

Virtuelle Beugungsbilder am Gitter

Marc Müller*, Lutz-Helmut Schön[†]

*Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Physik, AG Didaktik der Physik
Newtonstraße 15, 12489 Berlin, marc.mueller@physik.hu-berlin.de;

[†]Humboldt-Universität zu Berlin, Humboldt Graduate School, Unter den Linden 6,
10099 Berlin, lutz.schoen@physik.hu-berlin.de

Kurzfassung

Beim Blick durch ausgedehnte Beugungsgitterfolien auf eine Kerzenflamme zeigt sich eine Reihe bunter Flammennebenbilder. Diese virtuellen Beugungsbilder liegen perspektivisch hinter der Folie. Ihre konkrete Lage ist u. a. vom Ort der Kerze, von der Gitterkonstanten der Folie und vom Standort des Beobachters abhängig. Im Beitrag wird die Lage solcher virtueller Beugungsbilder beschrieben. Zwei systematische Beobachtungen zeigen, dass sowohl eine Richtungs-, als auch eine Entfernungsbedingung erfüllt sein muss. Beide Bedingungen werden anschließend aus physikalischen Überlegungen abgeleitet und deren formale Vorhersagen mit den Beobachtungen verglichen.

1. Einleitung

Virtuelle Beugungsbilder spielen im Optik-Unterricht eher eine untergeordnete Rolle. Das mag daran liegen, dass sie im Grunde als bloße Nebeneffekte angesehen werden, die auftauchen, während das Eigentliche geschieht: Licht wird an mikroskopischen Strukturen gebeugt. Ein anderer Grund mag sein, dass Beugungserscheinungen zumeist mit Hilfe von Lasern bzw. Laserpointern demonstriert werden, was ihre Beobachtbarkeit von vornherein einschränkt: Virtuelle Beugungsbilder zu beobachten heißt, sie direkt anzuschauen, wovon bei Verwendung von Lasern tunlichst abzuraten ist.

Beide Gründe sind jedenfalls keine guten Gründe. Denn wo immer Licht gebeugt wird, erscheinen gleichzeitig auch virtuelle Beugungsbilder der Leuchte, sodass die Beugung des Lichtes ebenso als ein Nebeneffekt erklärt werden kann – wenngleich diese Vorstellung gewöhnungsbedürftig ist (siehe Zusammenfassung des Beitrags weiter unten). Mehr noch: Sie sind sogar häufiger anzutreffen als die bei Beugung von Laserlicht entstehenden reellen Bilder. Denn sie zeigen sich, wo immer entsprechende mikroskopische Strukturen vorliegen – an beschlagenen Glasscheiben, den Rillen einer CD, Wolken von Bärlappsporen etc. – und sobald durch diese Strukturen hindurch helle Objekte – Kerzenflamme, Lampe, Sonne etc. – betrachtet werden. Ob nun Laser in der Nähe sind oder nicht. Auch deswegen scheint eine Beschäftigung mit virtuellen Beugungsbildern lohnend zu sein.

Besonders eindrucksvolle virtuelle Beugungsbilder werden hinter Gitterfolien sichtbar: Alles, was sich hinter der Folie befindet, erscheint in geordneter Reihe vervielfacht und von mehr oder minder brei-



Abb.1: Blick durch eine Strichgitterfolie auf eine Kerze (ca. 1000 Strich je mm).

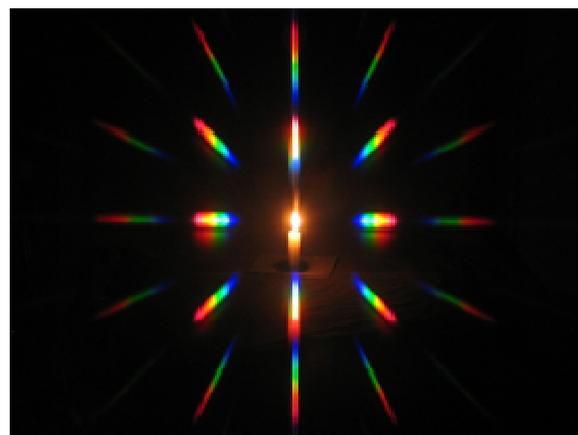


Abb.2: Blick durch eine Kreuzgitterfolie auf eine Kerze (ca. 200 Strich je mm).

ten, farbigen Rändern gesäumt. Die Abbildungen 1 und 2 zeigen dafür zwei Beispiele anhand eines Strichgitters und eines Kreuzgitters, hinter denen jeweils eine einzelne, brennende Kerze steht. Die

virtuellen, quasi überzähligen Bilder befinden sich alle perspektivisch hinter dem jeweiligen Gitter und mehr oder minder neben der jeweiligen Kerze. Wir nennen sie deswegen auch *Nebenbilder* (– diese Bezeichnung ist neutraler als die Bezeichnung „Beugungsbilder“ und eignet sich daher für Kontexte, in denen die Beobachtungen erst noch sorgfältig beschrieben anstatt vorausgreifend erklärt werden sollen).

