

G. HILDEBRANDT

Katzwanger Steig 2, 14089 Berlin, Germany

How Discoveries are Made – or Some Remarks on the Discovery of the Borrmann Effect

Dedicated to Professor Dr. G. Borrmann on the occasion of his ninety-fourth birthday and to all those authors who contributed papers on the occasion of my own birthday.

About fourteen years ago G. Borrmann published a paper “Aus Kossels Laboratorium, Danzig 1932-38“ (From Kossels Lab, Gdansk 1932-38) /1/, which covered the period of Borrmann’s first successes but left out his subsequent time in Berlin, where he made his famous discovery of anomalous absorption of X-rays in perfect crystals /2/. But very recently he sent me (quasi as a birthday present) three typewritten pages entitled “Ein einfacher Versuch“ (A simple experiment), obviously composed many years ago as a personal reminiscence on Laue’s long-standing assistant Georg Menzer and describing the experiments in Berlin in much detail. Since the story is now complete it might be recapitulated in short.

Everything started with the Kossel lines, searched for for long times and finally found by Kossel about 1935, who used electrons for exciting the atoms in a probe crystal. A nice Kossel diagram is to be found together with references in Laue’s book “Röntgenstrahl-Interferenzen“ /3/ on pages 430/31. Borrmann, being Kossel’s doctorand at that time, succeeded in getting similar diagrams with the excitation by X-rays. The Kossel lines exposed complicated dark/light contrasts, which Kossel failed to explain. Then Laue made a visit and was immediately convinced: only the dynamical theory of X-ray diffraction, applied on Borrmann’s method (X-ray excitation) would be able to interpret the experimental findings. Back in Berlin he published still in 1935 a beautiful paper on this subject /4/ (slightly corrected in one detail two years later /5/). The base was the reciprocity theorem of light optics which he formulated for X-rays. In a next step he considered the positions of wavefields in a perfect crystal lattice, using his recent reformulation of the Ewald dynamical theory /6/ together with the reciprocity theorem: If a narrow X-ray beam enters the probe in such a direction that wavefields with their maxima at the atom sites are excited, then these atoms would emit strong fluorescent radiation just in this same direction, producing dark lines (or the dark intense part of lines). If an incident beam entering in a slightly different direction produces wavefields with their minima at the atom sites then fluorescent radiation leaving the crystal in this direction would have weak intensity. This theory predicted the light borders of black/light lines correctly on the convex line side, cp. the mentioned diagram in Laue’s book.

At another place (p. 440) of this book Laue makes the statement, that this agreement with experience be extremely important because besides the Kossel effect no means is known (at that time, 1960) for a direct experimental evidence of the existence and position of X-ray interferences in space lattice; even the absorption anomaly (Borrmann effect !) can only be considered as an indirect proof.

This is in contradiction -sorry!- to A. Authiers statement in his recent excellent book on Dynamical Theory /7/ where he writes (Ch. 1.10) that “up to the year 1940, all the experiments did not bring any clue as to the actual physical behaviour of the wavefields inside the crystal“.

In autumn 1938 Borrmann must leave Kossel's institute: a stable position for somebody not being a member of any of the Nazi organizations was not available. However, M. v. Laue, vice-director of the Kaiser-Wilhelm-Institute of Physics in Berlin-Dahlem, had invited him to work there. After some hesitation and a further impatient invitation Borrmann agreed to what seemed to him to be a risk. The more he was astonished when Laue asked him “what do you intend to do?“. Being happy to have a free hand Borrmann announced to further study the Kossel lines. After Laue's OK G. Menzer introduced Borrmann to his work and his new surrounding. He got a stipend, but it was cancelled after three months. Laue then managed to keep Borrmann alive with a monthly salary of 125 Reichsmark. It remained Laue's secret where this money came from.

In his last experiments in Kossel's Lab Borrmann had used a new arrangement which enabled him to study Kossel lines in transmission or, with inclined crystal slabs, simultaneously also in reflection /8/. Using thin-etched Fe single crystals he got unexpected results: Only thinnest plates agreed to the old findings, but behind plates of 20 ... 50 μm thickness the transmission contrast was reversed (convex Kossel cone now with strong intensity). This was a new problem, and the importance of absorption and crystal perfection for its solution were brought as open questions to Berlin.

