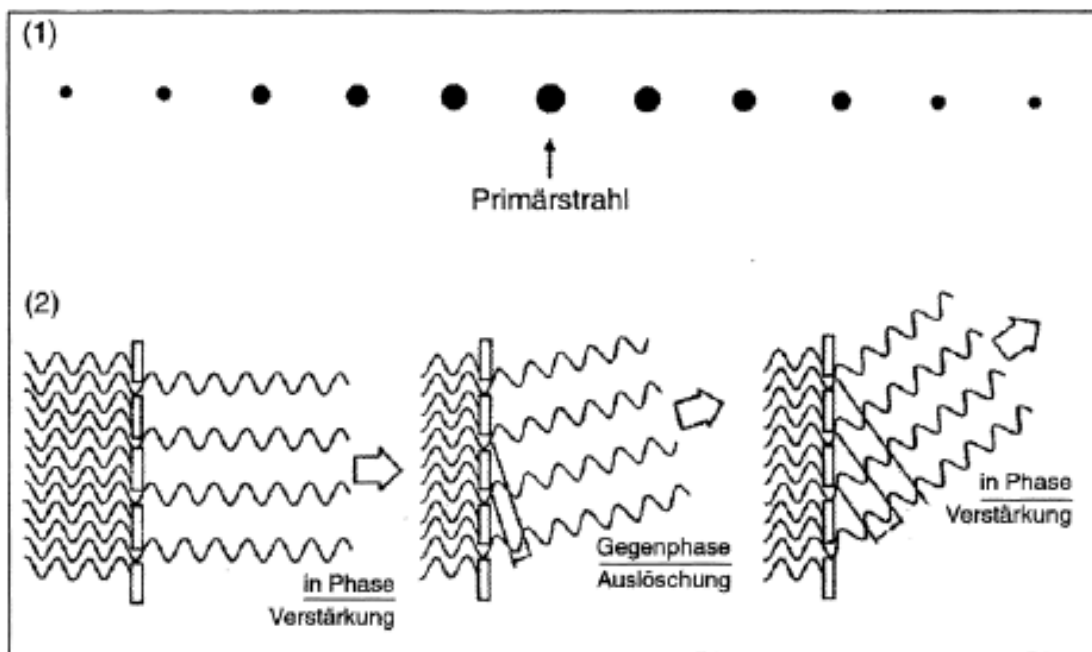


Abb. 24.7: Interferenzmuster durch Laserstrahl und Strichgitter, Modellvorstellung [20]

Wieder ist dieselbe Erscheinung wie zuvor festzustellen: Der Strahl wird gebeugt, die Beugungsstrahlen überlagern sich, ein Teil der Beugungsstrahlen wird verstärkt und die sichtbaren Lichtpunkte entstehen, ein Teil der Beugungsstrahlen wird ausgelöscht und dunkle Zonen sind zu beobachten. Diese Erscheinung wird auch *Interferenz* genannt, das entstandene sichtbare Gebilde *Interferenzmuster*.

Geht man von der Modellvorstellung aus, dass sich Lichtstrahlen wie Wellen verhalten, so gelangt man zu Modellzeichnungen, die die Interferenz veranschaulichen können (vgl. (2) in Abb. 24.7): Um die Gitteröffnungen des Strichgitters herum bilden sich durch Beugung der Strahlung halbkreisartig Elementarwellen. Treffen zwei parallele Elementarwellen „in Phase“ aufeinander, so kommt es zur *Verstärkung* dieser Wellen, weil in der Modellvorstellung Wellenberge auf Wellenberge bzw. Wellentäler auf Wellentäler treffen. Treffen sie „in Gegenphase“ aufeinander, so kommt es zur *Auslöschung*: Wellenberge treffen auf Wellentäler und umgekehrt. Das Modell zeigt auch den Grund, warum es mehrere, symmetrisch zueinander liegende Interferenzpunkte um den Primärstrahl gibt: Verstärkungen erster, zweiter, dritter und höherer Ordnungen können bei zunehmendem Beugungswinkel der Strahlen auftreten, bis man sie wegen der abnehmenden Intensität nicht mehr sieht.

