

Optische Experimente mit durchsichtigen CD-Scheiben

Ein Beispiel experimenteller Erkenntnisgewinnung

THOMAS BRAUN – UDO BACKHAUS

In der physikalischen Ausbildung dienen Experimente meist dazu, Sachverhalte (didaktisch) angemessen und verständlich darzustellen. Beim Experimentieren sollen jedoch auch Einblicke in naturwissenschaftliche Arbeitsweisen gewonnen werden [4, 8]. Wie gewinnt man in der Praxis physikalische Erkenntnisse durch Experimentieren? Wir diskutieren ein Beispiel, in dem wir unsere eigene experimentelle Tätigkeit bei der Untersuchung eines optischen Phänomens beschreiben. Es zeigt, welche Bedeutung Vorvorstellungen und Hypothesen, aber auch Irrwege und Paradigmenwechsel bei der experimentellen Erkenntnisgewinnung haben.

1 Ausgangspunkt und Motivation

An der Universität Duisburg-Essen führen wir im Rahmen einer Wahlpflichtveranstaltung mit Studierenden des Lehramts der Physik für die Sekundarstufen I und II und mit Lehrerinnen und Lehrern ein offenes Praktikum im Rahmen unseres Labors für Offenes Experimentieren (Lofex¹) durch. Durch geeignete Ausgangsphänomene sollen dabei eigene experimentelle Untersuchungen angeregt werden, an deren Ende kein vom Lehrenden deklariertes Ziel oder Ergebnis steht, mit denen vielmehr selbst gesetzte Ziele verfolgt werden. Um solche Prozesse in Gang zu setzen, müssen die Ausgangsphänomene so offen und fruchtbar sein, dass die Studierenden eigene Fragestellungen entwickeln und mit Aussicht auf Erfolg experimentell untersuchen können. Wenn wir vermuten, ein bestimmtes Phänomen könne sich für eine solche Arbeitsweise eignen, beschäftigen wir uns zunächst selbst sehr genau mit ihm, um Vorstellungen darüber zu entwickeln, welche Aspekte das Phänomen bietet, welche unterschiedlichen Zielvorstellungen eventuell entwickelt werden und welche Experimentierideen entstehen können.

Wenn man eine angemessene Vorstellung über die »Methodik der Naturwissenschaften« und über »theorie- und

hypotheseorientiertes naturwissenschaftliches Arbeiten« erlangen will, muss man sich mit der Rolle des physikalischen Experiments auseinandersetzen. Während das Experiment in der Forschung Teil der wissenschaftlichen Methode ist, wird ihm im Schulunterricht und auch in der universitären Ausbildung meist eine prinzipiell andere Rolle zugeteilt: Es wird meist als Demonstrationsexperiment oder als streng geführtes Schülerexperiment eingesetzt [12] und dient zur Darstellung physikalischer Phänomene und zur Bestätigung physikalischer Gesetze. Dabei wird die Vorstellung vermittelt, dass in der Physik Gesetze in der Regel auf empirisch-induktivem Wege gefunden werden [6, 13]. Die Physik wird präsentiert als ein in sich abgeschlossenes Gebäude. Tätigkeiten wie das Beobachten und Untersuchen von Phänomenen, das Erkennen und Definieren von Problemen sowie die Kreativität beim Suchen und Auswählen von Lösungsstrategien [15, 16] gehen dabei zum größten Teil verloren.

Im Rahmen eines offenen Experimentalpraktikums mit Studierenden und/oder Lehrern versuchen wir dieser Situation entgegenzuwirken, indem wir untersuchen, wie Experimente geschaffen sein müssen, um wissenschaftliches Arbeiten zu ermöglichen. Zu diesem Zweck nehmen wir unsere eigene experimentelle Tätigkeit immer wieder

¹ <http://www.didaktik.physik.uni-due.de/forschung/lofex/lofex.html>

unter die Lupe. Wir wollen das anhand der Untersuchung eines optischen Phänomens erläutern, bei dem uns bewusst wurde, wie viele Irrwege und manchmal auch Sackgassen wir beim Experimentieren selbst manchmal einschlagen. In der Fachliteratur werden diese Irrwege fast immer verschwiegen. Von Interesse sind nur die »Ergebnisse«. Und doch sind die Irrwege beim Forschungsprozess kein notwendiges Übel, keine verlorene Zeit. Sie sind vielmehr der Keim physikalischer Erkenntnis.

Auf das Phänomen, das wir diskutieren werden, wurden wir durch einen Studenten aufmerksam. Er berichtete über interessante optische Eigenschaften der durchsichtigen CD-Scheiben, mit denen bei größeren Spindeln manchmal die CD-Rohlinge vor Kratzern und anderen äußeren Einflüssen geschützt werden. Er erzählte uns, mit diesen Scheiben könnten optische Abbildungen erzeugt werden. Da wir das Phänomen nicht kannten, es uns kaum vorstellen und erst recht nicht erklären konnten, entschlossen wir uns, es uns anzusehen und genauer zu untersuchen.

2 Das Phänomen

Bei Betrachtung dieser Scheiben im reflektierten weißen Licht erkennt man zunächst farbige Strukturen, die ein Hinweis darauf sind, dass es sich nicht nur um eine gewöhnliche Kunststoffscheibe handeln kann. Bei qualitativen Freihandexperimenten offenbarten sich weitere Phänomene:

- Lässt man durch die Scheibe Sonnenlicht auf einen Schirm fallen, erzeugt sie dort einen hellen Lichtfleck (Abb. 1). Dieser »Brennpunkt« entsteht jedoch nicht, wie bei einer Linse, nur bei einem bestimmten Abstand zwischen Scheibe und Schirm. Er bleibt vielmehr über ca. 10 cm erhalten und ändert bei Vergrößerung des Abstandes zwischen Schirm und Scheibe auffällig seine Farbe von Rot über Weiß nach Blau.
- Hält man die Scheibe in einem Abstand von einigen Zentimetern vor eine weiße Wand, die einem Fenster gegenüberliegt, so beobachtet man auf der Wand ein unscharfes umgekehrtes Bild des Fensters. Eine vor dem Fenster stehende und mit dem Arm winkende Person ist ebenfalls zu erkennen und überzeugt auch Skeptiker, dass die CD nicht nur Licht sammelt, sondern so etwas wie auf dem Kopf stehende Bilder erzeugt.
- Wir verdeutlichten diese Aussage durch die Abbildung einer großen Ringleuchte (Abb. 2): Deutlich ist im Bild der Lampe zu erkennen, dass die Halterung links abgebildet wird, wenn sie sich selbst rechts befindet.

Wie erzeugt die CD diese Abbildungen?

3 Erste Hypothese: Die CD als Fresnel-Linse

Am Beginn einer physikalisch-experimentellen Untersuchung steht oft eine Phase des Probierens, die durch eine Reihe qualitativer Experimente und Überlegungen geprägt ist. Sie dient der Herauskristallisation von Motiven, Untersuchungszielen und Hypothesen. Die im vorangegangenen Absatz beschriebenen qualitativen Experimente fallen alle in diese Kategorie.

Die erste durch diese Experimente spontan entstandene Lösungsidee: Es könnte sich bei der CD um etwas Ähnliches wie eine Fresnel-Linse handeln. Gegen diese Vermutung sprachen jedoch schnell die folgenden Argumente:

1. Die Oberfläche der CD weist keinerlei fühlbare Struktur auf.
2. Es gibt keinen der Linsengleichung entsprechenden Zusammenhang zwischen Gegenstandsweite und Bildweite. Vielmehr ist der Abstandsbereich zwischen CD und Schirm, in dem ein erkennbares Bild aufgefangen werden kann, nahezu unabhängig von der Gegenstandsweite.
3. Farbfehler durch die Dispersion bei Lichtbrechung führen bei blauem Licht zu einer kürzeren Brennweite als bei rotem Licht – im Widerspruch zu unserer Beobachtung.