The older experiments clearly had shown: the more perfect the crystals, the more pronounced the Kossel diagrams. Therefore Borrmann made new exposures with more perfect Fe and Cu crystals - no new results. Then he thought of calcite which - in best examples - had been found to be perfect enough to obey dynamical theory. But it turned out to be impossible to get Kossel lines from Ca-K radiation, even using the best Icelandic calcite which Menzer had put to Borrmann's disposal.

In this confused situation the idea arose: why not, for safety's sake, begin again from the scratch using an arrangement as simple as possible like the Rutherford-Andrade method (1914) ? In such a wide-angle geometry the cone of incident radiation, traversing a crystal, is weakened in those directions where radiation is subtracted due to the production of a reflection at lattice planes: extinction lines on the X-ray film are the result. Using diamond one had got beautiful extinction diagrams.

But, astonishingly enough, Borrmann's calcite plates did not show any extinction; instead there were weak dark/light lines with some additional intensity. Obviously still existing interfering radiation in extinction direction had undergone smaller absorption than the neighboring non-interfering radiation.

v. Laue was surprised - and declining. Without saying a word he left the room when Borrmann presented this strange result: these “wrong“ extinction lines could not be convincing. But if absorption was really different then there should exist a simple means to prove it: just using thicker crystals! This recipe worked wonders; compared to the background the intensity increased enormously, in direction of the “wrong“ extinction line a real reflection R_0 appeared. The related usual reflection R_H also was present, but it seemed difficult to guess its absorption. At crystal thickness of 0.3 mm, however, both reflections proved to be of similar strong intensity.

While Borrmann tried to gain firm ground Laue soon remembered his wavefields which had helped him to explain the light/dark Kossel lines. The same lattice plane-adapted fields which would bring about a maximum or minimum of emission *with* the reciprocity theorem will lead to a maximum or minimum of absorption *without* this theorem. The wavefield with smallest absorption succeeds the more the thicker the crystal, its both components produce equivalent reflections R_0 and R_H .

Also quartz behaved equally: a good probe exhibited the changed absorption, a bad one presented extinction. Thus anomalous absorption is not a peculiarity of calcite, it is a property of the perfect space lattice.

The war finished these experiments, only the results on quartz were published /2/.

Meanwhile the Berlin KWI of Physics had been displaced to Hechingen in South-West Germany. After the war (1948) G. Menzer, working at that place, visited Borrmann and reported: two of six high-voltage equipments (earlier donated from the Rockefeller Foundation) had been set up at Hechingen, and one of them together with a complete X-ray Lab he offered to be at Borrmann's disposal. So Borrmann took his Icelandic calcite crystal to this new place, started work and realized anomalous absorption up to a thickness of 2.7 mm.

At such a thickness also the beam path of wavefields became accessible to observation: obviously the fields with smallest absorption followed the direction of the "reflecting" lattice planes, only at the crystal's exit surface they split up into their components.

This became important when one later tried to understand the trajectories of wavefields calculated by M. v. Laue /9/.

"Die wundersame Idylle in Hechingen ging zu Ende" (the wondrous Hechingen idyll came to its end). Menzer got appointed to chairs at first in Tübingen, then in Munich¹, M. v. Laue at age 71 agreed to become Director of the "Institut für Physikalische und Elektrochemie der Deutschen Forschungshochschule Berlin-Dahlem" (April 1951), which he then called "Fritz-Haber Institute"; Borrmann soon followed, became his assistant and, shortly later, head of an own department.

The last two-thirds of this article are based on Borrmann's (slightly damaged) three pages, which are reproduced at the end of this article.

References

- [1] Borrmann, G.: Aus Kossels Laboratorium, Danzig 1932-38. Naturwiss. **75** (1988) 399-404.
- [2] Borrmann, G.: Über Extinktionsdiagramme von Quarz. Physikal. Zs. **42** (1941) 157-162.
- [3] Laue, M. v.: *Röntgenstrahl-Interferenzen*. 1960, Akad. Verl. Ges. Frankfurt/M.
- [4] Laue, M. v.: Die Fluoreszenzröntgenstrahlung von Einkristallen. Ann. Physik (5) **23** (1935) 705-746.
- [5] Laue, M. v.: Helligkeitswechsel längs Kossellinien. Ann. Physik (5) **28** (1937) 528-532.
- [6] Laue, M. v.: Die dynamische Theorie der Röntgenstrahlinterferenzen in neuer Form. Ergebn. Ex. Naturwiss. **10** (1931) 133-158.
- [7] Authier, A.: *Dynamical Theory of X-ray Diffraction*. 2001, Oxford Univ. Press.
- [8] Borrmann, G.: Über die Röntgeninterferenzen des selbstleuchtenden Eisens. Kristall. **100** (1938) 228-233.
- [9] Laue, M. v.: Die Energieströmung bei Röntgenstrahl-Interferenzen in Kristallen. Acta Cryst. **5** (1952) 619-625.
- [10] Borrmann, G.: Georg Menzer 4.5.1897-13.10.1989. Ber. Mitteilgn. MPG **4** (1990) 101-104.