Werden zwei Strichgitter senkrecht zueinander orientiert in den Strahlengang des Laserstrahls gehalten, so führt die Interferenz von Beugungsstrahlen zu hochsymmetrischen Punktmustern in der Fläche, werden beide Gitter in einem Winkel verdreht zueinander orientiert, so ist ein solcher Winkel auch im Interferenzmuster wiederzufinden. Aus den Interferenzmustern ist also jeweils die Anordnung der Strichgitter abzuleiten, die Interferenzmuster enthalten Informationen zu Strukturen des durchstrahlten Objekts: Dieser Gedanke – und damit ein wesentliches Prinzip der Röntgenstrukturanalyse – sollte den Jugendlichen nahe gebracht werden. Die Schüler und Schülerinnen sollten die geheimnisvollen Muster von roten oder grünen Punkten an der Leinwand des abgedunkelten Klassenraums auch tatsächlich sehen – sie werden diese Bilder nie vergessen!

Man kann auch Kugelschichten mit gleichgroßen oder verschiedenen großen Kugeln in der Fläche herstellen und versuchen, durch diese Schichten den Laserstrahl zu lenken und Interferenzmuster zu erhalten: Es werden keine Muster beobachtet, weil die Wellenlänge des Lichts viel zu klein ist, um an so großen Objekten wie Kugeln und Hohlräumen gebeugt zu werden. Verkleinert man allerdings Fotos von Kugelschichten oder nimmt Dias von Kugelschichten aus großer Entfernung auf, so findet eine Interferenz an diesen Fotos statt (vgl. Abb. 24.8).

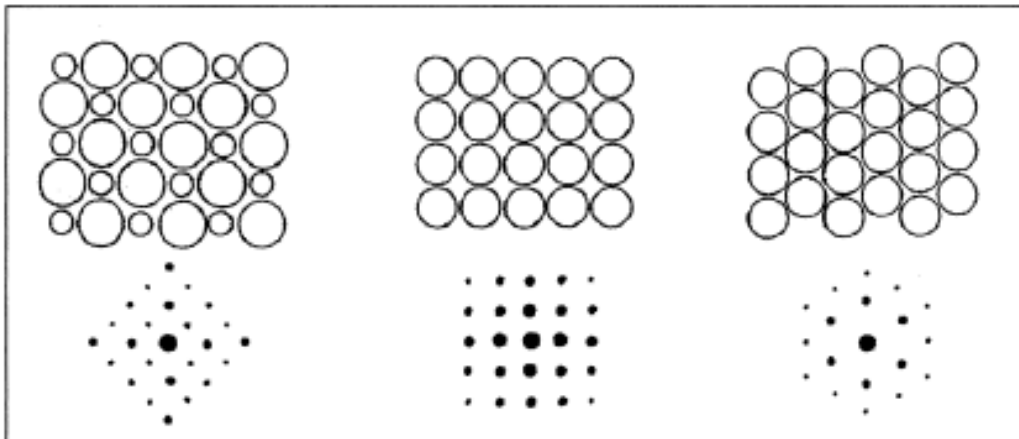


Abb. 24.8: Interferenzmuster fotografischer Verkleinerungen von Kugelschichten [20]

Wiederum gilt: aus Mustern der Beugungspunkte lassen sich Informationen über die Kugelanordnungen ableiten. Folge 2 des ZDF-Studienprogramms Chemie, das in den 70er Jahren ausgestrahlt worden und in Bildstellen als Videokassette zu erhalten ist, und das Begleitbuch [20] dazu haben diese Idee ausführlich beschrieben und weitere Modellexperimente zur Interferenz vorgeschlagen.

Experimente mit einem Schulröntgengerät. Um in die Arbeit mit Röntgenstrahlen einzuführen, ist zunächst die wichtige Eigenschaft der Durchlässigkeit für Materialien verschiedener Art vorzustellen. Man besorgt sich etwa aus einer Arztpraxis nicht mehr benötigte Röntgenaufnahmen des Brustkorbs oder einer Hand (vgl. auch Abb. 24.3). Anknüpfend an diese den Jugendlichen meist bekannten Aufnahmen kann deutlich gemacht werden, dass diese Aufnahmen „Schattenaufnahmen“ sind, vergleichbar mit Schattenbildern, die man von Gegenständen im Lichtkegel des Tageslichtprojektors erhält. Es bleibt für die Jugendlichen allerdings rätselhaft, wie das „Röntgenlicht“ durch das menschliche Gewebe fast unbeeinträchtigt hindurchstrahlt und erst durch die Knochen stark abgeschwächt wird.