Für unsere weiteren Untersuchungen veränderten wir die Versuchsbedingungen zunächst so, dass die Effekte einfacher und intensiver wurden: Wir beleuchteten die CD mit grünem Laserlicht, das wir so aufweiteten, dass es, zunächst achsenparallel, dann divergent, die ganze CD durchstrahlte. Auch dann ist ein heller Punkt in der Mitte des Schirmbildes zu beobachten. Da aufgrund der Abdeckung der Scheibenmitte kein Licht geradlinig auf den Schirm fallen kann, muss dieses Licht von den äußeren Bereichen der Scheibe kommen. Es zeigt sich, dass



Abb. 1. Der »Brennpunkt« der CD im Sonnenlicht



Abb. 2. Die CD erzeugt ein kopfstehendes seitenverkehrtes Bild einer Ringleuchte. Der Ausschnitt zeigt das Bild noch deutlicher.

der helle Punkt erst bei einem Schirmabstand von etwa 6 cm erscheint und bei weiterer Bewegung des Schirms nach hinten bei einer Entfernung von etwa 15 cm wieder verschwindet. Die Helligkeit des Punktes bleibt dabei weitgehend konstant. Es handelt sich also eher um eine »Brennlinie« bzw. »Bildlinie« als um Brenn- bzw. Bildpunkt (Abb. 3).

4 Die CD als Beugungsobjekt

Wie erzeugt die Scheibe diese helle Linie? Die Argumente gegen die Fresnel-Linse schienen uns gegen Lichtbrechung als Mechanismus zu sprechen, der der Bildentstehung zugrunde liegt. Dann musste es sich um einen Beugungs- und Interferenzeffekt handeln!

Bereits die zu Beginn unserer Untersuchungen beobachteten Farbeffekte lassen an ein optisches Gitter denken. Sie weisen darauf hin, dass der Scheibe bereits die Führungsrille eingepreßt ist, die bei fertigen CDs den Laser beim Abtasten der gespeicherten Information führt (nähere Informationen im Anhang).

Wird das Licht an diesen Rillen gebeugt?

4.1 Zweite Hypothese: Die CD als Zonenplatte

Wir erinnerten uns, dass so genannte Fresnel'sche Zonenplatten ähnliche optische Eigenschaften wie Linsen haben. Sollte es sich bei unserer Scheibe um eine solche Zonenplatte handeln?²

Eine Zonenplatte besteht aus einem System konzentrischer Ringe, deren Radius proportional zur Wurzel aus ihrer Nummer ist: $r^2 \sim n$. Der Abstand zweier benachbarter Ringe nimmt also mit größer werdendem Radius immer weiter ab. Eine solche Zonenplatte hat eine Folge von Brennpunkten. Die zugehörigen Brennweiten sind (nach [3])

$$f_m = \frac{1}{m} \frac{r_n^2}{n\lambda} \quad m = 1, 3 \dots \quad (1)$$

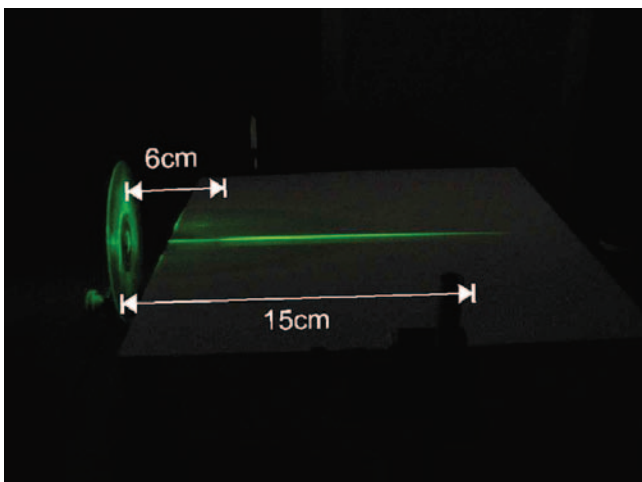


Abb. 3. Achseparallel einfallendes Laserlicht erzeugt hinter der CD eine »Brennlinie«.

Dabei ist r_n der äußere Radius des n -ten Ringes. Dabei werden sowohl die undurchsichtigen als auch die lichtundurchlässigen Ringe gezählt. r_0 ist der Radius der zentralen undurchsichtigen Scheibe. Die Radien der Kreise sind gerade so konstruiert, dass die Lichtwellen, die den so genannten Hauptbrennpunkt ($m = 1$) von benachbarten Ringen erreichen (Abb. 6), untereinander einen Gangunterschied von λ aufweisen [3, 10]. Zu den weiteren Brennpunkten gehören die Brennweiten $f_1/3, f_1/5, \dots$

Nun gibt es auch bei einem System zahlreicher äquidistanter konzentrischer Ringe sicher immer eine Zahl von Ringen, die die Bedingung $r^2 \sim n$ erfüllen. Das war die Idee dieses Lösungsansatzes. Es bleibt jedoch die Frage zu klären, welche Rolle dann alle anderen Ringe spielen, die diese Bedingung nicht erfüllen. Gibt es unter den zahlreichen Ringen nicht immer auch solche, die die von den eben ausgewählten Ringen kommenden Wellen gerade auslöschen? Außerdem zeigt das Experiment keine Folge weit auseinander liegender Brennpunkte, sondern eine kontinuierliche helle Linie.

Aus diesen Gründen verwarfen wir die Idee der Zonenplatte recht schnell wieder.

4.2 Dritte Hypothese: Die CD als konzentrisches Kreisgitter

Eine Zonenplatte kann man auch auffassen als ein ringförmiges Beugungsgitter, dessen Gitterkonstante von innen nach außen so abnimmt, dass die zur Achse hin gebeugten ersten Ordnungen gerade so immer stärker abgelenkt werden, dass sie sich alle im Hauptbrennpunkt überlagern.

Welche Folgerungen ergeben sich, wenn man die CD stattdessen als ringförmiges Gitter mit konstantem Linienabstand auffasst? Beleuchtet man die CD punktförmig mit einem Laser, dann zeigt sich das von linearen Gittern bekannte Beugungsbild, wobei sich der Beugungswinkel zwischen der nullten und der ersten Ordnung aus folgender Beziehung ergibt:

$$\sin(\delta) = \frac{\lambda}{g} \quad (2)$$

Die Gitterkonstante g , der Abstand benachbarter Führungsrillen, lässt sich experimentell mit Hilfe dieser Beziehung leicht messen [1]. Sie ergibt sich aus der Wellenlänge des grünen Laserlichts $\lambda = 532 \text{ nm}$ und einem Beugungswinkel von etwa $\delta = 21^\circ$ zu $1,47 \mu\text{m}$.

Die Beugung um den Winkel δ führt nun dazu, dass von jedem Punkt der CD aus eine Beugungsordnung zur optischen Achse hin, die andere von der Achse weg gebeugt wird. Lässt sich die Brennlinie durch Überlagerung aller ersten Ordnungen erklären, die nach innen gebeugt werden? Um diese Frage zu beantworten, mussten wir uns überlegen, wie sich die an allen Stellen der CD entstehenden Ordnungen überlagern.

Dazu summierten wir zunächst über alle Punkte, die entlang einer vertikalen Sehne liegen (Abb. 4 und 5). Eine Verschiebung des Punktes entlang dieser Sehne führt zu einer Verdrehung des Beugungsbildes um einen Winkel α , welcher gemäß $\tan \alpha = h/r$ von der Höhe h des Punktes über der Scheibenmitte und vom Abstand r der Sehne

² Die Lerneinheit »Fresnel'sche Betrachtungsweise der Interferenz (Beugung)« der ChemgaPedia benutzt bei der Erklärung des Einstiegsversuchs »Der von Licht zerstoche Zeigefinger« genau diese, wie sich herausstellen wird, falsche Argumentation [17]

³ Für kommerzielle gepresste CDs ergibt sich stattdessen, gemessen bei senkrechtem Lichteinfall im reflektierten Licht, eine Gitterkonstante von etwa $g = 1,63 \mu\text{m}$ [1].

