

Modellierung von Übergängen zwischen Ordnung und Unordnung in Kristallen mit einem Remotely Controlled Laboratory (RCL)

S. Gröber, M. Vetter, B. Eckert, H.-J. Jodl

1 Einführung

Einen großen zeitlichen und inhaltlichen Anteil im Oberstufenunterricht zur Wellenoptik nimmt die Beschreibung und Erklärung der Beugung an Spalt, Doppelspalt und Gitter ein. Licht wird als Welle identifiziert, es werden Wellenlängen, Maxima, Minima und Gitterkonstanten bestimmt. In Einzelfällen endet die Wellenoptik mit der mathematischen Herleitung der Intensitätsverteilung der Beugungsmuster mit Hilfe von Feynmans Zeigerformalismus. In der Kristallographie mit Röntgenstrahlung werden dann einzelne Ergebnisse der Wellenoptik dazu verwendet, die Braggsche Gleichung herzuleiten. Theoretisch oder in selteneren Fällen bei vorhandenem Röntgengerät können damit experimentell Netzebenenabstände bestimmt werden [1].

Im Folgenden werden zwei Lerneinheiten "Optische Kristallographie" und "Ordnungs-Unordnungs-Übergänge in Kristallen" vorgestellt, deren zentraler Bestandteil ein mit sichtbarem Licht arbeitendes Modellexperiment ist. In der optischen Kristallographie

- wird der Bedeutung der Kristallographie in der Physik als Verfahren zur Strukturbestimmung von Kristallen Rechnung getragen,
- wird die in der Schule auf die Berechnung von Netzebenenabständen eingeschränkte Strukturbestimmung von Kristallen um die Bestimmung der Basis erweitert,
- wird durch Beschränkung auf qualitative und halbquantitative Betrachtungen das Grundprinzip der Kristallographie in den Vordergrund gestellt,
- werden die Lernergebnisse der Wellenoptik im Kontext "Optische Kristallographie" flexibilisiert und erweitert,
- trägt die Erweiterung der eindimensionalen auf die zweidimensionale Beugung zur Anschlussfähigkeit von Schulwissen in einem Studium bei, ohne wie bei einer dreidimensionalen Behandlung die Vorstellungskraft der Schüler zu übersteigen,
- soll das Interesse der Lernenden an der Untersuchung und der Struktur von Kristallen geweckt werden.

Diese Lerneinheit kann bei langfristiger Planung und durch Beschränkung auf die wesentlichen Strukturen in der Wellenoptik ohne Zeitverlust im Oberstufenunterricht als Vertiefung der Wellenoptik durchgeführt werden.

Die zweite, außerhalb des schulischen Physikkanons liegende Lerneinheit "Ordnungs-Unordnungs-Übergänge in Kristallen" kann als Facharbeit vergeben, als Projekt am Schuljahresende durchgeführt oder zum Selbststudium für interessierte Schüler, Studenten oder Fernstudenten eingesetzt werden. Ordnungs-Unordnungs-Übergänge sind z. B.

- das Schmelzen oder Sublimieren von kristallinen Festkörpern (Phasenübergänge zwischen fest, flüssig und gasförmig),
- das Erhitzen von Festkörpern (Zunahme der Temperaturbewegung des Atomgitters),
- die Ziffernänderung einer Flüssigkristallanzeige (Ausrichtung der Moleküle beim Anlegen eines elektrischen Feldes),

- der Verlust der magnetischen Kraft oberhalb der Curietemperatur (Übergang zwischen dem ferromagnetischen und paramagnetischen Zustand).

Die makroskopisch im Alltag beobachtbaren und den meisten Lernern bekannten Übergänge werden mikroskopisch modelliert und mit der optischen Kristallographie interpretiert. Kristallographie bleibt damit kein Selbstzweck, sondern der Lernende hält ein Instrument in Händen, mit dem er Mini-Forschung zu den ihm meistens unbekanntem mikroskopischen Vorgängen betreiben kann.

2 Real- und Modellexperiment

Im Modellexperiment wird die Beugung von Röntgenstrahlung an den Atomen eines dreidimensionalen Kristalls (einfallende Welle mit Wellenvektor \vec{k}_E , ausfallende Welle mit Wellenvektor \vec{k}_A) durch die Beugung von sichtbarem Laserlicht an regelmäßig auf einem zweidimensionalen Film angeordneten Modellmotiven modelliert (Tab. 1):

	Realexperiment	Modellexperiment
Beugungsobjekte	Atome eines dreidimensionalen Kristalls	Modellmotive auf zweidimensionalem Film
Wellenlänge der Strahlung	$0,1 \text{ pm} < \lambda_E < 500 \text{ pm}$ (Röntgenlicht)	$0,4 \text{ }\mu\text{m} < \lambda_E < 0,8 \text{ }\mu\text{m}$ (sichtbares Licht)
Motivgröße bzw. -abstand	30 - 300 pm	30 - 300 μm
Motivdichte	$> 10^{24}/\text{cm}^3$ (einfach kubisches Gitter, Gitterkonstante 100 pm)	$< 10^8/\text{cm}^2$ (quadratisches Gitter, Motivabstand 30 μm)
Nebeneffekte	Absorption, Mehrfachstreuung, thermische Bewegung, inelastische Streuung, Gitterdefekte	Resttransparenz, begrenztes Auflösungsvermögen, Dickeninhomogenität
Intensität in Richtung von \vec{k}_A	$I \sim F ^2 \cdot G ^2$	

Tab. 1: Vergleich von Real- und Modellexperiment.