¹ Menzer died on 13. Oct. 1989, cp. Borrmann /10/.

Ein einfacher Versuch.

Persönliche Erinnerungen an
Georg Menzer (4.5.1897 -
Von G. Borrmann

G.Menzer hat, nächst M.v.Laue, meine Bemühungen optik der Röntgenstrahlen am meisten gefördert, dem Krieg und wieder bald danach.
Im Herbst 38 hatte ich W.Kossels Institut in Danz in der Tasche Laues Angebot, zu ihm ans KWI für Phy Dahlem zu kommen. Durfte ich das wagen? Ich zögerte lan daß die Chance eigentlich schon verspielt war. Da traf karte ein : ich sollte doch nun endlich kommen! Er empfi mit der Frage : "Was wollen Sie machen?" "Die Kossel-Linien untersuchen." Er stimmte zu. War es zu glauben? Ich hatte freie Hand - und dabei ist es geblieben.
Meine Einweisung blieb seinem Assistenten überlassen, dem Privatdozenten G.Menzer. Ich bekam ein Stipendium der DFG. Nach drei Monaten wurde es gestrichen. Dr. Graue, betraut mit der Verbindung zur Partei, rief mir von weitem zu: "Mensch, Sie sind ja nirgends drin!" M.v.L. half aus mit einem neuen Stipendium (125.-M.). Meine Lage war bedenklich. Ich merkte es gar nicht, denn dank Menzers anhaltender - Gesprächs- und Hilfsbereitschaft fühlte ich mich gut aufgehoben.

Es ging um die Helldunkel-Struktur der Kossel-Linien (1). H. Voges hatte sie umso besser ausgeprägt gefunden, je besser der Kristall, d.h. je weniger Kristallbaufehler. M.v.L. hatte sie erklärt auf der Grundlage der P.P. Ewaldschen dynamischen Theorie der Beugung am Idealkristall. Von dünnen Kristallplättchen erzeugte Kossel-Linien schienen mit ihrer Helldunkel-Struktur ein neues Rätsel aufzugeben (2). Vergeblich versuchte ich, der Lösung durch neue Experimente mit Fe- und Cu-Kristallen näher zu kommen. Ich dachte nun an Kossel-Linien von Kalkspat. Der hatte sich in seinen allerbesten Exemplaren als perfekt im Sinne der Theorie erwiesen (3) und mußte (damals) als erste Wahl unter allen Kristallen gelten. Vorweg gesagt, von Ca-K-Strahlung erzeugte Kossel-Linien wollten sich nicht zeigen. (Früher hatte ich von einer ganzen Reihe kristallisierter Substanzen Kossel-Linien erhalten).

7 Ca-K-Strahlung

- 2 -

G.M. hatte mir aus der Mineralogischen Sammlung der Universität eine kleine Stufe isländischen Kalkspats zur Verfügung gestellt. Gute Spaltbarkeit versprach gute Qualität. (E/in wie glücklicher Griff es war, hat sich später in vielen Experimenten erwiesen). Das zur Emission der Eigenstrahlung verarbeitete Spaltplättchen war 0,1 mm dick.

Der Gedanke tauchte auf, vor weiteren Bemühungen um Kossel-Linien noch einmal - sicherheitshalber - ganz von vorn zu beginnen, einfach einen Kristall zu durchstrahlen, und zwar in der Weitwinkel-Anordnung von Rutherford und Andrade (1914). Innerhalb des Strahlenkegels, der durch den Kristall auf den Film fällt, findet man vor allem Extinktionslinien. Hier fehlt Strahlung, die an einer Netzebene reflektiert wurde. Die zu einer Extinktionslinie gehörende Reflexionslinie kann innerhalb oder außerhalb des einfallenden Strahlenbündels liegen. Diamant hatte prächtige Extinktionsdiagramme beschert (4).