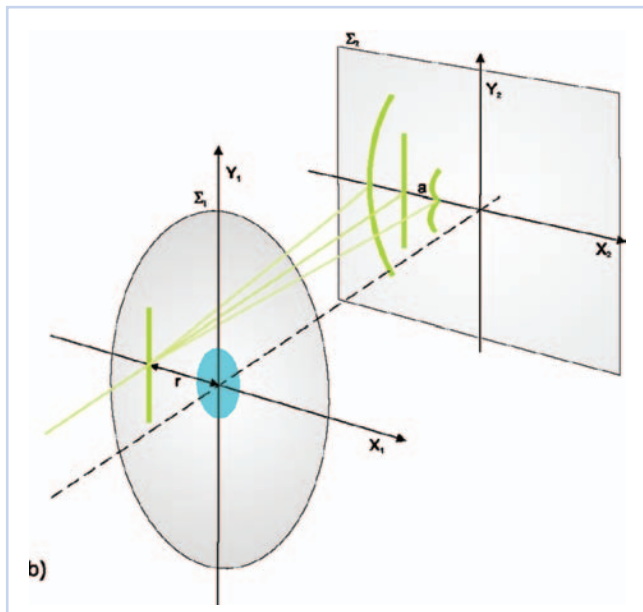


Abb. 4. Ausleuchtung der CD entlang eines senkrechten Spalts

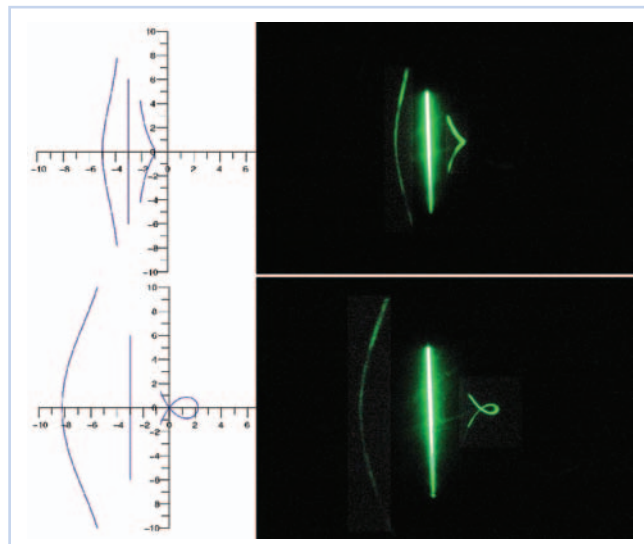


Abb. 5. Positionen der nullten und der ersten Beugungsordnungen eines dünnen Spalts auf dem Schirm für den Fall $r = 3 \text{ cm}$ und $L = 6 \text{ cm}$ (oben), bzw. $r = 3 \text{ cm}$ und $L = 13 \text{ cm}$ (unten). Dargestellt sind die Ergebnisse der Simulation (links) und der Beobachtung (rechts).

vom Zentrum abhängt. Die Summe aller dieser Beugungspunkte führt für verschiedene Abstände L zwischen CD und Schirm zu den in Abbildung 5 dargestellten Ergebnissen. Man erkennt, dass sich die erste Ordnung bei größer werdendem Schirmabstand L auf dem Schirm zu einer schleifenähnlichen Figur zusammenzieht, die wir im Experiment tatsächlich beobachteten.

Die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment überzeugte uns, auf dem richtigen Wege zu sein. Wir fragten uns deshalb, ob die am Schnittpunkt entstehende Aufhellung die Ursache für die bei voller Beleuchtung der CD entstehende Brennpunkt sein könnte. Die zur Beantwortung dieser Frage erforderliche Summation über alle möglichen senkrechten Spalte schien uns gedanklich nur schwer zu übersehen zu sein. Das Ergebnis einer entsprechenden Simulation (Abb. 6) zeigt jedoch eine deutliche Ähnlichkeit mit der Beobachtung im Experiment: Eine Verbreiterung des Spalts führt zu einer Vergrößerung der Schleife insbesondere auf der dem Spalt gegenüber liegenden Seite. Die beiden Schleifenäste schneiden sich

jedoch immer auf der optischen Achse. Bei vollständiger Ausleuchtung entsteht dadurch, zwischen zwei extremalen Schirmabständen L_1 und L_2 , ein heller Bereich in der Mitte des Schirmbildes.

Erst anschließend machten wir uns klar, dass die Summation über alle Punkte der CD viel leichter zu übersehen ist, wenn man sie nicht »spaltenweise«, sondern »kreisweise« durchführt. Dann erkennt man sofort, dass sich die ersten Ordnungen aller Punkte auf einem Kreis in einem Punkt auf der Achse schneiden. Und die Entfernung x dieses Punktes von der CD hängt in einfacher Weise mit dem Beugungswinkel δ und dem Radius r des Kreises zusammen:

$$x = \frac{r}{\tan(\delta)} \tag{3}$$

Zum kleinsten und größten Kreis auf der CD würden demnach, bei einem Beugungswinkel von $\delta = 21^\circ$, die Abstände $L_1 = 6,0 \text{ cm}$ und $L_2 = 15,6 \text{ cm}$ gehören.

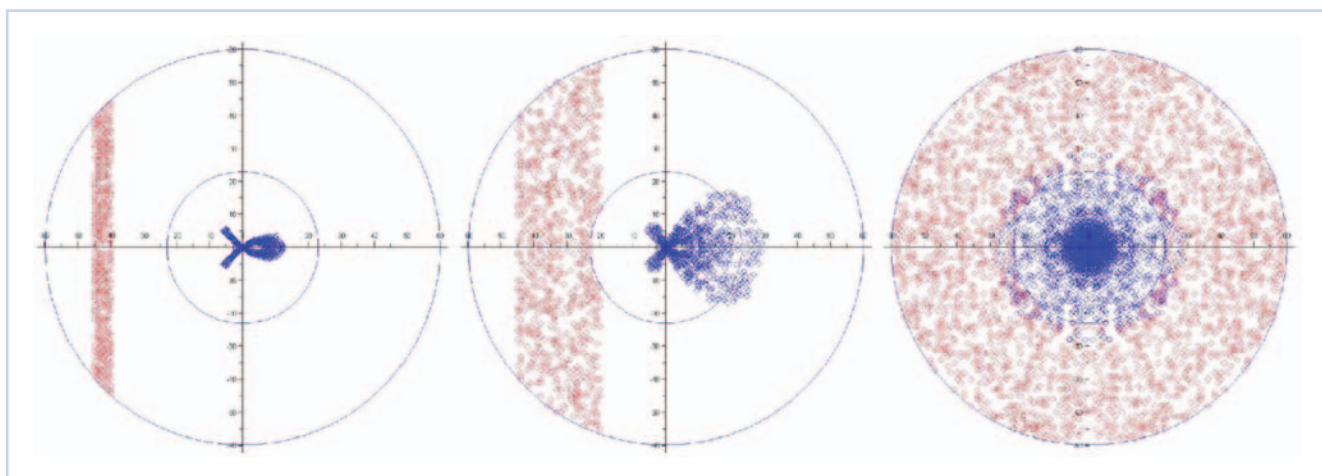


Abb. 6. Übergang von der Beleuchtung eines Spalts zu der ganzen CD

Trotz der befriedigenden Übereinstimmung dieser Erklärung mit Simulation und Experiment kamen uns aber Zweifel: Die Beugungsmuster hinter einem Gitter entstehen, im HUYGENS'schen Bild, durch *phasenrichtige* Überlagerung aller Elementarwellen, die von allen Punkten aller Gitterspalte ausgehen. Das Simulationsergebnis in Abbildung 6 hatten wir aber durch Summation aller »Lichtstrahlen«, d. h. durch Addition von *Intensitäten* erhalten. Dieses Vorgehen erschien uns selbst plötzlich inkonsistent, und wir begannen zu überlegen, wie die Helligkeit auf dem Schirm aufgrund unserer Modellvorstellung korrekt zu berechnen sei.

