

Beugung und Interferenz als Remotely Controlled Laboratory (RCL)

Sebastian Gröber, Martin Vetter, Arne Lütkefedder, Bodo Eckert, Hans-Jörg Jodl
TU Kaiserslautern, Fachbereich Physik, Erwin-Schrödinger-Str., 67663 Kaiserslautern

Kurzfassung

Beugung und Interferenz sind grundlegende Wellenphänomene und werden typischerweise in der Wellenoptik eingeführt, spielen jedoch darüber hinaus eine Rolle (z. B. Quantenphysik). Der Schulalltag und das verfügbare Experimentiermaterial erlauben aber häufig nur die Durchführung von Lehrerdemonstrationsexperimenten mit wenigen ausgewählten Beugungsobjekten (Spalte, Doppelspalte und Gitter).

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.

Das RCL unterstützt mit seiner Vielzahl und Variabilität der Beugungsobjekte sowie den Beobachtungs- und Messmöglichkeiten Fachmethoden (Planung einer Experimentreihe), Individualisierung (Anpassung an Lerntempo und Kompetenz der Lerner), zeitgemäße Lehr-Lernformen (Miniforschung in Gruppen) und neue Organisationsformen des Unterrichts (Blended Learning).

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).

Die Unterrichtsrealität sieht allerdings oft anders aus: fehlendes Experimentiermaterial und fehlende Unterrichtszeit sowie der geringe Aufwand, mit einem Laser und wenigen Beugungsobjekten die Wellenoptik gestalten zu können, führen dazu, dass

- hergeleitete Formeln nur an wenigen Einzelmessungen überprüft werden,

- induktive Vorgehensweisen zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Beugungsgrößen selten sind,
- eine qualitative Beobachtung und Erklärung von Beugungsmustern nur zum Einstieg zur Demonstration des Phänomens Beugung stattfindet,
- die Modulation der Gitterspektren mit der Intensitätsverteilung des Einzelspalts zu selten thematisiert wird,
- Schüler zu wenige Experimentiermöglichkeiten haben,
- lehrerzentrierte Lernformen dominieren.

Aus diesen Gründen ist ein ferngesteuertes Realexperiment, ein Remotely Controlled Laboratory (RCL), zur Beugung und Interferenz realisiert worden, das im Folgenden vorgestellt wird.

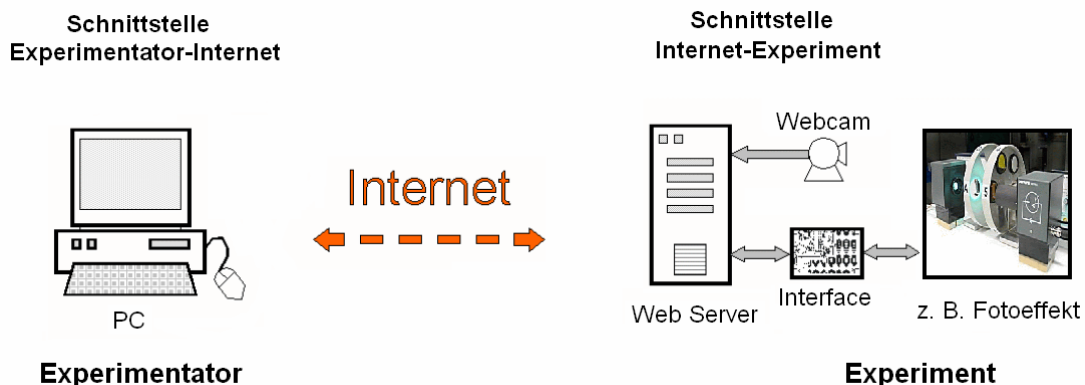


Abb. 1.: Schematische Darstellung des Prinzips eines RCLs.

