

Beugung und Interferenz als Remotely Controlled Laboratory (RCL)

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

1 Auswahl des Versuchs als RCL

Der Einführung von Beugung und Interferenz in der Wellenoptik wird in der gymnasialen Oberstufe berechtigter Weise eine große Bedeutung zugemessen. Ein breites und tiefes Verständnis der Grundphänomene Beugung und Interferenz ist die Voraussetzung für das Verständnis weiterführender Themen in der Schule (z. B. Interferometer, Spektrometer, Röntgenbeugung, Quantenphysik) und in der Hochschule (z. B. Kristallographie, Fourieroptik).

Allerdings erhalten Schüler bei der vorherrschenden Form von Oberstufenexperimenten als Lehrerdemonstrationsexperimente und fehlendem Experimentiermaterial nur einen unzureichenden experimentellen Zugang zur Beugung und Interferenz. Daher ist ein ferngesteuertes Realexperiment, ein Remotely Controlled Laboratory (RCL), zur Beugung und Interferenz mit vielfältigen Experimentiermöglichkeiten realisiert worden.

Der Artikel fokussiert darauf das Experiment vorzustellen, um zum Einsatz des Experiments im Unterricht anzuregen. Der Leser findet Informationen zum RCL-Projekt und zur Technik von RCLs in [1, 2].

2 Beugungsobjekte

Die Beugungsobjekte des Versuchs wurden mit dem in der Nanotechnologie eingesetzten Verfahren der Elektronenstrahlolithographie hergestellt [3]. Aufgrund des ca. 100-fach besseren Auflösungsvermögens gegenüber einem photolithographischen Verfahren [4] können kleinflächigere Beugungsobjekte hergestellt werden. Eine Strahlaufweitung mit Abbildungslinsen ist nicht notwendig, und eine große Anzahl von Beugungsobjekten finden auf dem Glasträger Platz. Die auf dem Glasträger aufgebrachte Chromschicht ergibt einen sehr hohen Kontrast der Beugungsobjektstrukturen und nahezu ideale Beugungsmuster. Die Anzahl und Dimensionierung der Beugungsobjekte, der vom Videobild einer Webcam erfasste Teil des Beugungsmusters und der Abstand zwischen Beugungsobjekt und Schirm wurden so aufeinander abgestimmt, dass sich Messreihen zu zahlreichen Themen der Wellenoptik aufnehmen lassen.

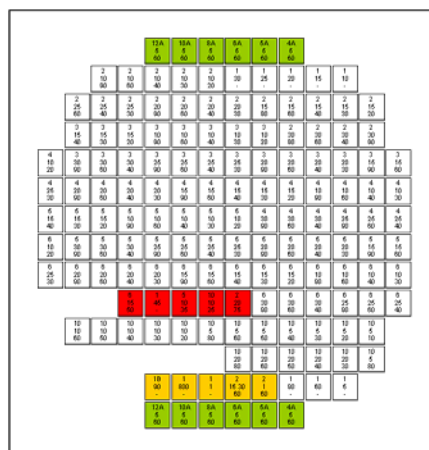


Abb. 1: Schematische Darstellung des Beugungsobjektträgers (5 cm x 5 cm) mit 153 Beugungsobjekten (2 mm x 2 mm). Angegeben sind jeweils Spaltanzahl, Spaltbreite in μm und Spaltabstand in μm .

Auf dem Beugungsobjektträger (Abb. 1) befinden sich 131 Standardobjekte (weiß), 2 x 6 Objekte zum Auflösungsvermögen (grün), 5 dem Experimentator unbekannte Objekte (rot) und 5 Sonderobjekte (gelb). Sonderobjekte sind ein Steg zum Babinet'schen Theorem, ein ‚idealer‘ Doppelspalt mit sehr kleiner Spaltbreite, ein unsymmetrischer Doppelspalt mit unterschiedlichen Spaltbreiten und zwei Spalte mit gegenüber der Wellenlänge großer bzw. vergleichbarer Spaltbreite.