- Ist die Näherung der Fraunhofer'schen Beugung in diesem Fall sinnvoll oder möglich?
- Welche Rolle spielt die Kohärenz des einfallenden Lichts?

Offensichtlich spielt die Kohärenz des Lichts hier keine wesentliche Rolle, da weißes Licht weder räumlich noch zeitlich kohärent ist. In der Fraunhofer'schen Näherung haben alle einfallenden Wellen die gleiche Phase, ein Umstand der nur bei achsenparallelem Lichteinfall erfüllt ist oder näherungsweise, wenn der Gegenstand sehr weit von der CD entfernt ist. Für realistische Aufbauten muss sicherlich mit Fresnel'scher Beugung argumentiert werden.

Wir haben eine solche Simulation programmiert⁴, in der für jeden Punkt der CD Amplitude und Phase der von einem Gegenstandspunkt ausgehenden Kugelwelle berechnet wird. In jedem Punkt des Schirmes werden dann die von allen CD-Punkten ausgehenden Elementarwellen phasenrichtig aufaddiert.

Das erste Ergebnis ermutigte uns: Im Falle einer Punktlichtquelle auf der Symmetrieachse ergaben sich für Punkte auf der Achse vernünftige Werte für Helligkeit und Farbe. Als wir jedoch die Helligkeit für alle Punkte auf dem Schirm berechnen konnten, wurden wir enttäuscht: In der Simulation wurde zwar Licht zur Mitte hin gebeugt, sodass es dort besonders hell war. Aber die scharf begrenzte Helligkeit in der Mitte des Schirmbildes entstand nicht. Zunächst vermuteten wir Programmierfehler hinter dieser Diskrepanz. Diese Fehlerquelle konnten wir jedoch dadurch ausschließen, dass wir zeigten, dass das Programm uns bekannte Ergebnisse korrekt simulierte⁵.

Je deutlicher wurde, dass unser Programm keine Bilder erzeugte, die mit der Erfahrung übereinstimmten, obwohl es die Lichtbeugung an der Scheibe richtig simulierte, desto drängender wurde die Frage, ob unsere theoretische Grundidee richtig war.

5 Unser »Paradigmenwechsel«

Zu einem gewissen Zeitpunkt des Forschungsprozesses ist ein Forscher aufgrund von Vorurteilen, Vorerfahrungen, theoretischen Überlegungen usw. von der Gültigkeit seiner Hypothesen überzeugt. Er sucht und findet weitere Phänomene und Argumente, die seine Hypothesen bestätigen. Auf der anderen Seite neigt er dazu, Phänomene unbeachtet zu lassen, die nicht in sein Erklärungsbild passen, um seine Theorie nicht in Frage stellen zu müssen. Vielleicht ist es so zu erklären, dass es uns sehr schwer fiel, von der Beugung als Erklärungsmuster Abschied zu

nehmen. In der folgenden Phase der Reflexion und Diskussion bekam zunächst das »Versagen« der Simulation ein immer größeres Gewicht. Wir machten uns die Argumente, die gegen die »Gittertheorie« sprechen, die wir aber wegen des Erfolges der ersten Überlegungen und Experimente beiseite geschoben hatten, wieder bewusst und versuchten, mit ihnen zu verstehen, dass es »so« nicht funktionieren könne – zumindest nicht bei schrägem Lichteinfall, der aber zum Verständnis der Bildentstehung sicher erforderlich ist.

Einen entscheidenden Tipp gab uns H. J. SCHLICHTING, der uns darauf aufmerksam machte, dass ähnliche Phänomene auch an kreisrund angeschliffenen Flächen auftreten.

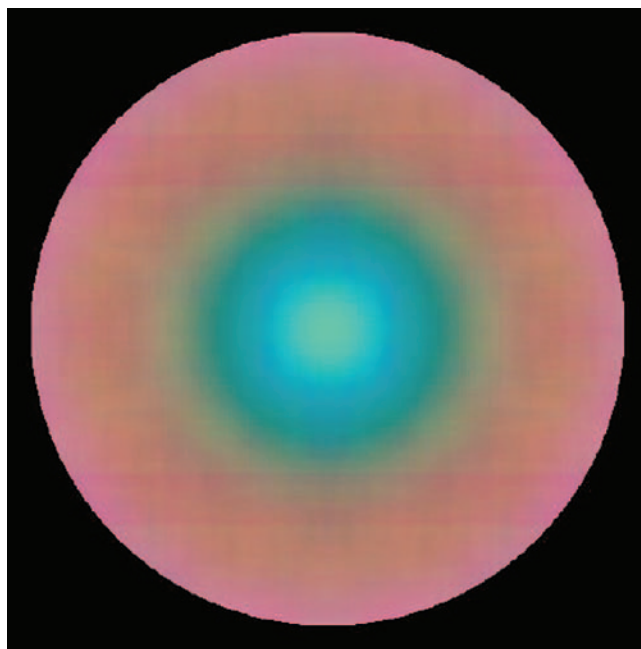


Abb. 7. Ergebnis einer zeitaufwändigen Simulation der Beugung von weißem Licht an der CD-Scheibe ($g = 50 \text{ nm}$, $b = 10 \text{ cm}$)

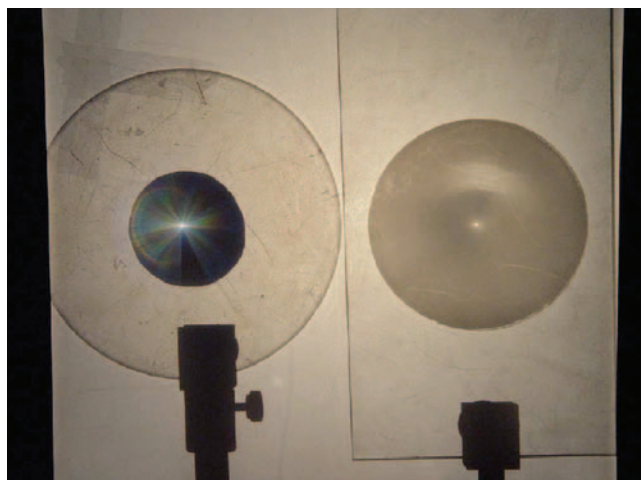


Abb. 8. Gleichzeitige Beleuchtung des CD-Rohlings und der geschliffenen Plexiglasplatte mit parallelem weißem Licht

⁴ Die in diesem Aufsatz erwähnten Simulationsprogramme können bei den Autoren angefordert werden.

⁵ Zum Beispiel erzeugte das Programm, nach entsprechenden leichten Abänderungen, korrekte Beugungsbilder für ein lineares Gitter. Auch die Brennpunkte einer Fresnel'schen Zonenplatte konnten korrekt erzeugt werden.

Aufgrund dieser Anregung schliffen wir die Oberfläche einer dünnen Plexiglasplatte ein wenig mit einer rotierenden Schleifscheibe an, sodass auf der Oberfläche ein konzentrisches System von Kratzern entstand. Und tatsächlich: Die so angeschliffene Plexiglasscheibe erzeugt, ganz ähnlich wie die CD, einen »Brennpunkt«, der sich beim Verschieben des Schirmes als »Brennlinie« erweist (Abb. 8)! Allerdings gibt es auch auffällige Unterschiede: Es lassen sich keine »Farbfehler« beobachten, und die Brennlinie hat bei der angeschliffenen Scheibe keine definierte obere und untere Grenze wie bei der CD.