2. Vom MCL zum RCL

Drei strukturelle Veränderungen machen aus einem von Hand durchgeführten Experiment - einem Manually Controlled Laboratory (MCL) - ein RCL (Abb. 1):

- Das MCL muss mit Aktoren und Sensoren ausgestattet werden. Aktoren sind meistens Schrittmotoren, die mit einer entsprechenden Mechanik das zu bewegend Element, wie z. B. in Abb. 1 die Räder mit Farb- und Graufiltern, sehr genau positionieren. Als Sensoren kommen wie in Abb. 1 eine Fotozelle und je nach RCL, Lichtsensoren, Schalter, Geiger-Müller-Zählrohre usw. zum Einsatz. Die Steuerung der Datenströme von den Sensoren und zu den Aktoren wird auf Befehl des Experimentators von einem Mikrocontroller im Interface durchgeführt.
- Bereits jetzt kann das Experiment lokal vor Ort über ein Terminal-Programm mit einem an das Interface angeschlossenen Computer bedient werden. Ein installierter Webserver ermöglicht es dann, von jedem Ort der Erde mit Internetanbindung auf das Experiment zuzugreifen.
- Die Interaktivität zwischen dem Experimentator und dem Experiment wird durch Videobilder von Webcams sowie durch Ein-, Ausgabe- und Auswahlfelder in der Webseite hergestellt.

Detaillierte technische Informationen sind in [1, 2] zu finden.

3. Beugungsobjekte und Versuchsthemen

Die Beugungsobjekte des Versuchs wurden mit dem in der Nanotechnologie eingesetzten Verfahren der Elektronenstrahlithographie hergestellt [3]. Aufgrund des ca. 100-fach besseren Auflösungsvermögens gegenüber einem photographischen Verfahren [4] können kleinflächigere Beugungsobjekte hergestellt werden. Eine Strahlaufweitung mit Abbildungslinsen ist nicht notwendig, und eine große Anzahl von Beugungsobjekten finden auf dem Glaträger Platz. Die auf dem Glaträger 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 folgenden Themen aufnehmen lassen:

- Zusammenhänge zwischen Spaltbreite, Spaltabstand, Spaltanzahl, Ordnung und Abstand der Maxima und Minima vom zentralen Maximum,
- Übergang zwischen geometrischer Optik und Wellenoptik,
- Zusammenhang zwischen der Spaltanzahl und der Intensitätsverteilung des Beugungsmusters,
- Wellenlängenabhängigkeit der Beugung,
- Abhängigkeit des Auflösungsvermögens eines Gitters von der (beleuchteten) Anzahl der Spalte.

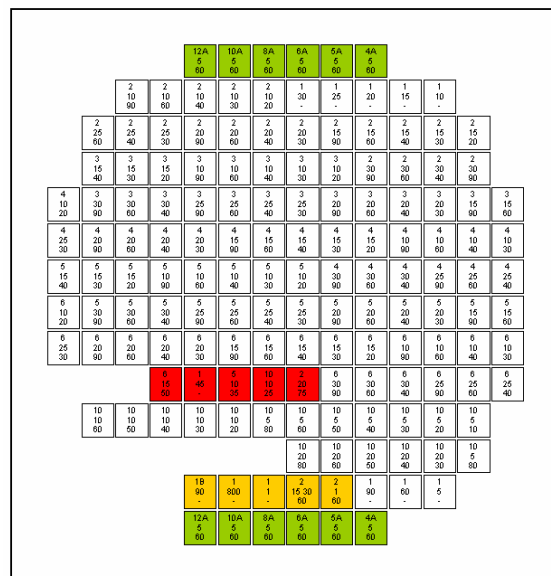


Abb. 2: Schematische Darstellung des Beugungsobjektträgers (5 cm x 5 cm) mit 153 Beugungsobjekten (2 mm x 2 mm). Angegeben sind jeweils Spaltanzahl, Spaltbreite in µm und Spaltabstand in µm.

Auf dem Beugungsobjektträger (Abb. 2) 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.

4. Versuchsaufbau

Im Versuch (Abb. 3) 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.

Beugungsmuster können qualitativ mit der ersten Webcam (9) und geometrisch mit einer beleuchteten Zentimeterskala (10) untersucht werden. Mit einem