Falls ein Schulröntgengerät in der Physiksammlung zur Verfügung steht, können die Schattenaufnahmen und viele weitere *Eigenschaften der Röntgenstrahlen* demonstriert werden (detaillierte Arbeitsanweisungen siehe auch [21]). Ein neues Gerät wird im Lehrmittelhandel angeboten [22]: Es besitzt eine strahlensichere Röhrenabdeckung aus Bleiglas, sodass man die Röntgenröhre auch während der Aufnahme beobachten kann (vgl. Abb. 24.9). Man kann Schattenaufnahmen von Gegenständen entweder direkt auf dem Leuchtschirm beobachten, mit üblichem Röntgenfilm oder mit einer Polaroid-Diffraktionskassette aufnehmen [22].

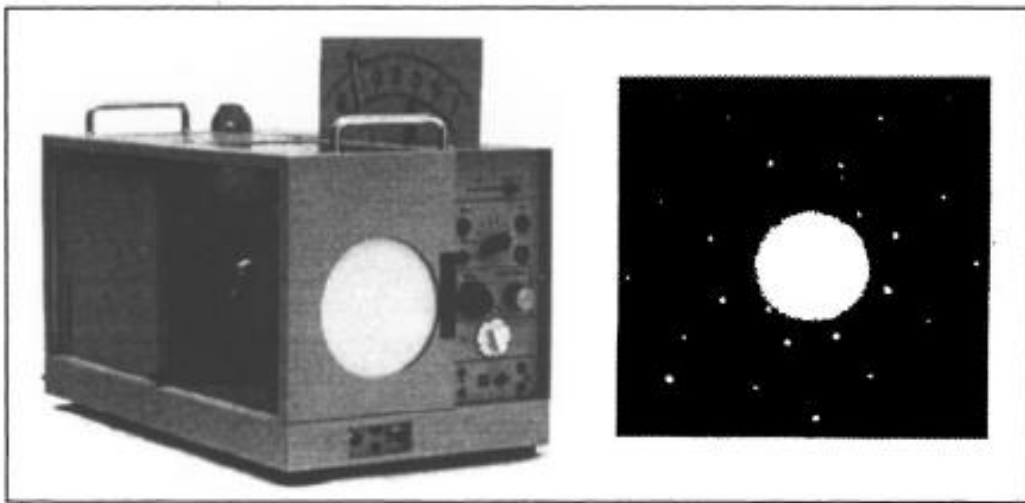


Abb. 24.9: Schulröntgengerät [22] und aufgenommenes Lauediagramm von Lithiumfluorid

Lauediagramme. Mit dem Schulröntgengerät lassen sich auch Lauediagramme herstellen: Ein feiner Röntgenstrahl ist auszublenzen, der Strahl auf ein dünnes Kristallplättchen zu führen, dahinter eine Fotoplate oder die Polaroid-Röntgen-Diffraktionskassette zu positionieren und eine Stunde lang zu belichten (vgl. (a) in Abb. 24.5). Das Beispiel der Laueaufnahme eines Lithiumfluorid-Kristalls zeigt Abbildung 24.9. Allerdings sind die auf diesem Wege erhaltenen Interferenzmuster nicht mit den vorher vorgestellten Schattenaufnahmen zu verwechseln – die Unterschiede beider Aufnahmetechniken und entsprechende Ergebnisse sind deutlich zu diskutieren und zu differenzieren.