3 Versuchsaufbau

Im Versuch (Abb. 2) kann unter fünf Laserdioden (1a) mit Wellenlängen von 532 nm, 635 nm, 670 nm, 780 nm, sowie 850 nm und dem gleichzeitigen Betrieb des Lasers mit 670 nm und dem Laser mit 635 nm (1b) für die Bestimmung des Auflösungsvermögens gewählt werden. Von den Laserstrahlbündeln (2a, 2b) werden aufgrund der quadratischen Blenden (3a, 3b) nur das auf dem Objektträger (4) eingestellte Beugungsobjekt und insbesondere die Beugungsobjekte zum Auflösungsvermögen voll ausgeleuchtet. Um störende Lichtbrechungen und Reflexionen zu vermeiden, trifft das Laserlicht zuerst auf die unbeschichtete Seite des Beugungsobjektträgers. Das gebeugte Licht fällt durch einen Schlitz (5) in den Verdunklungskasten (6). Auf einem Schirm (7) wird das Beugungsmuster (8) sichtbar gemacht. Die Versuchsgeometrie ist für den Versuchsteil zum Auflösungsvermögen so gestaltet, dass sich die beiden Beugungsmuster auf dem Schirm exakt überlagern.

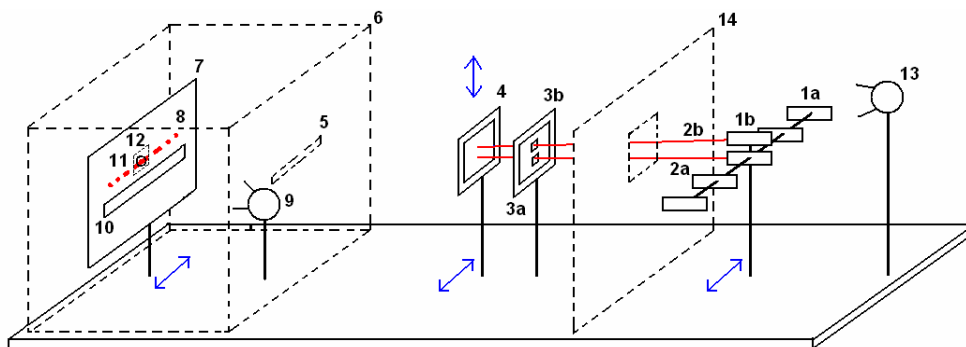


Abb. 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus: Fünf Laser (1a), Laser für Auflösungsvermögen (1b), Laserstrahl von 1a (2a), Laserstrahl von 1b (2b), quadratische Blenden (3a, 3b), Beugungsobjektträger (4), Schlitz (5) im Verdunklungskasten (6), Schirm (7), Beugungsmuster (8), erste Webcam (9), beleuchtete Zentimeterskala (10), Loch (11) im Schirm, Lichtsensor (12), zweite Webcam (13). Nicht eingezeichnet: Motoren, Interface und Kabelverbindungen - Doppelpfeile: Bewegungsrichtungen von Schirm, Beugungsobjektträger und Lasern - Abstand Beugungsobjekt-Schirm: 1,005 m - Abmessungen der Apparatur: 2,0 m x 0,6 m x 0,6 m.

Beugungsmuster können qualitativ mit der ersten Webcam (9) und geometrisch mit einer beleuchteten Zentimeterskala (10) untersucht werden. Mit einem Lichtsensor (11), der hinter einem Loch (12) im Schirm angebracht ist, kann als dritte Untersuchungsmöglichkeit durch horizontales Verschieben des Schirms die Intensitätsverteilung des Beugungsmusters gemessen werden. Mit der zweiten Webcam (13) kann der gewählte Laser und das auf die Blenden fallenden Laserlichtbündel beobachtet werden. Die Sichtblende (14) sorgt für einen neutralen Hintergrund.

4 Versuchsdurchführung

Das Experiment steht auf dem RCL-Portal [5] zur Verfügung und wird von der Laborseite (Abb. 3) aus durchgeführt. Unter

- „Laser“ kann ein Laser ausgewählt und eingeschaltet werden.