Die verwendeten Wellenlängen der Strahlungen bzw. die Größe der Beugungsstrukturen von Real- und Modellexperiment unterscheiden sich ca. um den Faktor 10^6 . Die flächenbezogene Motivdichte des Realexperiments ist sogar um den Faktor 10^{16} größer als die des Films. Daher sind die Maxima im Beugungsmuster des realen Kristalls, wenn man von Nebeneffekten absieht, schärfer als die des Modellkristalls. Die Nebeneffekte im Realexperiment müssen bei einer Kristallstrukturbestimmung berücksichtigt werden [2], die im Modellexperiment führen gemessen am didaktischen Ziel des Modellexperiments zu einer Verringerung des Kontrastes im Beugungsmusters [3]. Im Mo-

dellexperiment ist nur die elastische Streuung von Strahlung (Streuung ohne Energieverlust, $k_A = k_E$) modellierbar.

Die mathematische Beschreibung der Beugung in Fraunhoferscher Näherung (einfallende ebene Welle, großes Verhältnis Abstand Beugungsobjekt-Beugungsmuster zu Beugungsobjektgröße) ist im Real- und Modellexperiment gleich:

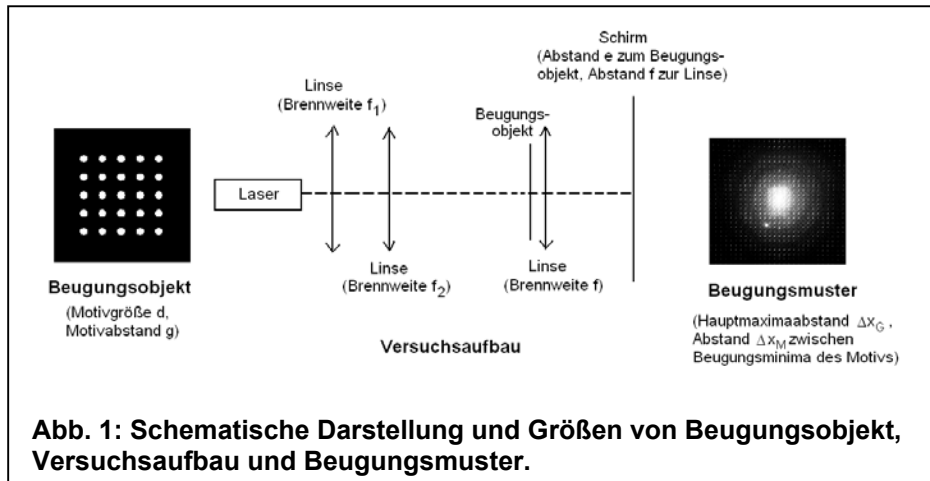
- Die durch das Gitter des realen Kristalls oder des Modellkristalls bestimmte Intensitätsverteilung wird mit dem Gitterfaktor $|G|^2$ beschrieben. Alle von den gedachten Gitterpunkten in k_A -Richtung ausgehenden Sekundärwellen werden phasenrichtig bezüglich eines willkürlich gewählten Bezugspunktes aufsummiert.
- Die durch die Atome der Elementarzelle bzw. durch das eine Modellmotiv bestimmte Intensitätsverteilung wird mit dem Strukturfaktor $|F|^2$ beschrieben. In den Strukturfaktor geht im Realexperiment die Elektronendichteverteilung aller Atome in der Elementarzelle ein. Die Geometrie der Elektronendichteverteilung eines Atoms wird durch die Form des Modellmotivs, die Werte durch eine konstante über die Laserleistung vorgegebene Lichtintensität modelliert¹.
- Die Intensitätsverteilung I des Beugungsmusters entsteht durch Modulation der Intensitätsverteilung des Gitterbeugungsmusters (Gitterfaktor $|G|^2$) mit der Intensitätsverteilung des Motivbeugungsmusters (Strukturfaktor $|F|^2$) [2]. Da die Motiv- bzw. Atomabmessungen kleiner sind als die Motiv- bzw. Atomabstände liegen die Gittermaxima enger zusammen als die Motivmaxima.

3 Beugungsobjektherstellung, Beugungsobjektdimensionierung und Versuchsaufbau

Zur Herstellung der Beugungsobjekte wurden zuerst zweidimensionale graphische Vorlagen mit einem Computeralgebrasystem (CAS) [4] erstellt. Ordnungs-Unordnungs-Übergänge lassen sich programmtechnisch durch einen statistischen Anteil im Ort und der Orientierung der Motive über die Varianz in der Normalverteilung erzeugen. Zur ökonomischen Herstellung einer Vielzahl an Beugungsobjekten wurden jeweils aus ca. 5 Bilddateien bestehende Beugungsobjektserien mit einem Grafikprogramm [5] auf DIN-A3-Format im Maßstab 1:1 in einer Grafikdatei gespeichert. Anschließend wurde über ein Desktop-Publishing-System eine DIN-A3-Filmfolie laserbelichtet, diese entwickelt und in Beugungsobjektserienstreifen geschnitten. Eine detailliertere Beschreibung der Herstellung und der Eigenschaften photographischer Beugungsobjekte ist in [2] zu finden.