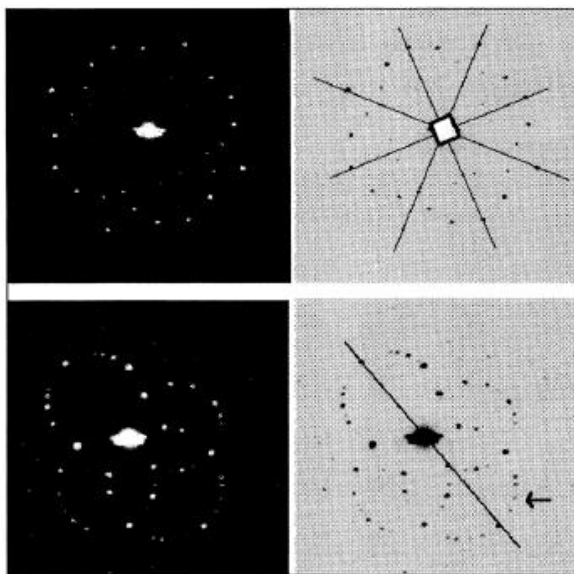


Abb. 24.10: Beispiele von Laueaufnahmen und deren erste Auswertung im Unterricht [24]

RÖLLEKE [23] hat detaillierte Vorschläge für den Chemieunterricht ausgearbeitet und auch alle Details der Aufnahmetechniken mit dem neuen Schulröntgengerät beschrieben [24]. Zwei seiner Laueaufnahmen lassen erkennen, wie eine erste Auswertung im Chemieunterricht aussehen kann, ohne dass Beugungstheorien behandelt werden müssen (vgl. Abb. 24.10).

Zunächst zeigen die Aufnahmen symmetrisch angeordnete Beugungsmaxima, die Kristalle sind also regelmäßig kristallisiert, sie sind Einkristalle. In der ersten Aufnahme sind vier Spiegelebenen im Winkel von 45° zu erkennen, sie ergeben eine vierzählige Drehachse. Weil die Aufnahme keine Unregelmäßigkeiten dieser Symmetrie abbildet, verlief der Primärstrahl bei der Aufnahme parallel zur vierzähligen Drehachse. Auch der Kristall der zweiten Aufnahme erscheint regelmäßig kristallisiert, allerdings verläuft der Primärstrahl nicht genau parallel zur dreizähligen Drehachse. Die dreizählige Achse ist noch erkennbar, aber nicht durchgehend nachvollziehbar, da es einen weiteren Kreis von Beugungspunkten gibt, der die Dreizähligkeit unterbricht (Pfeil): Er gehört zu einer Zone von Flächen mit anderer räumlicher Orientierung als die der dreizähligen Drehachse.

Laueaufnahmen werden in der Fachwissenschaft dazu verwendet, Kristalle für die eigentliche Einkristalldiffraktometrie auf dem Kristallhalter richtig zu justieren, vor allem dann, wenn die makroskopisch erkennbaren Kristallflächen keine räumliche Zuordnung erkennen lassen.

Debye-Scherrer-Aufnahmen. Neben Einkristall-Untersuchungen sind auch Aufnahmen von Kristallpulvern zu Strukturbestimmungen geeignet. Diese Aufnahmen sind ebenfalls mit dem Schulröntgengerät möglich.