Das Kalkspat-Kriställchen zeigte keine Extinction. Zu sehen waren schwache, anscheinend helldunkle Linien mit geringem Intensitätsüberschuß. Offenbar wurde in der Extinktionsrichtung noch vorhandene interferierende Strahlung schwächer absorbiert als die in benachbarten Richtungen den Kristall durchquerende nicht interferierende Strahlung.

M.v.L. war überrascht - und ablehnend; ohne ein Wort verließ er das Zimmer. Die verkehrten Extinktionslinien konnten nicht überzeugen. War aber die Absorption wirklich verschieden, so mußte das leicht zu beweisen sein. Man mußte es nur mit dickeren Kristallen versuchen. Das Rezept wirkte Wunder, relativ zum Untergrund stieg die Intensität der Linie steil an: Bei Reflexion an der Netzebene h entwickelte sich in der Einfallrichtung ein Reflex, R_{ho} genannt. Der gewohnte Reflex R_h existierte auch. Ob auch er schwächer als normal absorbiert war, konnte ihm nicht so leicht angesehen werden wie der verkehrten Extinktionslinie, zeigte sich aber mühelos bei der Variation der Kristalldicke. Bei 0,3 mm waren in einem genauer studierten Fall R_{ho} und R_h etwa gleich stark (5).

Während ich so experimentell sicheren Boden zu erreichen suchte, hatte M.v.L. sich rasch der Wellenfelder erinnert, mit denen er die Helldunkel-Struktur der Kossel-Linien erklärt hatte. Dieselben der

- 3 -

Netzebenenschar angepaßten Wellenfelder, die mit Reziprozitätssatz ein Maximum und ein Minimum der Emission bewirken, bewirken ohne \bar{X} ihn ein Maximum und ein Minimum der Absorption. Das Wellenfeld minimaler Absorption setzt sich mit der zunehmenden Schwächung in dickeren Kristallen durch, seine beiden Komponenten erzeugen R_{ho} und R_n .

Quarz verhielt sich so: eine gute Probe zeigte die veränderte Absorption, eine schlechte reine Extinktion. Die übernormale Durchlässigkeit im Fall der Interferenz ist keine Eigentümlichkeit des Kalkspats, sie ist eine Eigenschaft perfekter Raumgitter.

Der Krieg beendete diese Untersuchungen. (Nur die Quarz-Resultate konnten noch gedruckt werden).

1948 suchte G.M. mich auf, um mir aus Hechingen, dem Ausweichquarz-~~Werk-~~tier des KWI für Physik, zu berichten. Er hatte zwei der sechs (von der Rockefeller Foundation gestifteten) Hochspannungsanlagen nach dort verlagert, eine stellte er mir zur Verfügung, dazu ein fix- und fertigtes Röntgenlabor. Meinen Islandspat brachte ich mit. Bis zu einer Probendicke von 2,7 mm war die anomale Absorption der Messung gut zugänglich.

In den dicksten Spaltstücken ließ sich der Strahlweg beobachten. Das dort noch weit besser als anfangs ausgesiebte Wellenfeld kleinster Absorption pflanzte sich längs der reflektierenden Netzebene fort und zerfiel erst an der Austrittsfläche in die beiden Komponenten (6). Dieser Befund wurde wichtig, als es später darum ging, die von M.v.L. berechnete Energieströmung in der Gesamtheit der Wellenfelder zu verstehen.

Die wundersame Hechinger Idylle ging zu Ende. ~~XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX~~
~~XXXXXXXXXXXX~~ 1949 wurde G.M. nach München berufen. 1951 kehrte ich mit M.v.L. nach Dahlem zurück. Der Wiederaufbau konnte beginnen.

- (1) Max von Laue, Röntgenstrahl-Interferenzen, 3. Aufl. 1960. S. 430
- (2) G. Borrmann, Zeitschr. für Kristallographie (A) 100, S. 228, (1938)
- (3) Compton and Allison, X-Rays in Theory and Experiment, 1935
- (4) Siehe (1), S. 280
- (5) " " , S. 423
- (6) " " , S. 420