Größe der Beugungsobjekte: Für möglichst scharfe Gittermaxima im Beugungsmuster muss die Anzahl N der beleuchteten Motive möglichst groß sein (Höhe des Intensitätsmaximum $\sim N^2$, Breite des Intensitätsmaximums $\sim 1/N$). Dazu kann der Strahl (Durchmesser 2-3 mm) des Lasers (Festkörperlaser, $P > 10$ mW, $\lambda = 530$ nm) mit einem teleskopischen Strahlengang maximal um etwa den Faktor $f_2/f_1 = 30$ cm/5 cm = 6 auf ca. 1,5 cm Durchmesser aufgeweitet werden (Abb. 1). Die von den Motiven belegte Fläche beträgt dann maximal ca. 1 cm x 1 cm, die Beugungsobjektgröße inclusive einer schwarzen Umrandung gegen Störlicht beträgt 1,5 cm x 1,5 cm. Die Aufweitung des Laserstrahls bedingt den Einsatz einer langbrennweitigen Linse (Brennweite f) zur Fokussierung der abgebeugten Parallelbündel in der Brennebene.

¹ Eine nicht konstante Intensitätsverteilung lässt sich durch Schwarz-Weiß-Übergänge realisieren.



Größe und Abstand der Motive: Die endliche Filmauflösung von $2540 \text{ dpi} \approx 1 \text{ px}/10 \mu\text{m}$ und unscharfe Kanten des Motivs bedingen eine Mindestmotivgröße d von ca. $30 \mu\text{m}$ und damit einen Mindestmotivabstand g von ca. $50 \mu\text{m}$ (Abb. 1). Um im Beugungsmuster das Beugungsmuster des Motivs gut erkennen zu können muss eine genügende Anzahl von Gitterpunkten zwischen den Beugungsminima des Motivs liegen. Für ein quadratisches Gitter mit Kreismotiven beträgt der Hauptmaximaabstand Δx_G des Gitters im Beugungsmuster in Kleinwinkelnäherung $\Delta x_G = \frac{e\lambda}{g} \approx \frac{f\lambda}{g}$, und der Minimaabstand

Δx_M des Kreisbeugungsmusters $\Delta x_M \approx \frac{f\lambda}{d}$ [6] und damit $\frac{\Delta x_M}{\Delta x_G} \approx \frac{g}{d}$. Für mindestens 3

Gittermaxima zwischen den Motivminima muss also g mindestens $4d = 0,12 \text{ mm}$ sein.

4 Struktur der Lernumgebung

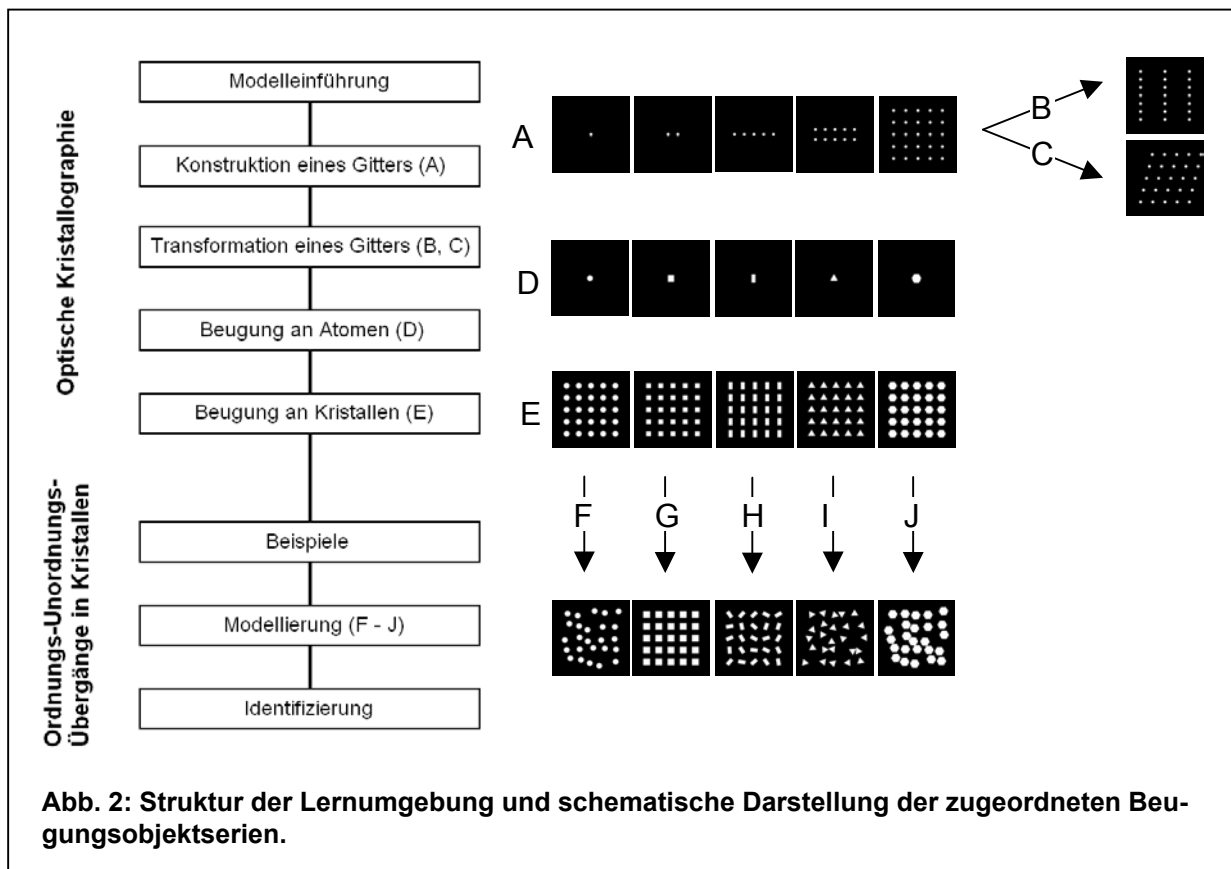
Abb. 2 zeigt eine sachlogische Abfolge von Schritten der beiden Lerneinheiten und die durch Buchstaben zugeordneten Beugungsobjektserien A - J. Folgende Ziele/Inhalte sind für die optische Kristallographie zu nennen:

- Einführung des Modellexperiments: Dazu werden zwischen einem Realexperiment aus der Kristallographie und dem Modellexperiment Analogien entwickelt. Diese sind Voraussetzung, um umgekehrt aus Beobachtungen im Modellexperiment auf die Struktur von Kristallen schließen zu können.
- Einführung des Begriffs "ideales Gitter": Dazu wird ein zweidimensionales Gitter ausgehend von einem nulldimensionalen Punktstreuer über eine eindimensionale Punktstreuerreihe aufgebaut (Serie A).
- Entdecken des Transformationsverhaltens eines zweidimensionalen Gitters: Dazu stehen Beugungsobjektserien zur Variation von Länge (Serie B) und Richtung der Gittervektoren zur Verfügung (Serie C).
- Erkennen des Grundprinzips der Kristallographie: Dazu stehen einfache Motivformen (Serie D) als geometrische Atommodelle wie ein Kreis (Edelgase), ein Quadrat, ein Rechteck (längliche Moleküle), ein gleichseitiges Dreieck (ebenes NH_3 -Modell) und ein regelmäßiges Sechseck (Benzol) sowie mit diesen Objekten besetzte quadratische Gitter zur Verfügung (Serie E).

Die Modellierung von Ordnungs-Unordnungs-Übergängen in Kristallen in der gleichnamigen Lerneinheit erfolgt mit den Beugungsobjektserien F - J. Das Motiv eines quadrati-

schen Kristallgitters kann schrittweise in Form, Position, Größe, Orientierung oder Kombinationen davon variiert werden. Folgende Ziele/Inhalte sind zu nennen:

- Vertiefung der Wellenoptik: Die im Beugungsmuster beobachtbaren Veränderungen werden anhand von wellenoptischen Überlegungen erklärt.
- Modellierung von Ordnungs-Unordnungs-Übergängen: Didaktisch aufbereitete Beispiele beschreiben makro- und mikroskopisch Ordnungs-Unordnungs-Übergänge in Kristallen. Zu den Beispielen werden passende Beugungsobjektserien ausgewählt und der Übergang untersucht.
- Identifizierung von Ordnungs-Unordnungs-Übergängen: Aus der Beobachtung der Beugungsmuster von Ordnungs-Unordnungs Übergängen wird auf die Beugungsobjekt- bzw. Kristallstruktur und deren Veränderung geschlossen.



Im folgenden werden Schritte der optischen Kristallographie und drei Beispiele für Ordnungs-Unordnungs-Übergänge zusammen mit den Beugungsmustern detaillierter beschrieben.

5 Optische Kristallographie

5.1 Einführung des Modellexperiments

Aufgrund der Lernvoraussetzungen aus der Wellenoptik kann die Einführung des Modellexperiments mit einem realen Kristall z. B. einem Salzkristall, dem Bild seines Laue-Diagramms und mit der Frage nach der Beziehung zwischen diesen beiden Objekten beginnen. Der Einstieg erlaubt das Modellexperiment aus dem Realexperiment unter aktiver Beteiligung der Lerner mit folgenden Aspekten zu entwickeln:

- Qualitative Klärung der Entstehung der Reflexe (Interferenz),
- Identifikation der Streuzentren (Atome bzw. Ionen) und ihre idealisierte Modellierung (Modellmotive),
- notwendige Bedingung für die Entstehung der Maxima (Periodische Anordnung der Atome im Kristall)²,
- geeignete Strahlung für realen Kristall und Modellkristall (Kohärenz, Wellenlänge in der Größenordnung der Beugungsstrukturen).

Als Modell für die Streuung von Strahlung an Atomen und als Bindeglied zwischen Real- und Modellexperiment kann die allseitige Streuung von Laserlicht an einem Stück Polyethylen mit weißem Papier im abgedunkelten Raum demonstriert werden. Da nur von den Atomen Strahlung ausgehen kann, liegt es nahe, als geometrisches einfaches Modell des Kristalls eine schwarze Fläche mit regelmäßig angeordneten Löchern zu verwenden. Von welchen Größen des Beugungsobjekts das Beugungsmuster in welcher Weise abhängig ist sollte zur Hypothesenbildung und zur Motivation der weiteren Untersuchung diskutiert werden.

5.2 Konstruktion und Transformation eines Gitters

Ein einziges fast punktförmiges Loch als Beugungsmotiv erzeugt ein Beugungsmuster mit konstanter Intensität, da in idealisierter Betrachtung nur eine einzige Kugelwelle auf den Schirm trifft. Zwei Löcher liefern bereits ein erkennbar aus parallelen vertikalen Linien bestehendes Beugungsbild, das mit zunehmender Lochanzahl schärfer und heller wird (Abb. 3 a, b). Beim Hinzufügen von Reihen in y-Richtung bilden sich nun auch mit zunehmender Reihenzahl in dieser Richtung immer schärfere und heller werdende Maxima heraus (Abb. 3 c, d)³. Im Grenzfall unendlich vieler Löcher in x- und y-Richtung mit verschwindendem Durchmesser ergibt sich ein Punktgitter als Beugungsmuster.