Für uns war dieses Phänomen sehr überraschend: Die Schleifringe sind sicher viel breiter, ihre Abstände um viele Größenordnungen größer als bei der Führungsrille der CD. Auf jeden Fall sind sie zu groß, um an ihnen Beugungserscheinungen beobachten zu können. Diese Beobachtungen und Überlegungen zwangen uns endgültig zu einem »Paradigmenwechsel« [7]: Wir mussten die Vorstellung, die Beugung spiele die zentrale Rolle bei der uns interessierenden Bildentstehung, verwerfen und eine neue Modellvorstellung entwickeln. Im Zentrum dieser neuen Vorstellung steht die Lichtbrechung an den Flanken der Rillen.

6 Die CD als lichtbrechendes Objekt

6.1 Dritte Hypothese: Reflexion an den Rillenkanten

Bevor wir die Lichtbrechung genauer untersuchten, verfolgten wir kurz die Frage, ob die Ablenkung nach innen vielleicht durch Reflexion an den Oberflächen der Rillenkanten hervorgerufen werden könnte. Reflexionen an Oberflächen konstanter Neigung könnte doch zu einer Situation ähnlich der in Abbildung 9 dargestellten führen. Es wurde jedoch schnell klar, dass die beobachtete Lage der Brennlinie zwischen $L_1 \approx 6$ cm und $L_2 \approx 15$ cm nicht zu unseren Informationen über den Flankenwinkel (s. Anhang) passten: Diese Lage wird durch einen Ablenkungswinkel $\delta \approx 21^\circ$ hervorgerufen. Die reflektierenden Flächen müssten also nur um etwa 10° von der Parallelität zur optischen Achse abweichen, die Rillenflanken also fast senkrecht zur Scheibenebene stehen. Oder umgekehrt:

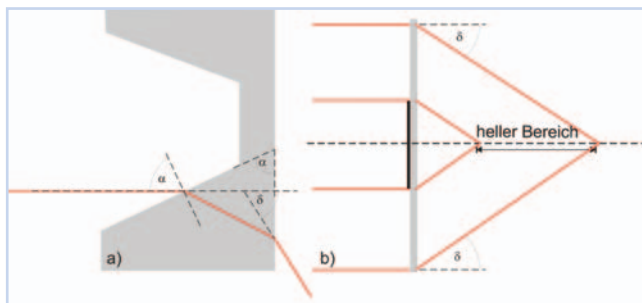


Abb. 9. a) Die Rille auf der CD entspricht einem System nebeneinander liegender Prismen, durch die das Licht gebrochen wird. b) Der helle Bereich entsteht durch die parallel zur Achse hin gebrochenen Strahlen. Er wird durch die innersten und äußersten Strahlen begrenzt, die durch die CD fallen.

Bei dem bekannten Flankenwinkel von 50° käme es zu einer Lichtablenkung um 100° , das Licht würde also in Rückwärtsrichtung reflektiert.

6.2 Vierte Hypothese: Kreisförmige Prismen

Wir betrachten nun die Führungsrille als ein System nebeneinander angeordneter Prismen, die einen Spitzenwinkel $\alpha = 50^\circ$ aufweisen. Für ein erstes Verständnis ist es ausreichend, von einem parallel zur optischen Achse einfallenden Lichtbündel auszugehen. In Abbildung 9a wird dieser Sachverhalt dargestellt. Der unter einem Einfallswinkel α einfallende Lichtstrahl wird an der Unterkante der Rille zweimal gebrochen und verlässt »das Prisma« um den Winkel δ abgelenkt. Da die auf die obere Kante der Rille treffenden Lichtstrahlen von der optischen Achse weg gebrochen werden, sind sie für unser Problem nicht von Belang.

Da alle achsenparallelen Strahlen um denselben Winkel δ abgelenkt werden, ergibt sich die in Abbildung 9b dargestellte Situation: Alle von derselben Rille abgelenkten Strahlen schneiden sich auf der optischen Achse. Dadurch entsteht die helle Linie auf der Achse, deren Endpunkte durch die beiden Randrillen der CD erzeugt werden⁶. Dieselbe Argumentation kann auf die Plexiglasplatte angewendet werden, jedoch mit dem Unterschied, dass hier die Brechung an kreisrund geschliffenen Rillen erfolgt, deren Neigungswinkel zwar entlang ihres ganzen Umfanges konstant sind (weil jede Rille von einem bestimmten Steinchen gekratzt wird), aber für verschiedene Rillen unterschiedliche, statistisch verteilte Werte besitzen. Aus diesem Grund ist die Brennlinie bei der Plexiglasplatte nicht scharf begrenzt.

Mit diesem qualitativen Verständnis ist es möglich, den Zusammenhang zwischen Ablenkung δ , Brechungsindex n des Scheibenmaterials und Neigungswinkel α der Rillenflanken zu bestimmen: Nimmt man vereinfachend symmetrischen Verlauf des Lichts durch die Prismen an⁷, dann ergibt sich aus

$$\sin\left(\frac{\alpha + \gamma}{2}\right) = n \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \tag{4}$$

mit $\delta = 31.2^\circ$ aus unserer Theorie ein deutlich größerer Ablenkungswinkel als mit (3) aus der beobachteten Lage der Brennlinie folgt. Die Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment wäre wesentlich besser, wenn der Brechungsindex des CD-Materials $n = 1.37$ oder der Flankenwinkel $\alpha = 40^\circ$ wäre.

Bis hier haben wir Licht betrachtet, das achsenparallel auf die Scheibe trifft. Zur Erklärung der Bildentstehung ist es aber notwendig zu verstehen, wie Licht abgelenkt wird, das von einem Punkt aus divergent auf die Scheibe trifft. Die Verallgemeinerung ist nicht schwierig, solange sich die Punktlichtquelle auf der Achse befindet und so weit entfernt ist, dass die Winkel, die das auftreffende Licht mit der Achse bildet, so klein bleiben, dass weiterhin angenommen werden kann, dass alle Rillen unter demselben Winkel getroffen werden. Dann wird aus der »Brennlinie« eine etwas nach hinten verschobene »Bildlinie«.

⁶ Dieselbe Argumentation haben wir bereits bei der Beugung verwendet.

⁷ Die korrekte Rechnung [3] führt auf kein wesentlich anderes Ergebnis; der Unterschied beträgt etwa 1° .