- „Objekt“ können entweder durch Wahl von Spaltanzahl, -breite und -abstand Standardobjekte, Sonderobjekte und die Objekte zur Bestimmung des Auflösungsvermögens oder kein Objekt und unbekannte Objekte gewählt werden.
- „Intensitätsmessung“ nimmt der Lichtsensor nach Auswahl der Schrittweite und dem Start der Messung die Intensitätsverteilung eines oder mehrerer Beugungsmuster auf. Die Messdaten werden in einer Textdatei abgespeichert.
- „Messdaten“ lässt sich die Textdatei mit den gemessenen Rohdaten downloaden und für neue Messungen löschen.

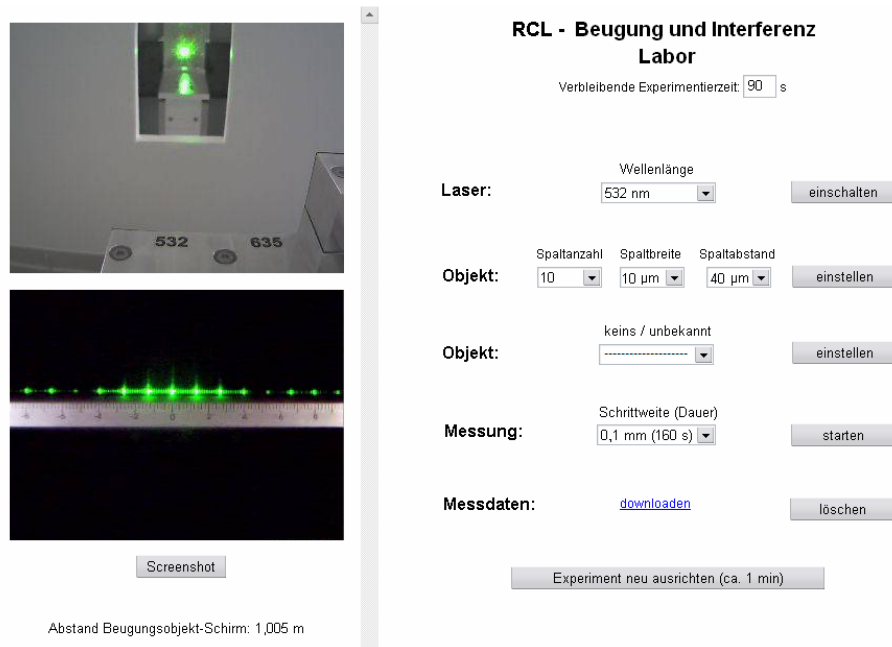


Abb. 3: Laborseite zur Durchführung des Experiments.

Mit dem Button „Experiment neu ausrichten (ca. 1 min)“ wird das Experiment bei einer Störung wieder in einen definierten Zustand gebracht. Im oberen Webcambild kann der Experimentator die Positionierung des gewählten Lasers und des Laserlichtbündels, im unteren Webcambild die Einstellung des Beugungsobjekts an dem sich ändernden Beugungsmuster mitverfolgen. Während einer Intensitätsmessung wird die beleuchtete Zentimeterskala ausgeblendet. Für vergleichende qualitative Beobachtungen erlaubt der Button „Screenshot“ ein Bild des Beugungsmusters zu speichern.

5 Messergebnisse

Die Experimentiermöglichkeiten des RCLs umfassen alle standardmäßig im Unterricht durchgeführten Experimente zur Beugung an Spalt, Doppelspalt und Gitter. Im folgenden werden exemplarisch Messergebnisse zu weiteren Experimenten vorgestellt. Auswertungen wurden anhand der bekannten Formeln

$$\text{Minima Einzelspalt (N = 1): } \sin \alpha = \frac{n\lambda}{b} \approx \tan \alpha = \frac{a_n}{e}$$

$$\text{Maxima Gitter (N > 1): } \sin \alpha = \frac{n\lambda}{d} \approx \tan \alpha = \frac{a_n}{e}$$

für kleine Beugungswinkel durchgeführt (Beugungswinkel α , Ordnung n , Wellenlänge λ , Spaltanzahl N , Spaltabstand d , Spaltbreite b , Abstand Beugungsobjekt-Schirm e und Abstand a_n von der optischen Achse):

- Abb. 4: Das Beispiel des Doppelspalts zeigt, dass Ordnungen durch die Modulation der Intensitätsverteilung mit der des Einzelspalts wegfallen können. Für $\lambda = 532 \text{ nm}$ erhält

man aus gemessenem $a_{14} = 8,3 \text{ cm}$ $d = 90,5 \text{ }\mu\text{m}$ ($90 \text{ }\mu\text{m}$) und aus gemessenem $a_1 = 4,7 \text{ cm}$ $b = 11,3 \text{ }\mu\text{m}$ ($10 \text{ }\mu\text{m}$).