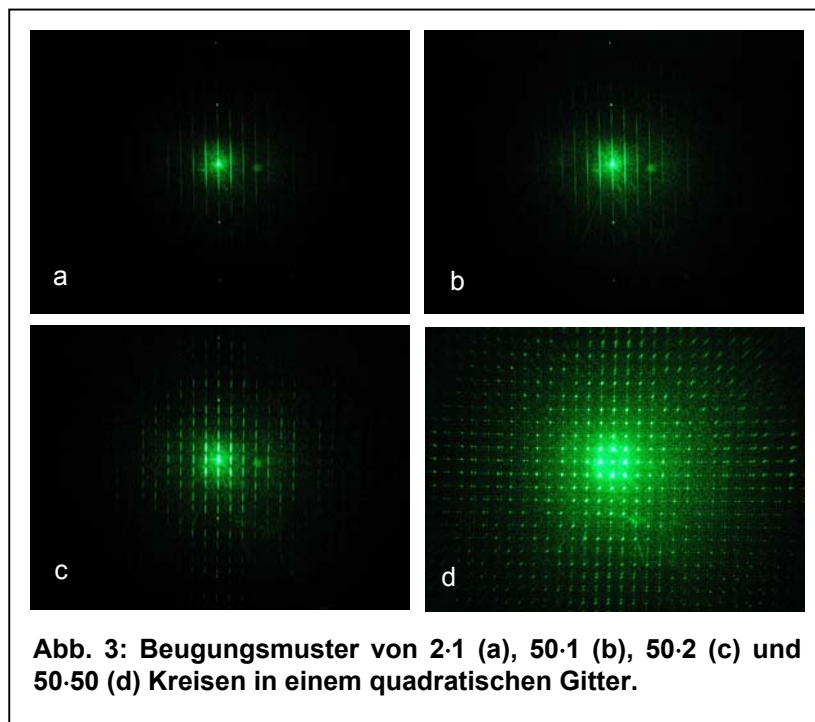


Abb. 3: Beugungsmuster von 2·1 (a), 50·1 (b), 50·2 (c) und 50·50 (d) Kreisen in einem quadratischen Gitter.

Die optionale Untersuchung des Transformationsverhaltens zwischen einem Gitter und seinem Beugungsmuster liefert folgende Ergebnisse: Verdoppelt man ausgehend von einem quadratischen Gitter die Gitterkonstante in x-Richtung und halbiert man gleichzeitig die Gitterkonstante in y-Richtung, so halbiert sich die Gitterkonstante in x-Richtung und verdoppelt sich in y-Richtung [7]. Die Beugungsmuster schiefwinkliger Git-

² Von Beugungsmustern quasi-periodischer Kristalle werde abgesehen.

³ Die Modulation des Gitterbeugungsmusters mit dem des Motivs kann aus didaktischen Gründen durch Einschränkung des Bildausschnitts auf das zentrale Maximum des Motivs oder durch die Herstellung von kleineren Motiven mit der Elektronenstrahlolithographie ausgeblendet werden.

ter zeigen, dass die Gittervektoren des Gitterbeugungsmusters senkrecht zu denen des Modellkristalls stehen.

5.3 Beugung an Atomen und an einem Kristall

Bisher wurde vernachlässigt, dass die Atome aufgrund des Verhältnisses von Atomabstand zu Atomradius nicht als ausdehnungslos betrachtet werden können. Durch die Vielfalt der Modellmotive für Atome (Abb. 2, Serie D) und der Modellkristalle (Abb. 2, Serie E) kann das Grundprinzip der Kristallographie erkannt werden: Das Beugungsmuster eines Kristalls ist das mit dem Beugungsmuster des Motivs modulierte Beugungsmuster des Gitters (Abb. 4 a, b).

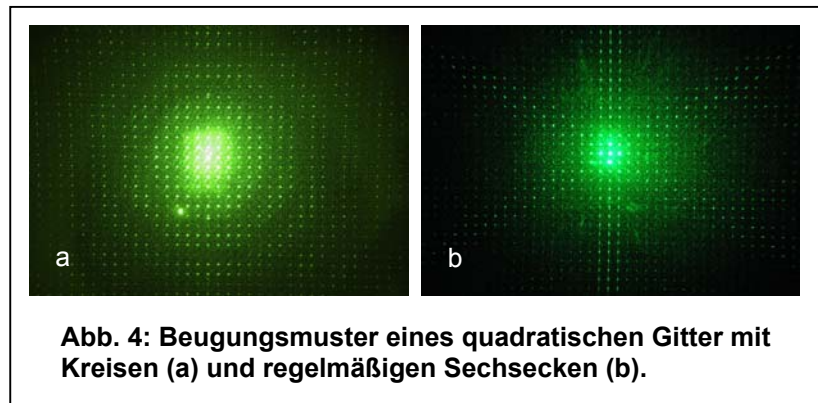


Abb. 4: Beugungsmuster eines quadratischen Gitters mit Kreisen (a) und regelmäßigen Sechsecken (b).

6 Beispiele für Ordnungs-Unordnungs Übergänge

6.1 Verdampfen eines Festkörpers

Der Übergang fest - (flüssig) - gasförmig wird z. B. mit Quadraten als Atommotiv durch eine zunehmende statistische Abweichung der Mittelpunktskoordinaten des Motivs modelliert. Das Beugungsmuster des Gitters verschwindet (Abb. 5), weil bei ungeordneter Verteilung der Quadrate zwischen den von je zwei Motiven ausgehenden und auf einen Punkt im Beugungsmuster zulaufenden Wellen jede Phasendifferenz zwischen 0 und 2π vorkommen kann. Die Wellen summieren sich im Mittel zu Null auf. Jedes Motiv erzeugt aber weiterhin das gleiche Beugungsmuster. Diese überlagern sich deckungsgleich trotz der unterschiedlichen Motivpositionen wegen der Parallelität der Beugungsstrahlen in der Brennebene der Abbildungslinse deckungsgleich auf dem Schirm⁴.