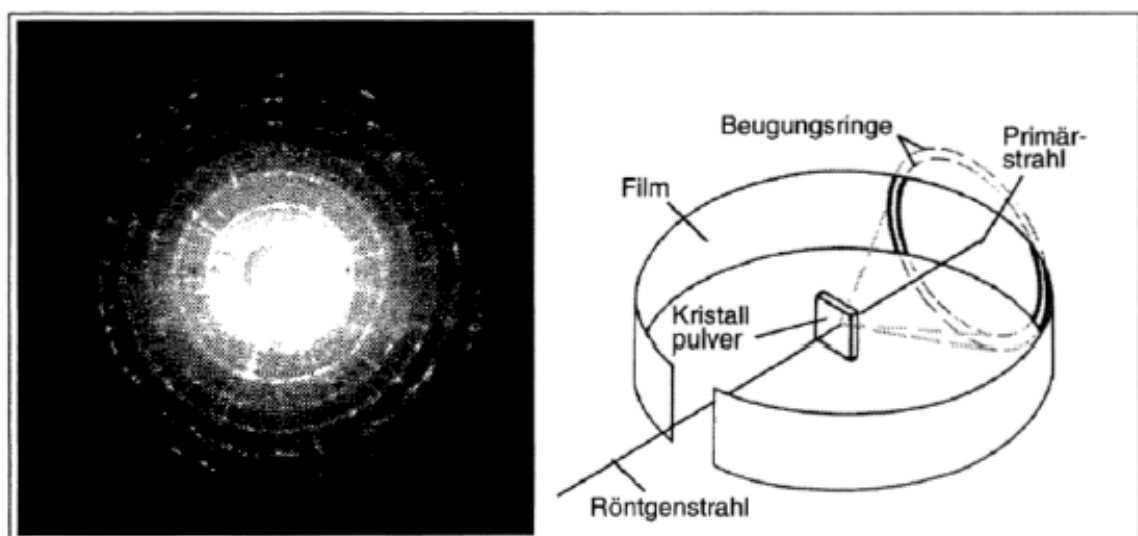


Abb. 24.11: Debye-Scherrer-Aufnahme von KCl-Pulver [23], Schema zur Analysetechnik [1]

Das Kristallpulver wird in Klebestreifen eingeschlossen, in den Strahlengang des ausgeblendeten Röntgenstrahls gebracht und mehrere Stunden durchstrahlt: es ergeben sich anstelle von Beugungspunkten bei dieser Methode Beugungsringe. Am Beispiel einer Kaliumchlorid-Pulverprobe kann man sieben Beugungsringe identifizieren, die mit dem erhaltenen Foto nur schwach wiedergegeben werden (vgl. Abb. 24.11).

Bei einem Kristallpulver werden alle Orientierungen von Netzebenenscharen durch die statistisch verteilte Lage der Kristallite angeboten - ein monochromatischer Röntgenstrahl erzeugt deshalb an allen Kristalliten in Reflexstellung Beugungspunkte auf dem Film. Alle Beugungsstrahlen eines einzigen Glanzwinkels ergeben somit einen Beugungskegel, die Strahlen anderer Reflexstellungen Beugungskegel mit anderen Öffnungswinkeln: auf der Fotoplatte sind die Schnitte dieser Beugungskegel zu erkennen (vgl. Abb. 24.11). Da monochromatische Strahlung mit einer definierten Wellenlänge vorliegt, ist die Auswertung der Beugungsringe nach Einführung in die Bragg'sche Gleichung und in die Bedeutung Miller-scher Indizes möglich: Der Beugungswinkel wird gemessen, die Beugungsringe werden indiziert und man erhält die Gitterkonstante [24].

Auch für dieses Untersuchungsverfahren gibt es ein anschauliches Laserstrahl-Modell [22]: Schickt man den Laserstrahl durch ein optisches Kreuzgitter, so zeichnet sich zunächst ein ebensolches Beugungsbild ab. Lässt man das Kreuzgitter rotieren, während der Laserstrahl senkrecht hindurch strahlt, bilden sich Beugungsringe um den Primärstrahl [24].

Bragg'sche Gleichung. Mit Hilfe des Schulröntgengeräts können auch Glanzwinkel experimentell bestimmt werden (vgl. Abb. 24.12): Der ausgeblendete monochromatische Röntgenstrahl wird auf den drehbar angebrachten Einkristall gelenkt, der Kristall wird gedreht und im doppelten Winkel ein Zählrohr mitgeführt (dafür gibt es auch geeignete Motoren [24]). Je nach Wellenlänge der Strahlung und der Abstände der Netzebenen im Kristall ergibt sich ein bestimmter Winkel, bei dem das Geiger-Müller-Zählrohr ein Maximum von gebeugter Strahlung anzeigt: die *Bragg'sche Reflexion*. Dieser Winkel wird auch Beugungswinkel oder Glanzwinkel genannt.

Mit einigen Kenntnissen in der Trigonometrie kann im Unterricht die Bragg'sche Gleichung leicht abgeleitet werden (vgl. Abb. 24.13): „Damit die Welle im Punkt H auch in Phase mit den Wellen bei L und C ankommt, muss $EF + FG$ ein ganzes Vielfaches der Wellenlänge λ betragen: $EF + FG = n \cdot \lambda$. Wie aus der geometrischen Konstruktion zu ersehen ist, sind die Winkel EBF und FBG gleich θ . Die Länge BF entspricht dem Abstand d zwischen den Ebe-

nen: damit berechnen sich EF und FG zu $EF = FG = d \cdot \sin\theta$ oder $EF + FG = 2d \cdot \sin\theta$ [25].