- Abb. 5: Der Abstand a_6 (bzw. alle Abstände) ist proportional zu λ .
- Abb. 6: Für ein Gitter mit N beleuchteten Spalten beträgt die Anzahl der Nebenmaxima im Gitterspektrum $N - 2$. Qualitativ beobachtet man auch die mit N zunehmende Lichtintensität der Hauptmaxima.

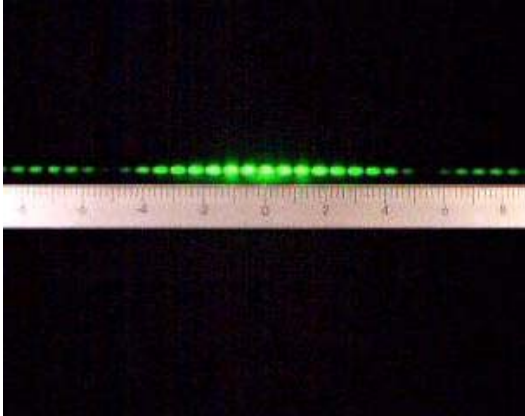


Abb. 4: Bestimmung der Geometrie eines Doppelspalts ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $N = 2$, $b = 10 \text{ }\mu\text{m}$, $d = 90 \text{ }\mu\text{m}$).

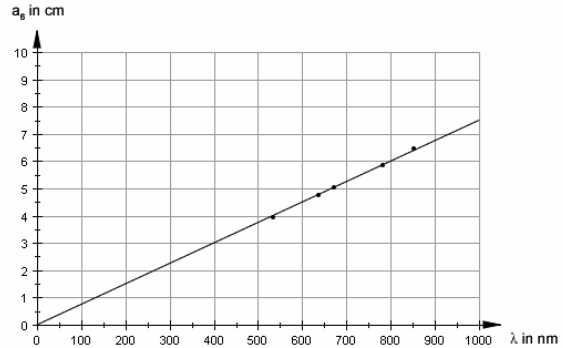


Abb. 5: Wellenlängenabhängigkeit der Beugung bei einem Gitter ($N = 10$, $b = 20 \text{ }\mu\text{m}$, $d = 80 \text{ }\mu\text{m}$).

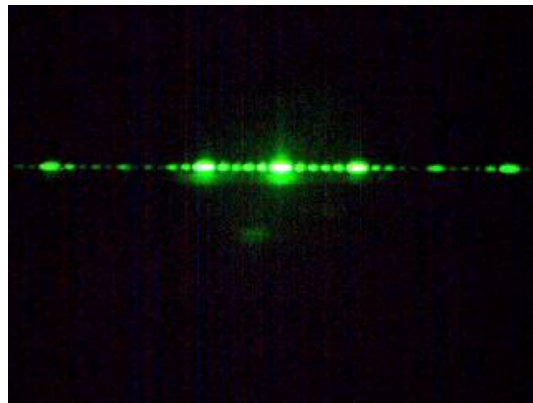
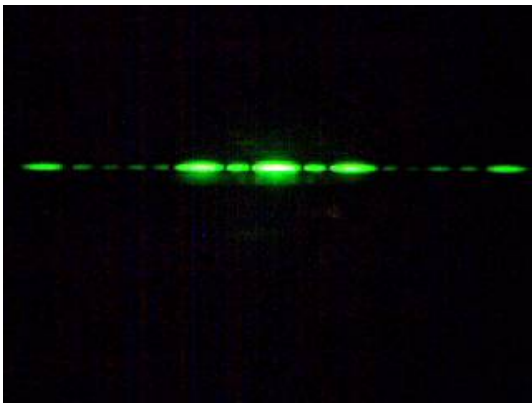


Abb. 6: Veränderung des Beugungsmusters eines Gitters ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $b = 10 \text{ }\mu\text{m}$, $d = 20 \text{ }\mu\text{m}$) mit wachsendem N .