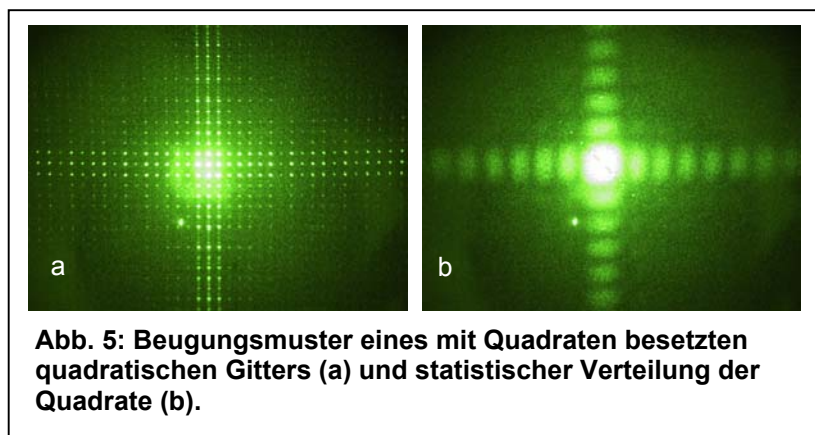


Abb. 5: Beugungsmuster eines mit Quadraten besetzten quadratischen Gitters (a) und statistischer Verteilung der Quadrate (b).

⁴ Bei kleiner Beugungsobjektfläche ist das auch ohne Abbildungslinse näherungsweise der Fall.

6.2 Thermische Bewegung

Die statistische, im einfachsten Fall isotrope thermische Bewegung eines Atoms um seine Ruhelage wird mit Kreismotiven zunehmenden Durchmessers modelliert. Im Beugungsmuster führt das zu immer näher beieinanderliegenden Minima des Kreisbeugungsmusters (Abb. 6). Bei der Kristallstrukturanalyse stört die thermische Bewegung in der Weise, dass die Atome zu groß bestimmt werden. Die gleichen Beugungsmuster erhält man auch für eine Modellierung nach der Atomgröße wie z. B. der kugelförmig beschreibbaren Edelgasgruppe He-Ne-Ar-Kr-Xe.

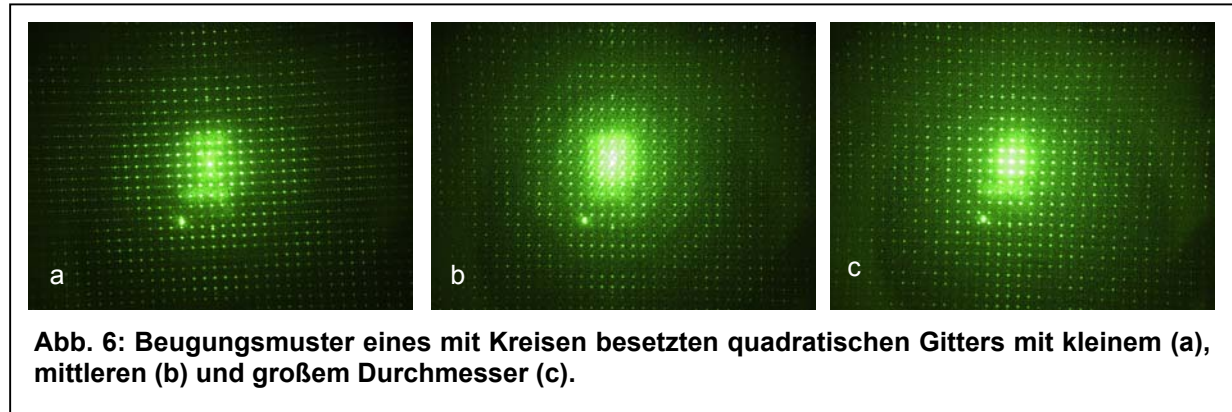


Abb. 6: Beugungsmuster eines mit Kreisen besetzten quadratischen Gitters mit kleinem (a), mittleren (b) und großem Durchmesser (c).

6.3 Nematische Phase von Flüssigkristallen

Längliche Flüssigkristalle weisen in der nematischen Phase eine spontane Orientierungsordnung in einer Vorzugsrichtung auf und die Molekülschwerpunkte sind statistisch verteilt. Die Moleküle werden als Rechteck-Motive modelliert. Bei perfekter Orientierungsordnung sieht man wie beim Beispiel zu Abb. 5b nur das Beugungsmuster des Rechteckmotivs (Abb. 7a). Eine zunehmende Abweichung der Rechteckmotive von der Vorzugsrichtung ergibt im Fall der Gleichverteilung ein Beugungsbild mit Kreisen (Abb. 7b, c). Dies erklärt sich aus der konzentrischen Überlagerung der statistisch winkelorientierten Beugungsmuster der Rechtecke.