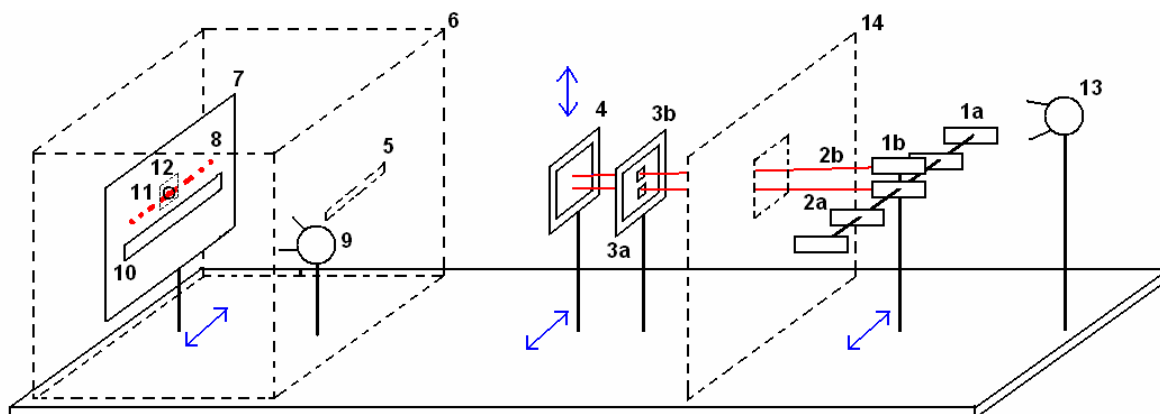


Abb. 3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

5 Laser (1a), Laser für Auflösungsvermögen (1b), Laserstrahl von 1a (2a), Laserstrahl von 1b (2b), quadratische Blenden (3a, 3b), Beugungsobjektträger (4), 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.

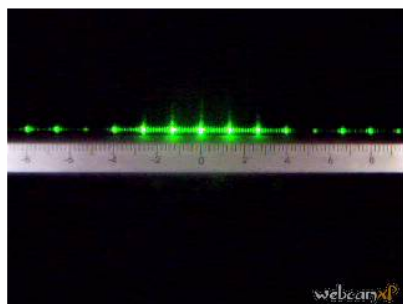
Lichtsensoren (11), der hinter einem Loch (12) im Schirm angebracht ist, kann als dritte Untersuchungsmöglichkeit durch horizontales Verschieben des Schirms die Intensitätsverteilung des Beugungsmusters gemessen werden.

Mit der zweiten Webcam (13) kann der gewählte Laser und das auf die Blenden fallende Laserlichtbündel beobachtet werden. Die Sichtblende (14) sorgt für einen neutralen Hintergrund.

5. Laborseite und Messergebnisse

Das Experiment steht auf dem RCL-Portal [5] zur Verfügung und wird von der Laborseite (Abb. 4) aus durchgeführt. Unter den Punkten

- „Laser“ kann ein Laser ausgewählt und eingeschaltet werden.
- „Objekte“ können entweder durch Wahl von Spaltanzahl, -breite und -abstand Standardobjekte, Sonderobjekte und die Objekte zur Bestimmung



Screenshot

Abstand Beugungsobjekt-Schirm: 1,005 m

RCL - Beugung und Interferenz Labor

Verbleibende Experimentierzeit: 90 s

Wellenlänge
Laser: 532 nm

Spaltanzahl Spaltbreite Spaltabstand
Objekt: 10 10 µm 40 µm

keins / unbekannt
Objekt:

Schrittweite (Dauer)
Messung: 0,1 mm (160 s)

Messdaten: [downloaden](#)

Abb. 4: Laborseite zur Durchführung des Experiments.

mung des Auflösungsvermögens oder kein Objekt und unbekannte Objekte gewählt werden.

- „Messung“ 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.

Mit dem Button „Experiment neu ausrichten (ca. 1 min)“ wird das Experiment bei einer Störung wieder in einen definierten Zustand gebracht. Im oberen Webcambild (Abb. 4 links oben) kann der Experimentator die Positionierung des gewählten Lasers und des Laserlichtbündels, im unteren Webcambild (Abb. 4 links unten) 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.

Im folgenden werden zu den unter 3. genannten Themen beispielhaft mit dem RCL gewonnene Messergebnisse vorgestellt. Verwendet werden die bekannten Formeln

$$\sin \alpha = \frac{n\lambda}{b} \approx \tan \alpha = \frac{a_n}{e}, \quad \sin \alpha = \frac{n\lambda}{d} \approx \tan \alpha = \frac{a_n}{e}$$

für die Minima des Einzelspalts und die Maxima des Gitters für kleine Beugungswinkel (Beugungswinkel α , Ordnung n , Wellenlänge λ , Spaltabstand d , Spaltbreite b , Abstand Beugungsobjekt-Schirm e und Abstand a_n vom Maximum 0. Ordnung):