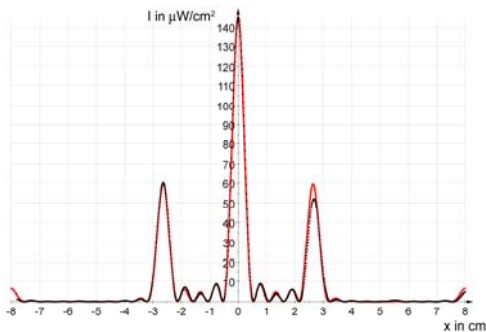


Abb. 7: Vergleich von gemessener (schwarz) und theoretischer (rot) Intensitätsverteilung bei einem Gitter ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $N = 5$, $b = 10 \text{ }\mu\text{m}$, $d = 20 \text{ }\mu\text{m}$).

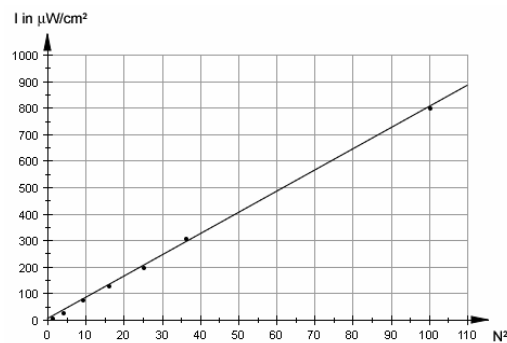


Abb. 8: Abhängigkeit der Lichtintensität des Hauptmaximums von N .

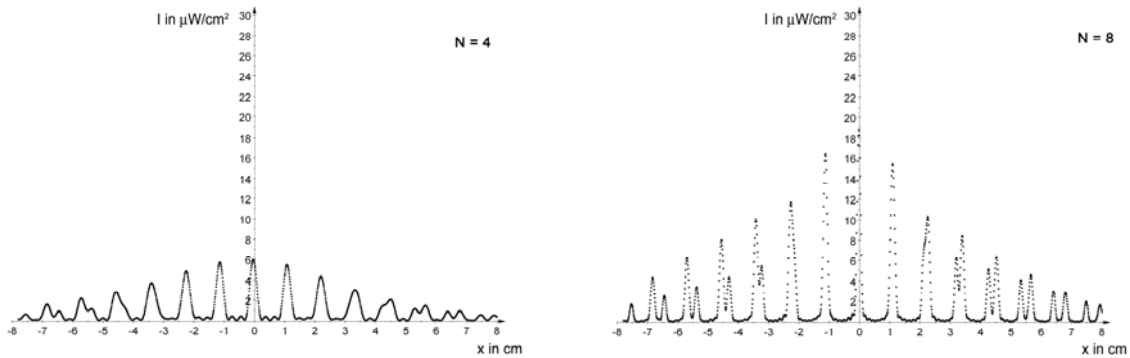


Abb. 9: Trennung der Maxima bei kleinerem n mit einem Gitter ($\lambda_1 = 635 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 670 \text{ nm}$, $b = 5 \text{ }\mu\text{m}$, $d = 60 \text{ }\mu\text{m}$) mit zunehmendem N .

- Abb. 7: Gemessene und theoretische Intensitätsverteilung stimmen gut überein. Differenzen sind auf kleine Abweichungen der Bewegung des Lichtsensors von der horizontalen Achse des Beugungsmusters während der Messung zurückzuführen.
- Abb. 8: Quantitative Messungen mit dem Lichtsensor ergeben, dass für die Lichtintensität des Hauptmaximums $I_0(N) = k \cdot N^2$ gilt.
- Abb. 9: Mit zunehmender Anzahl N der (beleuchteten) Spalte nimmt die Ordnung n , ab der zwei Hauptmaxima getrennt werden können, ab. Quantitativ stimmt das nach

$$A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{635 + 670}{2 \cdot 35} = 18,6$$

konstante berechnete Auflösungsvermögen im Rahmen der Unsicherheit, ab wann zwei Maxima als voneinander getrennt anzusehen sind, mit nN überein.