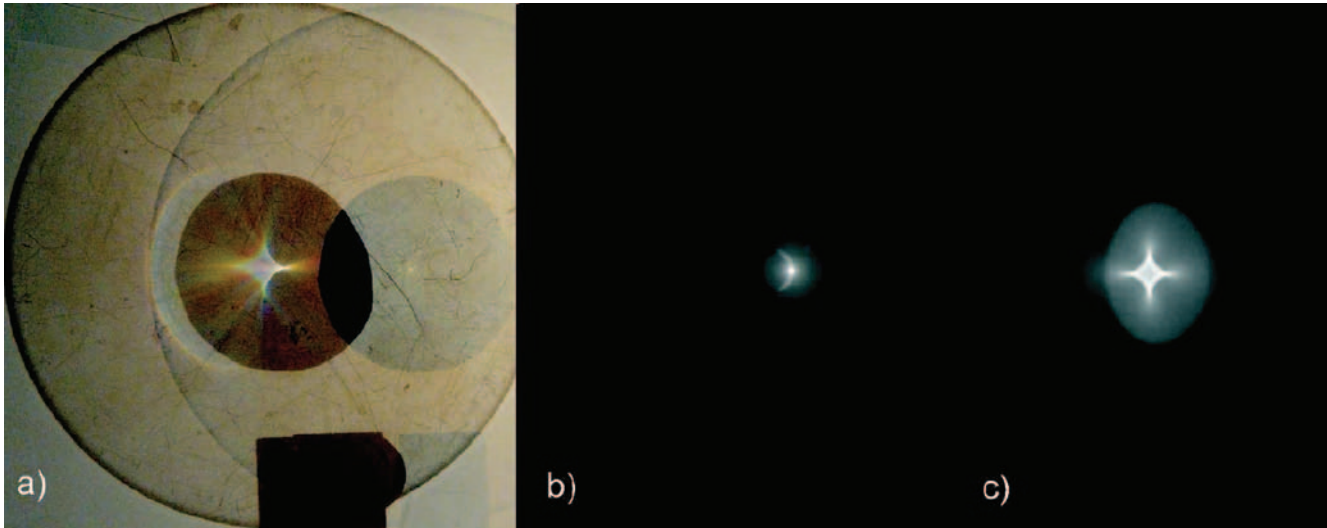


Abb. 10. Numerische Berechnung des Schirmbildes ($b = 9 \text{ cm}$) in der xy -Ebene bei Beleuchtung der CD mit einer Punktlichtquelle ($g = 1,65 \text{ m}$) in einem Winkel von 20° : a) experimentelles Ergebnis, b) numerisches Ergebnis mit der Näherung geraden Einfalls, c) numerisches Ergebnis bei korrekter Rechnung.

Die Beschreibung wird erheblich schwieriger, wenn sich die Lampe nicht mehr auf der optischen Achse, sondern an einem beliebigen Ort im Raum befindet. In diesem Fall ist der räumliche Strahlverlauf schwer vorstellbar; denn nun muss berücksichtigt werden, dass die Prismen entlang eines Kreises nicht unter demselben Winkel getroffen werden und im Allgemeinen »windschief« durchlaufen werden.

Erzeugt eine Punktlichtquelle, auch wenn sie sich nicht auf der optischen Achse befindet, eine Bildlinie, deren Richtung mit der Verbindungslinie Lampe-Scheibenmittelpunkt übereinstimmt? Sollte das der Fall sein, wäre die Bildentstehung im Wesentlichen verstanden (siehe Abschnitt 7). Da es uns nicht gelang, uns den unsymmetrischen Lichtverlauf durch die Scheibe vorzustellen, verfassten wir wiederum eine Simulation.

Dabei gingen wir zunächst vereinfachend davon aus, dass alle auftreffenden Strahlen auch bei unsymmetrischem Verlauf um denselben Winkel δ zur optischen Achse hin abgelenkt werden. Tatsächlich ergibt sich unter dieser Annahme eine recht gute Fokussierung auf eine Bildlinie, die die vorhergesagte Richtung hat (Abb. 10b), und das selbst bei Einfallswinkel von 20° , bei denen das Experiment ein deutlich anderes Phänomen zeigt (Abb. 10a). Lag das nur an der gewählten Vereinfachung, oder hatte unsere Vorstellung noch einen grundsätzlichen Fehler? Die Abweichung zwischen Simulation und Experiment zwang uns deshalb, den windschiefen Durchgang durch die Prismen korrekt zu programmieren (Abb. 11). Dabei werden für jeden auf die Scheibe treffenden Lichtstrahl der Einfallswinkel und die Brechungen bei Eintritt in die und bei Austritt aus der Scheibe korrekt berechnet. Anschließend wird der Schnittpunkt des Brechungsstrahls mit dem Schirm markiert. Nach dieser Korrektur ergab sich endlich eine fast perfekte Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation (Abb. 10c).

Diese Übereinstimmung der Simulation mit der Beobachtung im Experiment werten wir als Bestätigung unserer Modellvorstellung, auch wenn die gemessenen Abstände nicht ganz zu unseren Informationen über Flankenwinkel und Brechungsindex passen. Diese Zuversicht erhärteten wir durch weitere Untersuchungen (die wir an dieser Stel-

le nicht genauer beschreiben), z. B. durch systematische Vergrößerung der Einfallswinkel und Vergleich der entstehenden Schirmbilder mit der Simulation für verschiedene Abstände von Lampe und Schirm zur CD.

7 Erklärung der Bildentstehung

Warum lässt sich nun auf einem Schirm das Bild eines Gegenstandes, z. B. einer Ringleuchte, erkennen?

Zur Beantwortung dieser Frage fassen wir zunächst die Ergebnisse der vorangegangenen Experimente und Überlegungen zusammen:

- Aufgrund von Brechung an den wie Prismen wirkenden inneren Flanken der Rillen wird das Licht einer Punktlichtquelle, die sich auf der optischen Achse befindet, um einen Winkel δ zu dieser hin abgelenkt. Dieser Winkel ist bei der CD für alle Rillen gleich groß.
- Durch diese Fokussierung entsteht hinter der CD auf der optischen Achse eine relativ scharf begrenzte helle Linie, die Bildlinie. Sie hat gut definierte Endpunkte. Bei der Plexiglasplatte ist diese Linie viel weniger scharf begrenzt.

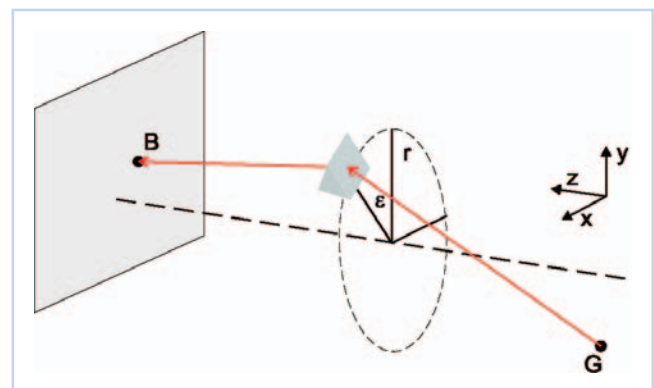


Abb. 11. Simulation des windschiefen Durchgangs eines Lichtstrahls durch ein Flankenprisma

- Bei der CD hängen die Endpunkte der Bildlinie in einfacher Weise mit dem Winkel der Rillenflanken und dem Brechungsindex des Scheibenmaterials zusammen.
- Rückt die Punktlichtquelle von der optischen Achse weg, entsteht weiterhin eine Bildlinie, deren Schärfe jedoch mit zunehmendem Einfallswinkel schnell abnimmt. Die Bildlinie ändert ihre Richtung so, dass Scheibenmitte und Lampe auf ihrer Verlängerung liegen. Die Entstehung der Bildlinie ist anschaulich nicht mehr zu verstehen. Sie kann vielleicht mit Stetigkeitsargumenten aus der achsensymmetrischen Situation abgeleitet werden. Die Lage und die mit größer werdendem Winkel zunehmende Unschärfe dieser Linie kann jedoch simuliert werden, indem der windschiefe Strahlengang durch die Prismen korrekt berechnet wird.
- Obige Aussagen gelten in gleicher Weise für die kreisförmig zerkratzte Scheibe. Allerdings hat hier jeder Ring seinen eigenen Flankenwinkel. Wenn man annimmt, dass diese Winkel nicht zu stark um einen Mittelwert streuen, führt die Brechung an den Flanken lediglich zu einer schlechteren Fokussierung auf die Bildlinie und zum Verschwinden ihrer Begrenzungs- und Endpunkte.