- Abb. 5 (Einzelspalt, nächste Seite): Für $b (= 1 \mu\text{m}) \approx (0,532 \mu\text{m}) = \lambda$ ist die Intensität des Beugungsmusters fast konstant, weil vom Spalt quasi nur noch eine einzige Elementarwelle ausgeht. Bei Vergrößerung der Spaltbreite rücken die Maxima bzw. Minima des Beugungsmusters immer enger zusammen. Mit $b \gg \lambda$ gelangt man zum Übergangsbereich zwischen Wellenoptik und geometrischer Optik; die Intensitätsverteilung wird immer rechteckförmiger.
- Abb. 6 (Gitter, nächste Seite): Für ein Gitter mit N beleuchteten Spalten beträgt die Anzahl der Nebenmaxima im Gitterspektrum $N - 2$. Qualitativ beobachtet man die mit N zunehmende Lichtintensität der Hauptmaxima.
- Abb. 7: Quantitative Messungen mit dem Lichtsensor ergeben, dass für die Lichtintensität des Hauptmaximums $I(N) = k \cdot N^2$ gilt.
- Abb. 8 (übernächste Seite): Am Beispiel des Doppelspalts erkennt man, dass Ordnungen durch die Modulation der Intensitätsverteilung mit der des Einzelspalts wegfallen können. Bei gegebenem λ ergeben sich aus den gemessenen Abständen $a_{15} = 9 \text{ cm}$ und $a_1 = 4,7 \text{ cm}$ der Spaltabstand $b = 89,1 \mu\text{m}$ ($90 \mu\text{m}$) und die Spaltbreite $d = 11,3 \mu\text{m}$ ($10 \mu\text{m}$).

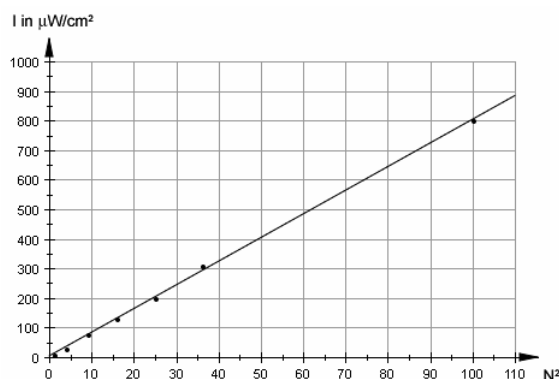


Abb. 7: Lichtintensität I des Hauptmaximums in Abhängigkeit von N^2 .

- Abb. 9 (übernächste Seite): Für ein Gitter als Beugungsobjekt und mit der Zentimeterskala gemessenem $a_6 = 8 \text{ cm}$ erhält man $\lambda = 530 \text{ nm}$.
- Abb. 10: Eine Auswertung von Messreihen mit einem Gitter ($N = 12$, $b = 5 \mu\text{m}$, $d = 60 \mu\text{m}$) zur Wellenlängenbestimmung ergibt zunächst, dass die Hauptmaxima unabhängig von λ für kleine Beugungswinkel äquidistant liegen. Aus den Steigungen ermittelt man $\lambda = 533 \text{ nm}$ (532 nm) und $\lambda = 855 \text{ nm}$ (850 nm).

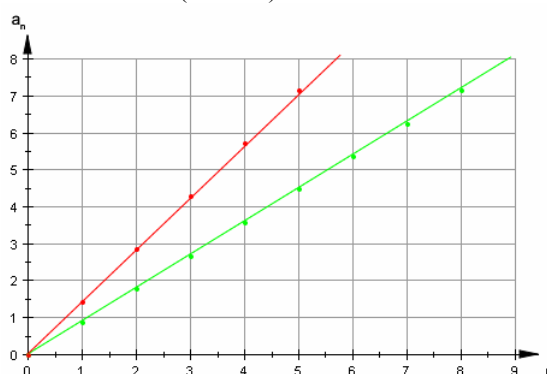


Abb. 10: Position a_n der Hauptmaxima für verschiedene Ordnungen n mit der Wellenlänge λ als Parameter (rote und grüne Gerade).