Es gilt für $n = 1, 2, 3, \dots$: $n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin\theta$ (Bragg'sche Reflexionsbedingung)

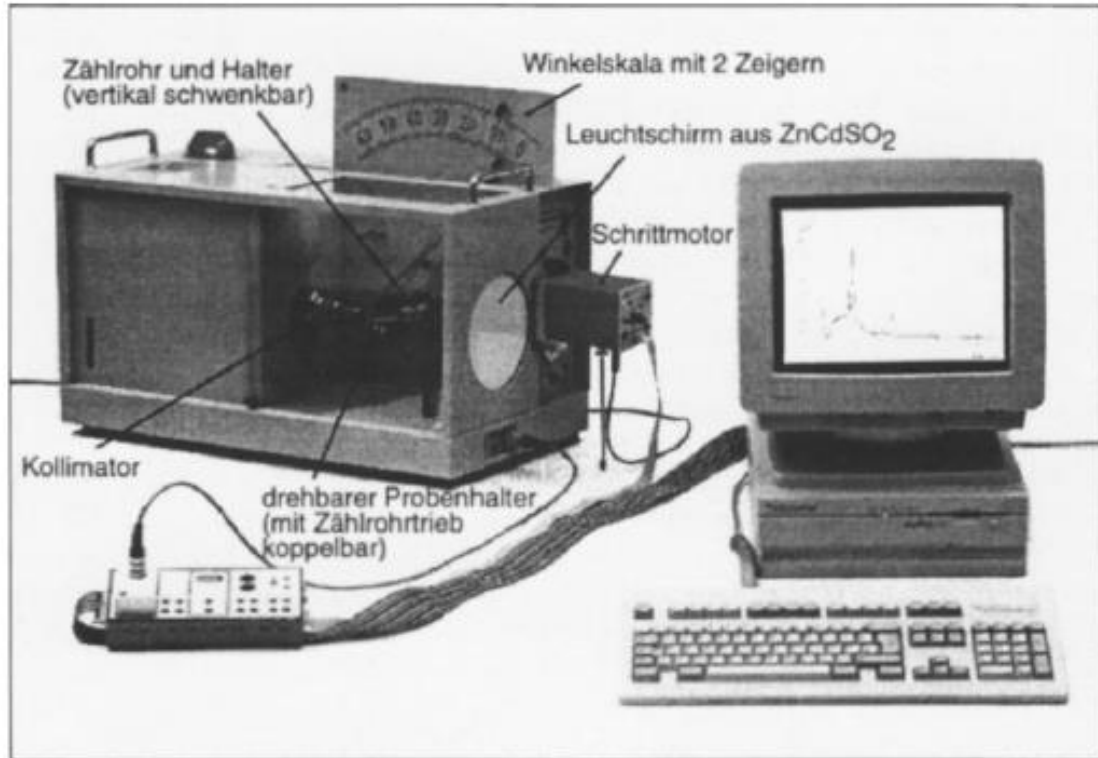


Abb. 24.12: Schulröntgengerät zur Messung von Glanzwinkeln [24]