6 Fazit

Das RCL eröffnet mit der großen Anzahl an Beugungsobjekten, ihrem schnellen Wechsel, dem ferngesteuerten Zugriff und den drei Messmethoden (qualitativ beobachtend im Webcambild, schnelle Streckenmessung mit Lineal und Intensitätsmessung mit Lichtsensor) vielfältigen Experimentiermöglichkeiten für Schüler. Inhaltlich wird ein großes Gebiet der Wellenoptik an der Schule abgedeckt, fachmethodisch können experimentelle Fähigkeiten wie z. B. Hypothesen zu formulieren und zu überprüfen, Messreihen zu planen, durchzuführen und auszuwerten oder ein geeignetes Messinstrument zu wählen, gelernt und geübt werden.

Auf dem RCL-Portal [5] steht damit ein Versuch bereit, der eine innerphysikalische (konstruierte Versuchsapparatur), phänomenorientierte (Struktur und Ästhetik der Beugungsmuster) und zugleich forschende (Umfang der Versuchsmöglichkeiten) Behandlung der Wellenoptik erlaubt. Auch ein zu selten durchgeführter, überblicksartiger und nicht an der Fachsystematik orientierter qualitativ-beobachtender Einstieg oder ein wiederholender experimenteller Abschluss der Wellenoptik ist realisierbar.

Literatur

- [1] Vetter, M.; Gröber, S.; Eckert, B.; Jodl, H.-J. (2006): Neues vom Remote Controlled Lab Projekt, In: Nordmeier, V.; Oberländer, A. (Hrsg.): Didaktik der Physik – Kassel 2006. Berlin: Lehmanns Media, http://rcl.physik.uni-kl.de/docs/Kassel_DD_21.2.pdf.
- [2] Vetter, M.; Ludwig, M. (2006): Tutorial zum Selbstbau eines RCL, http://rcl.physik.uni-kl.de/docs/Tutorial_RCL.pdf.
- [3] Nano+Bio Center – Zentrum für Nanostrukturtechnologie und Molekularbiologische Technologie, Technische Universität Kaiserslautern, <http://www.nbc.uni-kl.de>.

- [4] Siehe z. B.: Koppelman, G.; Rudolph, M. (1977): Photographische Beugungsobjekte für den Unterricht, Herstellung und Eigenschaften, PhuD Nr. 3, S. 220-229.
- [5] RCL Beugung und Interferenz, erreichbar über das RCL-Portal: <http://rcl.physik.uni-kl.de>.

Anschrift der Verfasser

Stellvertretend für die Arbeitsgruppe: Sebastian Gröber, Fachbereich Physik, Technische Universität Kaiserslautern, Erwin-Schrödinger-Str., 67663 Kaiserslautern
E-Mail: groeber@physik.uni-kl.de

Kurzfassung

Beugung und Interferenz sind grundlegende Wellenphänomene und werden typischerweise in der Wellenoptik eingeführt, sind jedoch auch darüber hinaus z. B. in der Quantenphysik von Bedeutung. Die in der Oberstufe vorherrschenden Lehrerdemonstrationsexperimente mit wenigen ausgewählten Beugungsobjekten (Spalte, Doppelspalte und Gitter) erlauben aber nur eine zu geringe Schülerbeteiligung.

Der Beitrag stellt das RCL „Beugung und Interferenz“ - ein über das Internet fernbedienbares Realexperiment - vor. Der Experimentator kann auf einer Webseite als Lichtquelle unter 6 Laserdioden unterschiedlicher Wellenlänge und unter 153 elektronenlithographisch hergestellten Beugungsobjekten wählen. Untersuchungen des Beugungsmusters sind qualitativ mit einer Webcam und quantitativ mit einer Zentimeterskala oder einem beweglichen Lichtsensor zur Messung der Intensitätsverteilung des Beugungsmusters durchführbar.