- Abb. 11 (übernächste Seite): Die gemessenen Intensitätsverteilungen stimmen mit den theoretischen Intensitätsverteilungen gut überein. Differenzen sind auf kleine Abweichungen der Bewegung des Lichtsensors von der horizontalen Achse des Beugungsmusters während der Messung zurückzuführen.
- Abb. 12 (übernächste Seite): Mit zunehmender Anzahl N der (beleuchteten) Spalte nimmt die Ordnung n , ab der zwei Hauptmaxima getrennt werden können, ab. Quantitativ stimmt das nach

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

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

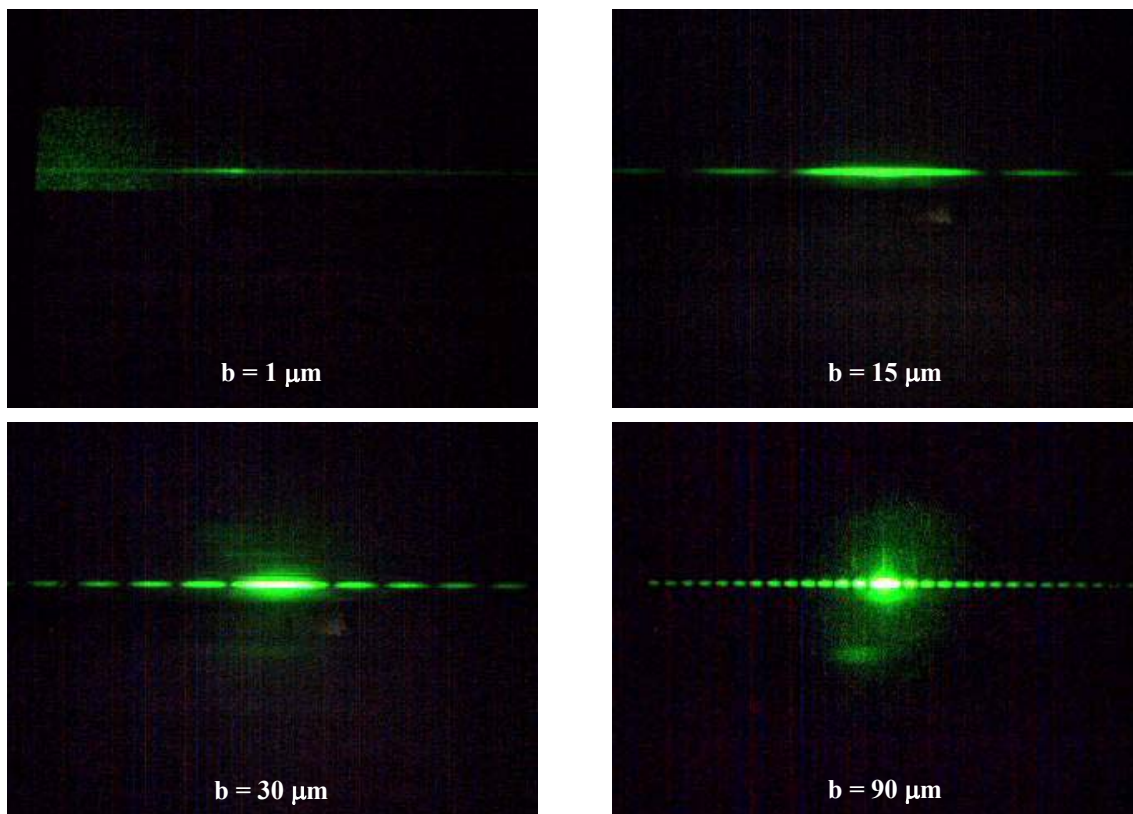


Abb. 5: Beugungsmuster des Einzelspalts ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $N = 1$) mit Spaltbreite b als Parameter.