Bei der Abbildung eines Gegenstandes durch die Scheibe entsteht hinter der Scheibe eine Schar von Bildlinien, deren Verlängerungen sich in der Scheibenmitte schneiden. Im Falle einer Ringleuchte bilden sie den Mantel eines Kegelstumpfs (Abb. 12). Auf einem Schirm hinter der Scheibe erzeugt jede Bildlinie einen »Bildpunkt«. Die Größe des so entstehenden Bildes hängt wie bei einer Lochkamera mit der Gegenstandsgröße und dem Abstandsverhältnis zusammen. Dieser Zusammenhang lässt sich mit der Ringleuchte experimentell bestätigen, solange die Gegenstandsweite nicht zu klein und damit der Einfallswinkel nicht zu groß wird.

Die schlechtere Fokussierung bei der zerkratzten Scheibe bewirkt gegenüber der CD eine etwas geringere Bildschärfe, vor allem aber einen verringerten Kontrast (Abb. 13 und 14).

8 Das Zusammenwirken von Interferenz und Brechung

Im Allgemeinen sind an physikalischen Phänomenen viele verschiedene Effekte beteiligt. Das gilt insbesondere für komplexe Phänomene. Eine wesentliche Aufgabe des Experimentators besteht deshalb darin herauszufinden, welche Effekte für das Phänomen wesentlich sind und welche nicht. Bei der CD-Scheibe spielen sicher sowohl Reflexion, als auch Brechung und Beugung eine Rolle. Aufgrund unserer Vorvorstellungen und wegen der sichtbaren Farbreihenfolge bei der Brennlinie (von Rot nach Blau, vgl. Abschnitt 2) war für uns, nach einer kurzen Prüfung der »Fresnellinsen-Theorie«, zunächst Beugung der für die Bildentstehung wesentliche Effekt. Deshalb berücksichtigten wir lange nicht, dass das Licht innerhalb der Scheibe auch gebrochen wird.

Erst als sich später die Argumente gegen die Erklärung mit Hilfe der Lichtbeugung häuften und es immer schwieriger wurde, diese aufrecht zu erhalten, befassten wir uns ernsthaft mit dem Einfluss der Lichtbrechung auf das Phänomen. Am Ende verdrängte die Brechung die Beugung in unserer Argumentation völlig, weil wir uns mit ihr alle wesentlichen Aspekte der Bildentstehung erklären,

bzw. sie simulieren konnten. Die bei weißem Licht manchmal deutlich zu Tage tretenden Farberscheinungen traten deshalb für uns in den Hintergrund, obwohl sie am Anfang unserer Überlegungen eine große Rolle gespielt hatten.

Da die Farberscheinungen sicher zum größten Teil auf Beugungseffekten beruhen und sie oft so auffällig sind, dass sie in offenen Experimentiersituationen leicht die Aufmerksamkeit auf sich lenken können, seien hier noch kurz einige Effekte aufgezählt, die uns, über den »Farbfehler« bei der Brennlinie hinaus, beim Experimentieren aufgefallen sind:

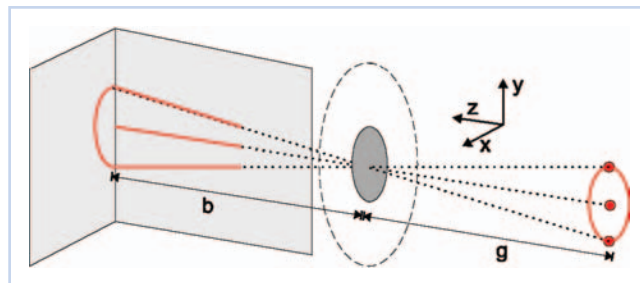


Abb. 12. Die CD wird von einer Ringleuchte beleuchtet. Die Bildlinien liegen auf dem Mantel eines Kegelstumpfs.

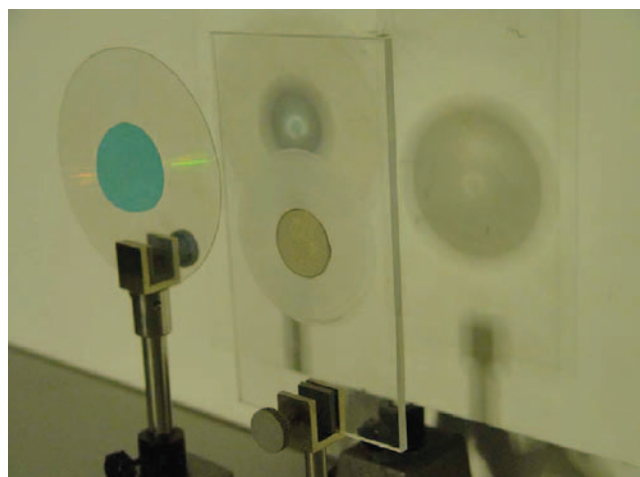


Abb. 13. Abbildung einer Ringleuchte durch eine CD und eine kreisförmig angeschliffene Plexiglasplatte. Die Abstände betragen $g = 150 \text{ cm}$ und $b = 9, 5 \text{ cm}$.

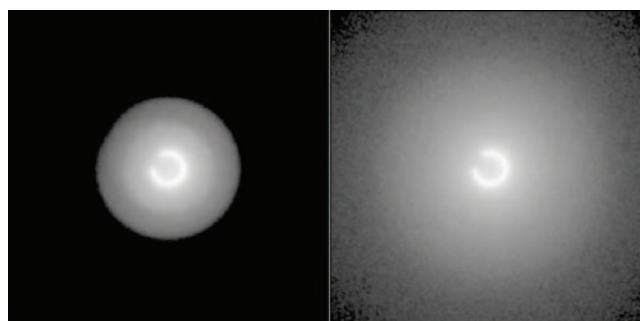


Abb. 14. Simulation der Abbildung einer Ringleuchte. Die Abstände sind dieselben wie in Abb. 13. Das linke Bild zeigt die Rechnung mit einheitlichem Spitzenwinkel der Prismen (CD). Bei der Plexiglasplatte (rechts) wurde eine statistische Streuung des Spitzenwinkels um $\pm 30^\circ$ zugelassen.

- Betrachtet man die CD im reflektierten oder im durchscheinenden Licht einer Punktlichtquelle, dann beobachtet man intensive Spektren, die unter bestimmten Umständen perfekte Kreisform annehmen (Abb. 15). Das Spektrum ist außen rot, innen blau und violett. Das rote Licht wird also stärker abgelenkt: Beugung!
- Bei der Abbildung der Ringleuchte tauchen manchmal deutlich sichtbare Farbränder auf.
- Im »Hof« um die Brennnlinie lässt sich eine radiale Struktur nicht übersehen.
- Manchmal beobachtet man auch, neben Lichtschwertern [9, 2], ein azimutales Spektrum.

Wir erklären uns den Farbverlauf bei der Brennnlinie und die Farbfehler bei der Abbildung der Ringleuchte als Beugungseffekte, die sich dem durch Brechung entstandenen Bild überlagern. Allerdings haben unsere Versuche, solche Farbeffekte in der Simulation durch Überlagerung beider Effekte zu erzeugen, noch nicht zu überzeugenden Ergebnissen geführt. Das mag ein Hinweis darauf sein, dass wir das Zusammenspiel der drei prinzipiellen Effekte noch nicht bei allen Phänomenen völlig verstanden haben.

9 Zusammenfassung unseres Erkenntnisprozesses

In Abschnitt 7 waren wir in der Lage, das Prinzip der Bildentstehung bei CD und zerkratzter Scheibe mit wenigen Sätzen zu beschreiben. Allerdings mussten wir einen langen Weg zurücklegen, um zu den entsprechenden Erkenntnissen zu gelangen. Unser Erkenntnisprozess war dabei von vielen Irrwegen und Sackgassen geprägt. Diese Irrwege waren jedoch ein wichtiger Teil unserer experimentellen Tätigkeit, denn sie forderten uns zu Besinnung, zu Kreativität und forschender Tätigkeit heraus, indem sie uns zwangen, unsere Vorstellungen immer wieder neu zu reflektieren, neue Erklärungsansätze zu finden und Experimente zu ersinnen, mit denen diese bestätigt oder widerlegt werden konnten.