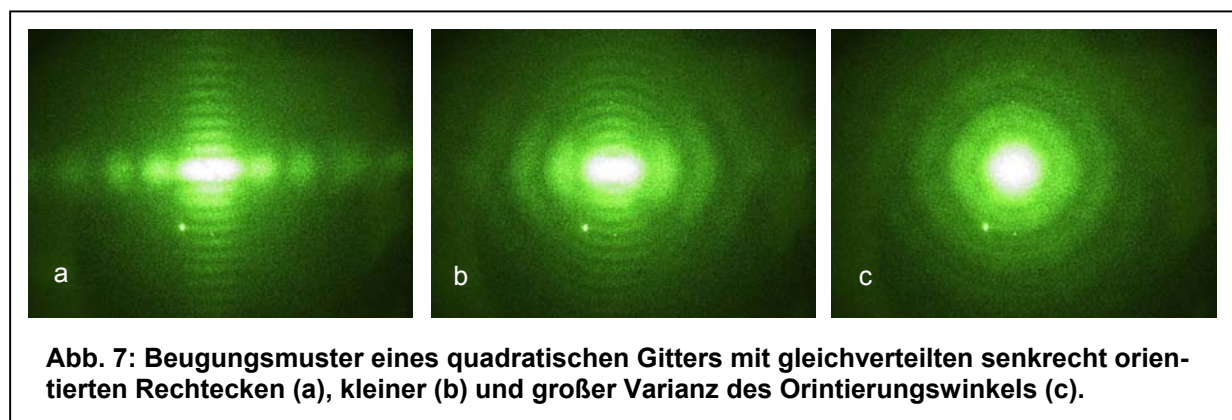


Abb. 7: Beugungsmuster eines quadratischen Gitters mit gleichverteilten senkrecht orientierten Rechtecken (a), kleiner (b) und großer Varianz des Orientierungswinkels (c).

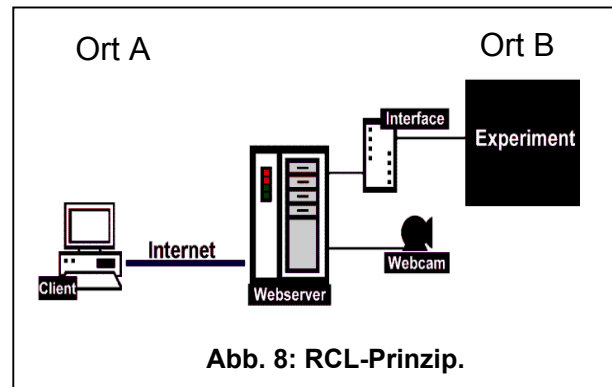
7 Realisation als Remotely Controlled Laboratory (RCL)

7.1 RCL-Prinzip

Mit einem RCL kann ein Nutzer (Client) am Ort A über das Internet und ein Realexperiment am Ort B durchführen (Abb. 8). Zur Steuerung des Experiments und für Messungen wird zwischen Webserver und Experiment ein Interface eingesetzt. Eine oder zwei Webcams erlauben dem Nutzer das Experiment quasi in Echtzeit zu verfolgen und zu kontrollieren [8].

Die Verwendung des Internets kennzeichnet RCLs durch folgende Eigenschaften:

- Ortsunabhängigkeit des Nutzers: Realexperimente können z. B. in der Schule, zuhause, in Museen oder Science-Centern durchgeführt werden.
- Zeitunabhängigkeit⁵ der Durchführung: Realexperimente können außerhalb vorgegebener Lehr-Lernzeiten an allen Wochentagen durchgeführt werden.
- Verfügbarkeit von Versuchen: Fehlende Realexperimente können ersetzt oder für die Schule zu teure, zu gefährliche oder zu komplizierte Realexperimente durchgeführt werden.



7.2 RCL "Ordnungs-Unordnungs-Übergänge in Kristallen"

Zukünftigen Nutzern des RCLs wird es möglich sein, einzelne Beugungsobjekte bzw. Beugungsobjektserien durch Mausclick in den Strahlengang zu bringen und das Beugungsmuster über eine WebCam zu beobachten. Das RCL bietet dann folgende Vorteile:

- Der ferngesteuerte Zugriff auf die arrangierten Beugungsobjekte ermöglicht eine zeit-sparende qualitative Variation von Parametern.
- Die flexible Wahl der Beugungsobjekte ermöglicht außer der hier vorgestellten Reihenfolge der Lernschritte auch ein freieres, spielerischeres und selbstgesteuertes Lernen.
- Im Vergleich zur Kristallographie wird der Einsatz gefährlicher Röntgenstrahlung vermieden, die Grundlagen der Kristallographie können auch ohne Röntgengerät vermittelt werden, und die Beugungsmuster sind unmittelbar mit dem Auge beobachtbar.
- Durch Anbringen von Längenskalen auf dem Schirm für das Beugungsmuster sind auch quantitative Auswertungen möglich.
- Die Anzeige der Beugungsobjektstruktur oder die vergrößerte Abbildung des eingestellten Beugungsobjektes mit einer Linse auf den Schirm erlaubt eine vergleichende Betrachtung von Beugungsobjekt und Beugungsmuster [7].

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Beugung und Interferenz gehören zu den wichtigsten Themen auf den Gebieten der Wellenoptik und der Festkörperphysik. In der Regel werden bei deren Behandlung in der Schule oder den ersten Semestern im Studium Standardzugänge angewendet. Eine

⁵ Zur Vermeidung von Mehrfachzugriffen ist ein Buchungssystem in der Entwicklung.

eingehendere, an Alltagsbeobachtungen geknüpfte und auf die Modernisierung des Physikunterrichts abzielende Behandlung der Beugung und Interferenz haben wir hier vorgestellt.