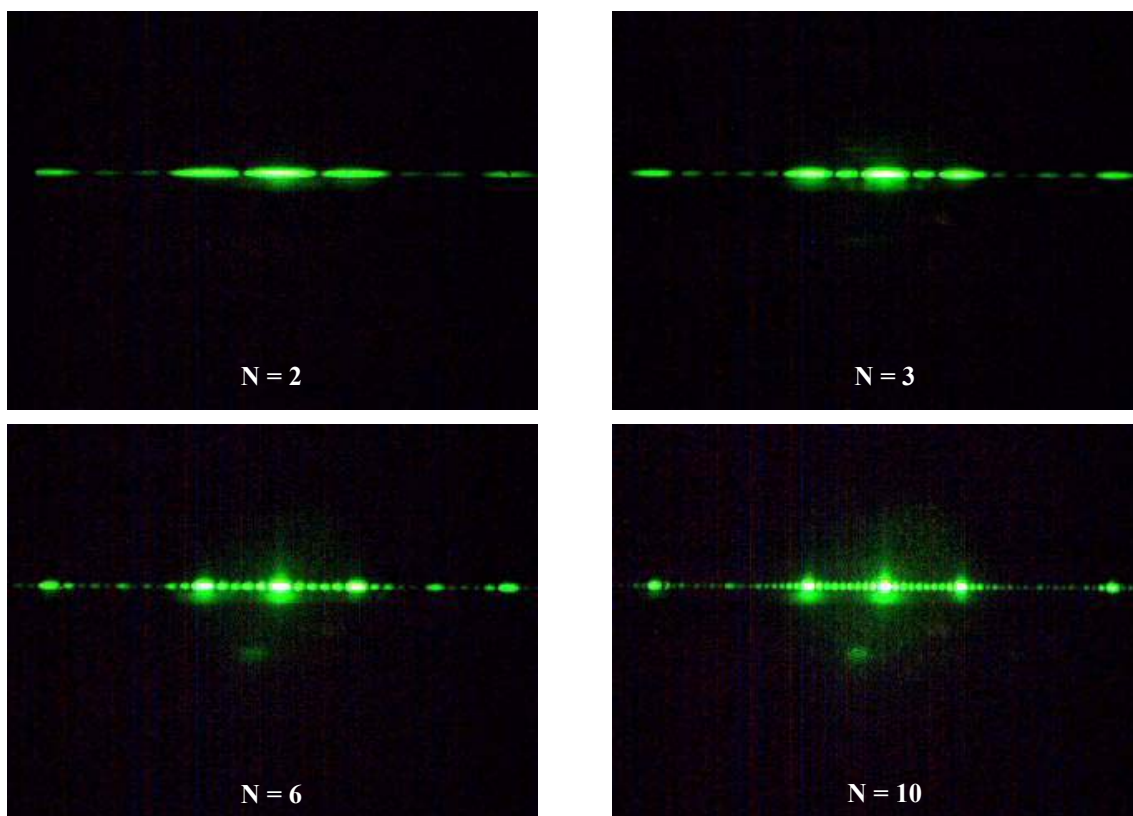


Abb. 6: Beugungsmuster von Gittern ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $b = 10 \mu\text{m}$, $d = 20 \mu\text{m}$) mit der Anzahl N der Spalte als Parameter.

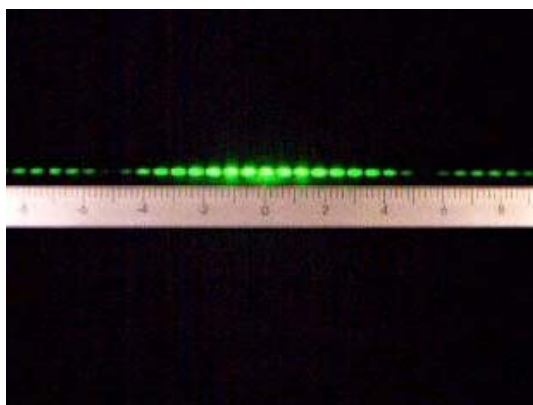


Abb. 8: Beugungsmuster eines Doppelspalts ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $N = 2$, $b = 10 \text{ }\mu\text{m}$, $d = 90 \text{ }\mu\text{m}$).

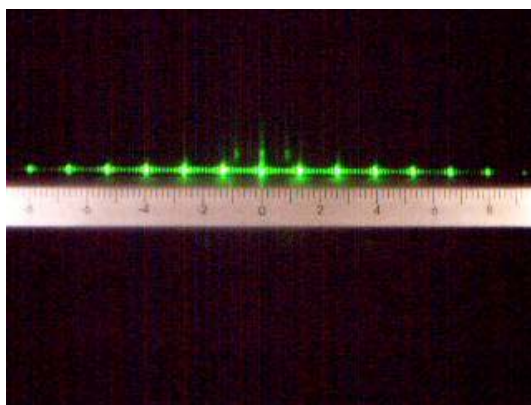


Abb. 9: Beugungsmuster eines Gitters ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $N = 10$, $b = 5 \text{ }\mu\text{m}$, $d = 40 \text{ }\mu\text{m}$).