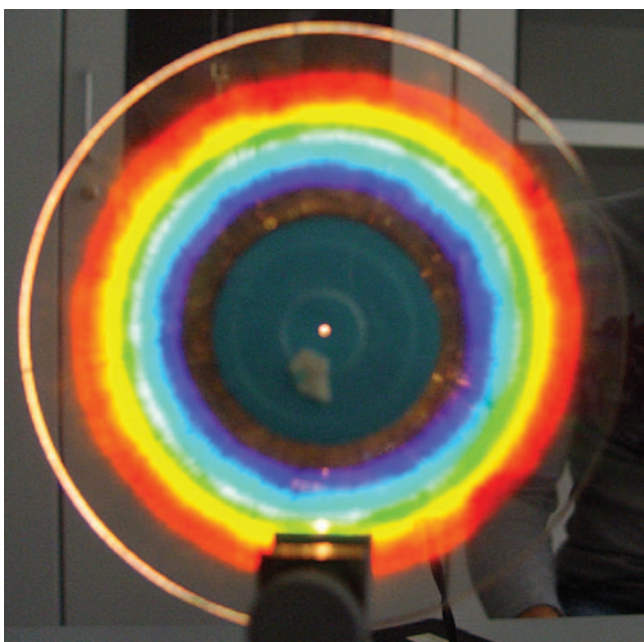


Abb. 15. Beugungsspektrum im durchscheinenden Licht

Insbesondere gerieten wir in eine außerordentliche Situation, als wir durch den Fehlschlag mit der Simulation und durch das »Auftauchen« der zerkratzten Scheibe gezwungen wurden, von der Beugungs- zur Brechungserklärung überzugehen. Bei diesem »Paradigmenwechsel« haben wir am eigenen Leibe erfahren, dass in der Regel gewisse Grundvorstellungen über die Theorie eines Phänomens bereits existieren, bevor mit einer Untersuchung begonnen wird. Diese Vorstellungen prägen, besonders im Anfangsstadium, das experimentelle Vorgehen in hohem Maße. Als experimentierender Forscher sollte man sich über diese Vorvorstellungen Klarheit verschaffen und gleichzeitig den Mut besitzen, sie in Frage zu stellen. Denn manchmal entsteht genau dabei ein hohes Maß an theoretischer und experimenteller Erkenntnis.

10 Anhang: Technische Daten einer CD-R

Ein CD-Rohling besitzt eine spiralförmige Führungsrille mit trapezförmigem Querschnitt, deren Kanten einen Neigungswinkel von 50° besitzen [11]. Diese Führungsrille ist eingebettet in einen durchsichtigen Plastikträger aus Polycharbonat (Brechungsindex $n = 1,54$). Auf diese Schicht ist die für die Informationsspeicherung wichtige Dye-Schicht aus Phthalocyanin aufgebracht, die im Vergleich zur Polycharbonat-Schicht sehr dünn ist. Wir vernachlässigen sie in allen Betrachtungen dieses Aufsatzes.

Darauf folgen eine Metallschicht zur Reflexion und eine äußere Schutzschicht, die beide bei unserem Exemplar fehlen, da die CD transparent ist. Die obere Kante der Führungsrille hat eine Breite von $b = 700 \text{ nm}$. Wir betrachten die Rille näherungsweise als ein System konzentrischer Ringe mit konstantem Abstand und trapezförmigem Querschnitt. Der beschreibbare Bereich der CD hat einen Außendurchmesser von 12 cm und einen Innendurchmesser von 4,6 cm. Daraus ergibt sich die Breite des beschreibbaren Bereiches zu 3,7 cm.

Die Gitterkonstante g , der Abstand benachbarter Rillen, beträgt etwa $1,6 \mu\text{m}$. Er kann aus der Spieldauer einer Audio-CD und der Abtastgeschwindigkeit $v = 1,25 \text{ m/s}$ berechnet werden. Experimentell kann er durch Beugung von Laserlicht und Messung des Ablenkwinkels des 1. Maximums bestimmt werden [5, 1].

Literatur

- [1] M.-CHR. GIESEKE – D. HAUBROCK: Physik und Compact Discs – Zwei unterschiedliche Beispiele zur Einbeziehung des Alltagsgegenstands CD in den Physikunterricht. – Praxis der Naturwissenschaften/Physik, **48** (1999) Nr. 6, S. 17.
- [2] G. HACKER: Eine überraschende Beobachtung an einer CD. – Vorträge der DPG 1998 in Lohmanns-Media: Berlin 1998, S. 386.
- [3] E. HECHT: Optik. – München: Oldenbourg 2005.
- [4] B. WOOLNOUGH: Exercises, investigation and experiences. – Phys. Educ. **18** (1983).
- [5] J. E. KETTLER: The compact disc as a diffraction grating. – Am. J. Phys. **59** (1990) Nr. 4, S. 367.
- [6] P. A. KIRSCHNER: Epistemology, practical work and academic skills in science education. – Science and Education **1** (1992) 273.
- [7] T. S. KUHN: Die Entstehung des Neuen: Studien zur Struktur der Wissenschaftsgeschichte. – Frankfurt a. M.: Suhrkamp 1977.

SCHULPRAXIS

- [8] V. N. LUNETTA: The school science laboratory: Historical perspectives and contexts for contemporary teaching– International Handarticle of Science Education Pt **1** (1998) 249.
- [9] H. J. SCHLICHTING: Das Schwert der Sonne. Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens. – MNU **51** (1998) Nr. 7, S. 387 und **52** (1999) Nr. 6, S. 330.
- [10] M. SUSSMAN: Elementary diffraction theory of zone plates. – Am. J. Phys. **28** (1960) Nr. 4, S. 394.
- [11] Technische Daten von CD Rohlängen entnommen aus: <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/com/0608021.htm>, Stand: 10/2007.
- [12] M. TESCH – R. DUIT: Experimentieren im Physikunterricht – Ergebnisse einer Videostudie. – ZfDN **10** (2004) 51.
- [13] D. HÖTTECKE – F. RIESS: Rekonstruktion der Vorstellungen von Physikstudierenden über die Natur der Naturwissenschaften. – Phy. Did. **1** (2006) Nr. 6, S. 1.
- [14] T. BRAUN – U. BACKHAUS: Entwicklung eines Laboratoriums für Offenes Experimentieren. – Vorträge auf der Frühjahrstagung der DPG in Kassel 2006.
- [15] D. HÖTTECKE: Was ist Naturwissenschaft? – Physikunterricht über die Natur der Naturwissenschaften. – Unterricht Physik **19** (2008) Nr. 13, S. 4.
- [16] M. HEIDELBERGER: Die Erweiterung der Wirklichkeit im Experiment. – In: M. HEIDELBERGER und F. STEINLE: Experimental Essays, Baden Baden: Nomos 1998.
- [17] http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ph/14/ep/einfuehrung/wellenoptik/interferenz2f.vlu/Page/vsc/de/ph/14/ep/einfuehrung/wellenoptik/i2_fresnel.vscml.html

Prof. Dr. UDO BACKHAUS lehrt seit vielen Jahren Didaktik der Physik. Seine physikbezogenen didaktischen Schwerpunkte liegen in den Bereichen Thermodynamik, nichtlineare Physik, Astronomie und Elementarisierung neuerer physikalischer Erkenntnisse. Seit 2001 ist er an der Universität Duisburg-Essen tätig.

THOMAS BRAUN ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand in der Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Er beschäftigt sich mit der physikalischen Analyse überraschender und komplexer Phänomene und deren Einsatz in offenen Experimentiersituationen.

*Anschrift:
Universität Duisburg-Essen,
Fachbereich Physik, Campus Essen,
45117 Essen*