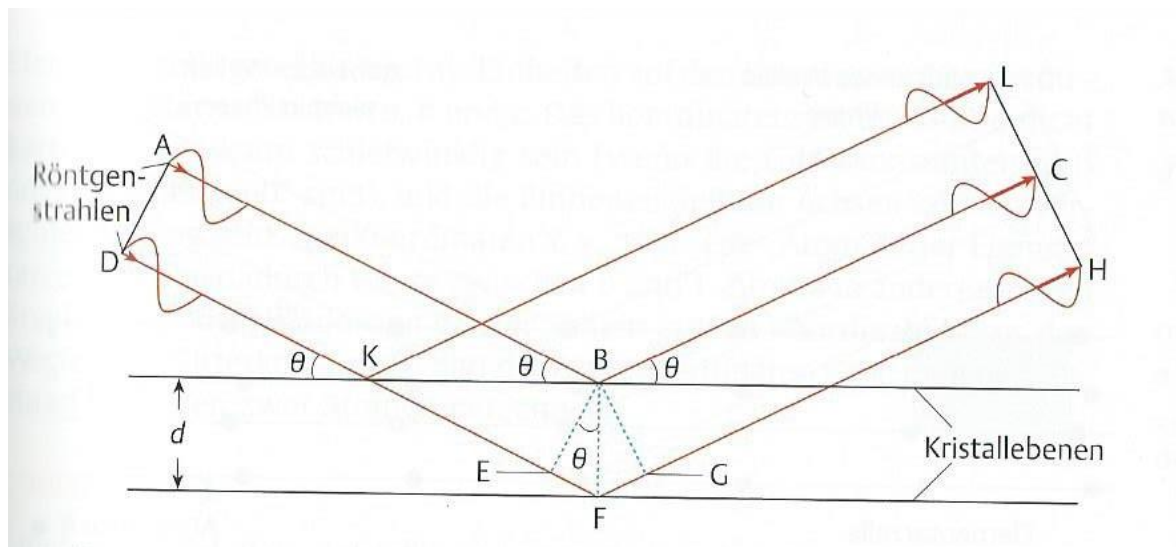


Abb. 24.13: Herleitung der Bragg'schen Gleichung [25]

Computerprogramme ermöglichen die interaktive Vertiefung der Braggschen Gleichung [26]. Die entsprechenden Abbildungen auf dem Bildschirm zeigen Netzebenen und Wellenzüge und quantifizieren die Auswirkungen der Veränderungen einzelner Parameter. Wellenlängen, Netzebenenabstände und Beugungswinkel können gewählt werden, die Veränderung der Intensitäten, also die Verstärkung und Auslöschung der Röntgenstrahlung, sind an einem in der Abbildung zugeschalteten virtuellen Detektor abzulesen (vgl. Abb. 24.14).

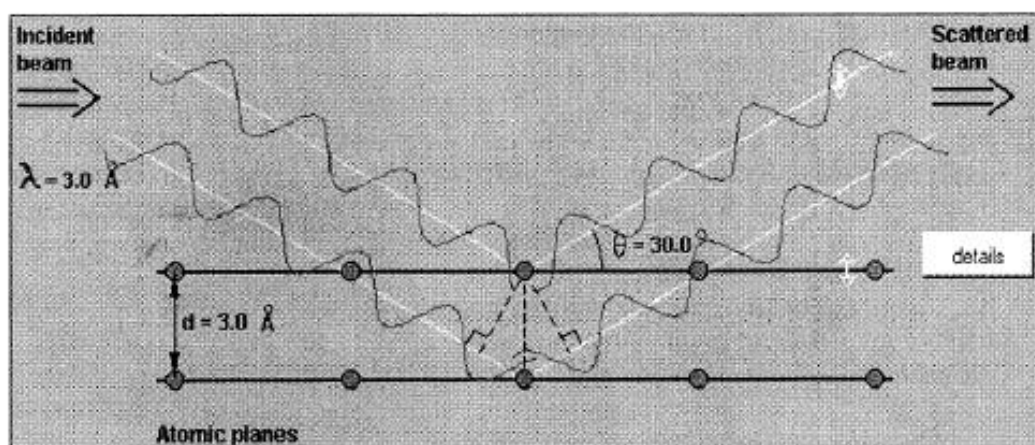


Abb. 24.14: Interaktive Computer-Visualisierung der Braggschen Gleichung [26]

24.5 Schluss

Dieses Thema bietet also nicht nur gute Möglichkeiten, unter Berücksichtigung historischer Zusammenhänge die Entstehung und Prüfung wissenschaftlicher Hypothesen und Theorien im Unterricht zu verfolgen. Das Prinzip dieser Methode zur Strukturaufklärung lässt sich auch im Unterricht vermitteln – neue Schulbücher berücksichtigen das bereits [1]. Insbesondere wird deutlich, wie Chemiker aus Daten dieser Analysemethode Strukturmodelle entwickeln, die dann vereinfacht im Unterricht als Kugelpackungen, Raumgitter oder Molekülmodelle verwendet werden können. Schließlich kann man Lauediagramme von Einkristallen oder Beugungsringe von Kristallpulvern herstellen und in Chemiekursen der Sekundarstufe II auswerten – und damit das Verständnis für die Röntgenstrukturanalyse erarbeiten als einer sehr relevanten und aktuellen Methode der Instrumentellen Analytik in der Chemie !