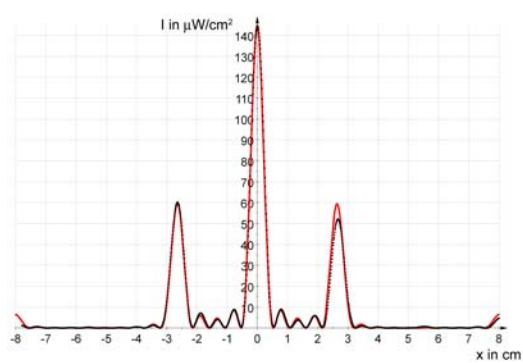
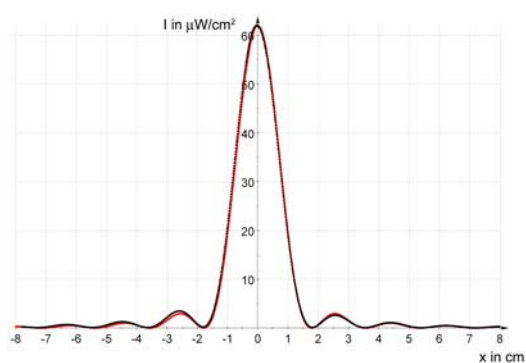


Abb. 11: Intensitätsverteilung $I(x)$ beim Einzelspalt ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $N = 1$, $b = 10 \text{ }\mu\text{m}$) und beim Gitter ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $N = 5$, $b = 10 \text{ }\mu\text{m}$, $d = 20 \text{ }\mu\text{m}$). Messung (schwarz), Theorie (rot).

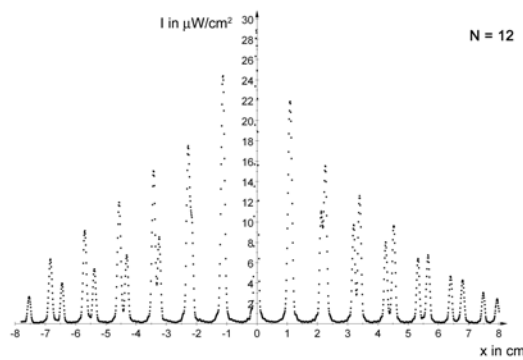
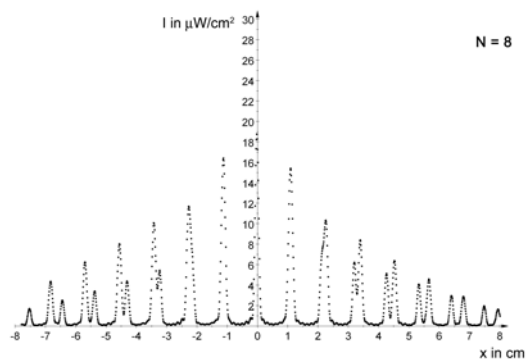
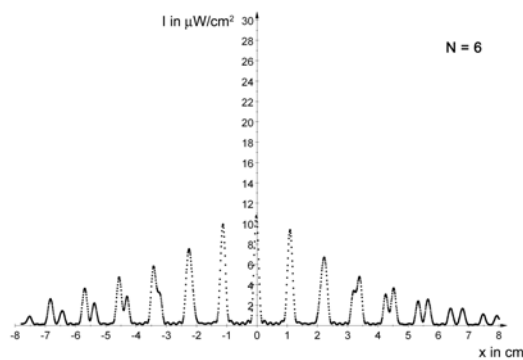
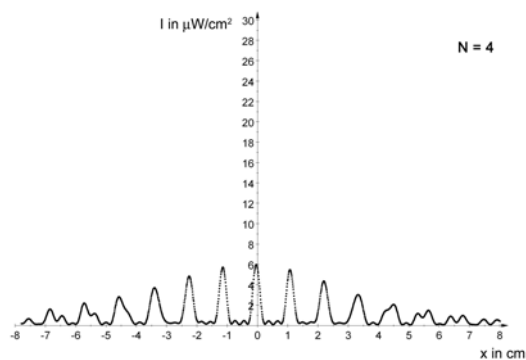


Abb. 12: Intensitätsverteilungen $I(x)$ der überlagerten Beugungsmuster ($\lambda = 635 \text{ nm}$ und $\lambda = 670 \text{ nm}$) zweier gleicher Gitter ($b = 5 \text{ }\mu\text{m}$, $d = 60 \text{ }\mu\text{m}$) mit der Anzahl N der Spalte als Parameter.