Darüber hinaus bieten die Experimentiermöglichkeiten des RCLs, die auch den Standardfall der Beugung an eindimensionalen Beugungsobjekten umfassen können, sowohl in der Präsenz- als auch in der Fernlehre neue Möglichkeiten des Lernens:

- Im Projektunterricht können themenspezifische Gruppen zur Theorie, zur photographischen Herstellung der Beugungsobjekte, zur quantitativen Auswertung der Beugungsmuster und zur Suche nach Anwendungen in Natur und Technik gebildet werden. Im Vordergrund steht dann das physikalische Erkenntnisinteresse und die Kooperation zwischen den Gruppen.
- Im Selbststudium können sich Schüler und Studenten anhand webbasierter Selbstlernereinheiten weitgehend selbstgesteuert neue physikalische Inhalte aneignen.

Für qualitativ bessere Beugungsmuster werden im RCL Beugungsobjekte zum Einsatz kommen, die mit dem Verfahren der Elektronenstrahlolithographie [9] hergestellt wurden:

- Das ca. 100-fach bessere Auflösungsvermögen gegenüber dem photographischen Verfahren ermöglicht die Herstellung kleinerer Motive. Die Verwendung einer Metallschicht im Beugungsobjekt liefert einen sehr hohen Kontrast der Beugungsstrukturen. Damit liegt die Modellierung des Gitters näher am mathematischen Idealfall, insbesondere kann die Beugung an einer einzelnen fast punktförmigen Blende demonstriert werden (vgl. Abb. 3).
- Der Einsatz des an die Elektronenstrahlolithographie angepassten CAD-Systems erlaubt eine sehr viel bessere Approximation der Kreisform als dies mit dem CAS möglich ist (vgl. Abb. 4 und 6).
- Für die ca. 3 mm x 3 mm großen Beugungsobjekte ist keine Strahlaufweitung und keine Abbildungslinse mehr notwendig. Zudem lassen sich die Beugungsobjekte auf einem gemeinsamen Träger für einen einfacheren und kompakteren mechanischen Aufbau des RCLs unterbringen.

Wir hoffen mit diesem Beitrag auch exemplarisch einen Einblick in die Entwicklung eines RCLs auf der physikdidaktischen Seite gegeben zu haben. Die technische Seite ist im Rahmen des Selbstbaus eines RCL in [10] beschrieben. Das fertige RCL wird zusammen mit didaktischem Begleitmaterial im RCL-Portal [11] zur Verfügung gestellt werden.

Literatur

- [1] Grehn, J. & Krause, J. (2002): Metzler Physik; Schroedel.
- [2] Schwarzenbach, D. (2001): Kristallographie; Springer.
- [3] Koppelman, G. & Rudolph, H. (1977): Photographische Beugungsobjekte für den Unterricht - Herstellung und Eigenschaften; PhuD 3, 220-229.
- [4] Sciface (2006): MuPAD Pro 4.0; <http://www.sciface.com>.
- [5] Corel (2006): CoralDRAW; http://www.corel.com/servlet/Satellite?pagename=de/Layout&c=Product_C1&cid=1153321305884&lc=de.
- [6] Hecht, E. & Zajac, A. (1974): Optics; Addison-Wesley.
- [7] Danner, S. (1977): Denkstruktur der modernen Physik in Haupt- und Realschule - Ein Beispiel aus der Festkörperphysik; PhuD 4, 272-284.

- [8] Altherr, S., Vetter, M., Eckert, B. & Jodl, H.-J. (2005): Experimentieren aus der Ferne – Ferngesteuertes Labor im Internet (Remotely Controlled Laboratory – RCL); PdN-PhiS 6, 40-46.
- [9] Hartmann, U. (2007): <http://www.uni-saarland.de/fak7/hartmann/de/teaching/advancedpractical/electronbeam lithography.htm>.
- [10] Vetter, M. & Ludwig, M. (2006): Selbstbau eines Remotely Controlled Laboratory (RCL); http://rcl.physik.uni-kl.de/docs/Tutorial_RCL.pdf.
- [11] RCL-Portal; <http://rcl.physik.uni-kl.de>.

Anschrift der Verfasser

S. Gröber, M. Vetter, B. Eckert und Prof. Dr. H.-J. Jodl, AG Optische Festkörperspektroskopie und Didaktik der Physik, Technische Universität Kaiserslautern, Erwin-Schrödinger-Straße, 67663 Kaiserslautern, E-Mail: sebastian.groeber@lmz.rlp.de.

Kurzfassung

Modellierung von Übergängen zwischen Ordnung und Unordnung in Kristallen mit einem Remotely Controlled Laboratory (RCL)

S. Gröber, M. Vetter, B. Eckert, H.-J. Jodl

Übergänge zwischen Ordnung und Unordnung in Kristallen sind ein aktueller Forschungsgegenstand der Festkörperphysik und sie sind in Alltags-Technologien verborgen. Beispiele sind das Verdampfen eines Festkörpers und die molekularen Vorgänge bei der Ziffernänderung einer Flüssigkristallanzeige. Diese Übergänge werden kristallographisch durch Beugung von Röntgen- oder Partikelstrahlung untersucht.

Im Beitrag werden die Lerneinheiten „Optische Kristallographie“ und „Ordnungs-Unordnungs-Übergänge in Kristallen“ vorgestellt. Zentraler Bestandteil ist ein Realexperiment zur Beugung von sichtbarem Licht an zweidimensionalen Beugungsobjekten auf Film mit deren Hilfe Ordnungs-Unordnungs-Übergänge modelliert werden.

Das Realexperiment wird als Remotely Controlled Laboratory (RCL) zur Bedienung über das Internet aufgebaut werden. Der Nutzer kann Beugungsobjekte auswählen und über eine WebCam die Beugungsmuster beobachten und qualitativ oder quantitativ auswerten.