Literatur

- [1] Asselborn, W., Jäckel, M., Risch, K.T.: Chemie heute, Sekundarbereich II. Hannover 1998 (Schroedel)
- [2] Laue, M.v.: Mein physikalischer Werdegang. Eine Selbstdarstellung. In: Gesammelte Schriften und Vorträge, Braunschweig 1961 (Vieweg)
- [3] Matuschek, C., Jansen, W.: Chemieunterricht und Geschichte der Chemie. PdN-Ch. 34 (1985), 3
- [4] Kepler, J.: Vom sechseckigen Schnee. Frankfurt 1611
- [5] Haüy, R.J.: *Traité élémentaire de physique* (1784). Übersetzung von Blumhoff: Weimar 1804
- [6] Wollaston, W.H.: On the elementary Particles of Certain Crystals. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London* 103 (1813), 51
- [7] Bravais, A.: Abhandlung über die Systeme von regelmäßig auf einer Ebene oder im Raum vertheilten Punkten (1884). *Ostwald's Klassiker* Nr. 90, Leipzig 1897 (Engelmann)
- [8] Sohncke, L.: Entwicklung einer Theorie der Kristallstruktur. Leipzig 1879 (Teubner)
- [9] Ottremba, H.: Wilhelm Conrad Röntgen. Berlin 1965 (Springer)
- [10] Röntgen, W.C.: Über eine neue Art von Strahlen (Vorläufige Mitteilung). *Med. Gesellsch. Würzburg* 137 (1895), 132-140
- [11] Gerlach, W.: Wilhelm Conrad Röntgen. München 1972 (Kindler)
- [12] Laue, M. v.: Die Interferenz der Röntgenstrahlen (1912, 1914). In: *Ostwald's Klassiker* Nr. 204, Leipzig 1923 (Engelmann)
- [13] Wikipedia: Röntgen und Laue
- [14] Laue, M. v.: Über die Auffindung der Röntgenstrahlinterferenzen. Nobelvortrag gehalten am 3. 6. 1920 in Stockholm. Karlsruhe 1920 (Müllersche Hofbuchhandlung)
- [15] Bragg, L.: *The history of X-Ray Analysis*. London 1943 (Longmans)
- [16] Bragg, L.: *The Start of X-ray Analysis*. Nuffield Foundation 1967
- [17] Schmidkunz, H., Lindemann, H.: Das Forschend-entwickelnde Unterrichtsverfahren. München 1976 (List)
- [18] Vossen, H.: *Kompendium Didaktik Chemie*. München 1979 (Ehrenwirth)
- [19] Landesinstitut für Schule und Weiterbildung: *Gymnasiale Oberstufe Chemie. Lehrplanentwurf*. Stand: 15. August 1998
- [20] Buß, V, u.a.: Einführung in die Chemie. Teil 1. Begleitbuch des ZDF-Studienprogramms Chemie. Köln 1975 (Schulfernsehen)
- [21] Brockmeyer, H.: Röntgenstrahlen im Unterricht. Köln 1973 (Aulis)
- [22] Leybold: Firmenschrift. Hürth 1998
- [23] Rölleke, R., Barke, H.-D.: Max von Laue: ein einziger Gedanke – zwei große Theorien. *Praxis Chemie* 48 (1999), Heft 4, 19
- [24] Rölleke, R.: Kristallstrukturen und schulgemäße Formen der Röntgenstrukturanalyse. Unveröffentlichte Staatsexamensarbeit, Institut für Didaktik der Chemie der Uni Münster
- [25] Mortimer, C.E., Müller, U.: Chemie. 8. Auflage. Stuttgart 2003 (Thieme)
- [26] <http://www-wilson.ucsd.edu/education/xraydiff/html>