6. Unterrichtseinsatz

Im Hinblick auf den Unterrichtseinsatz sind folgende Eigenschaften des RCLs „Beugung und Interferenz“ relevant:

- Das im Internet verfügbare und fern bedienbare Experiment gestattet die Durchführung von typischen Lehrerdemonstrationsexperimenten als Schülerexperimente in der Schule und insbesondere auch von Zuhause aus.
- Das RCL deckt mit den Versuchsthemen ein großes Gebiet innerhalb der Wellenoptik an der Schule ab. Solche, als Multi-Use-RCLs bezeichneten Versuche, können über einen längeren Zeitraum immer wieder unter einem anderen Aspekt im Unterricht eingesetzt werden.
- Die große Anzahl der Beugungsobjekte und ihr schneller Wechsel, die Wahl unter mehreren Messinstrumenten und die offen gehaltenen Möglichkeiten der Versuchsauswertung erlauben gegenüber dem Lehrerdemonstrationsexperiment ein eigenständigeres und offeneres Experimentieren.

Das ermöglicht die Schulung von experimentellen Fähigkeiten wie

- das Formulieren und Überprüfen qualitativer und quantitativer Hypothesen: z. B. Abhängigkeit des Beugungswinkels von der Spaltbreite oder „Gilt die Formel für Maxima beim Gitter auch für den Einzelspalt?“,
- das Planen, Durchführen und Auswerten von Messreihen: z. B. Untersuchung der Wellenlängenabhängigkeit nach Abb. 10,
- die Wahl eines geeigneten Auswertungsinstrumentes: z. B. das schnelle Auffinden des Intensitätswertes des zentralen Maximums nach Abb. 7 in der zum Download bereit stehenden Textdatei,
- das induktive Finden von Formeln: z. B. im Falle des Gitters der Formel für die Position der Maxima bei kleinen Beugungswinkeln.

In den nachfolgend skizzierten Lernszenarien können diese Fähigkeiten erlernt und trainiert werden:

- Nach Demonstration der Beugung mit einem Doppelspalt, werden Hypothesen formuliert wovon die Beugung abhängig sein könnte. Die Schüler untersuchen in Gruppen die Fragestellungen qualitativ mit dem RCL. In einem späteren zweiten Durchgang wird die Beugung quantitativ behandelt.
- Innerhalb eines traditionellen Unterrichts bekommt an der geeigneten Stelle jeweils eine Schülergruppe eine präzise formulierte experimentell zu bearbeitende Aufgabe. Im Laufe der Wellenoptik werden so alle Schüler (-gruppen) beteiligt.
- Als Abschluss der Wellenoptik können mit Hilfe des RCL die Bearbeitung experimenteller Fragestellungen und die theoretischen Grundlagen wiederholt oder die Fertigkeiten und Kenntnisse der Schüler überprüft werden.

7. Fazit

Zum Thema Beugung und Interferenz existiert eine große Anzahl von Veröffentlichungen zu Versuchen, Zugängen, Unterrichtsstrukturen und zur Modellierung. Mit dem vorgestellten RCL steht über das RCL-Portal [5] ein ergänzender Versuch bereit, der eine innerphysikalische (konstruierte Versuchsausrüstung), 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.

Beim Experimentieren der Schüler mit dem RCL außerhalb des Unterrichts kommt dem individuellen, eigenständigen Lernen eine höhere Bedeutung zu als bei den typischen, meist als Rechenaufgaben gestellten Hausaufgaben. Damit rücken den heutigen beruflichen Anforderungen mehr gerecht werdende Blended-Learning-Szenarien mit ausgewogenen und aufeinander abgestimmten Anteilen individuellen Lernens außerhalb des Unterrichts und Lernen im Kursunterricht in den Focus.

8. Danksagung

Unser Dank gilt Frau Dr. Ing. Sandra Wolff und Dr. Bert Lägel vom Zentrum für Nanostrukturtechnologie und Molekularbiologische Technologie (Nano+Bio Center) an der TU Kaiserslautern für die Herstellung der Beugungsobjekte.

9. 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, PhD Nr. 3, S. 220-229.
- [5] RCL Beugung und Interferenz, erreichbar über das RCL-Portal: <http://rcl.physik.uni-kl.de>.