In diesem Beitrag wird anhand zweier einfacher, systematischer Beobachtungen an einem großen Strichgitter versucht, Aufschluss über die genaue geometrische Lage der virtuellen Bilder zu gewinnen. Es zeigt sich dabei, dass diese durch die Erfüllung zweier geometrischer Bedingungen beschrieben werden kann. Die erste Bedingung, die hier *Richtungsbedingung* genannt wird, ist komplementär zur Beugungsbeziehung von Lichtstrahlen. Die zweite Bedingung, die hier *Entfernungsbedingung* genannt wird, leitet sich aus Verhältnissen des perspektivischen Sehens ab. Es wird außerdem versucht, einen Mangel eines früheren Beitrags zu beheben (vgl. [1]), wo die formale Ableitung der beiden Bedingungen aus physikalischen Argumenten noch nicht gelang.

Der Beitrag steht im Kontext anderer fachdidaktischer Arbeiten in Sinne einer „Optik der Bilder“ (vgl. z. B. [2] bis [6]).

2. Die Richtungsbedingung für die Lage der virtuellen Beugungsbilder

Wir benutzen große Gitterfolien im Format von 30 x 15 cm mit ca. 1000 Strichen je mm parallel zur kurzen Seite (erhältlich u. a. bei AstroMedia für ca. € 15, vgl. Abb. 1). Betrachtet man durch ein solches Gitter eine brennende Kerze und bewegt sich dabei etwas zur Seite, dann fällt schnell auf, dass die farbig gesäumten Nebenbilder der Kerze nicht ortsfest sind. D. h. der genaue Ort der virtuellen Beugungsbilder ist davon abhängig, von wo aus (bezogen auf Gitter und Kerze) sie beobachtet werden. Während eines Wechsels des Beobachterstandortes verschiebt sich die Lage der Nebenbilder z. T. dramatisch.

Die Abhängigkeit der Lage eines Nebenbildes vom Beobachterstandort hat zur Folge, dass sich bei einem Wechsel des Standortes sowohl die *Richtung*, in der ein Nebenbild gesehen wird, als auch seine *Entfernung* vom Gitter ändert. In einem ersten Schritt geht es darum, die Vielfalt der möglichen Blickrichtungen überschaubar zu machen.

2.1 Beobachtungen

Dazu wählten wir eines der Nebenbilder aus (hier: erste linke Ordnung), rückten vor dem Gitter in kleinen, recht arbiträren Abständen von links nach rechts und übertrugen die jeweils aktuelle Blickrichtung mit Hilfe eines unter dem Gitter geführten Fadens auf Papier (vgl. Abb. 3). Der Faden wurde für jeden der gewählten Beobachterstandorte so

gespannt, dass er vom Beobachter bzw. dem Stativ der Kamera her durch den gleichen farbigen Bereich der Kerzenflamme lief (hier: Grenze zwischen Gelb und Grün der Flamme). Entlang des Fadens wurde dann die Blickrichtung auf der Unterlage markiert. Arbeitet man zu zweit, ist das leicht zu bewerkstelligen.

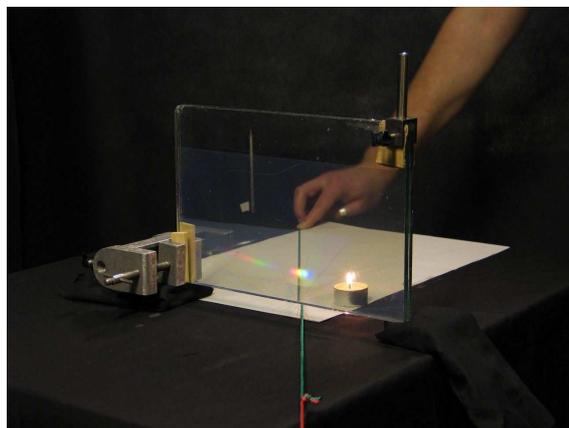


Abb.3: Aufbau zur Ermittlung einer Reihe möglicher Blickrichtungen, in denen das virtuelle Beugungsbild einer Kerze gesehen wird. Die Richtungen werden mit Hilfe der Schnur auf Papier übertragen.

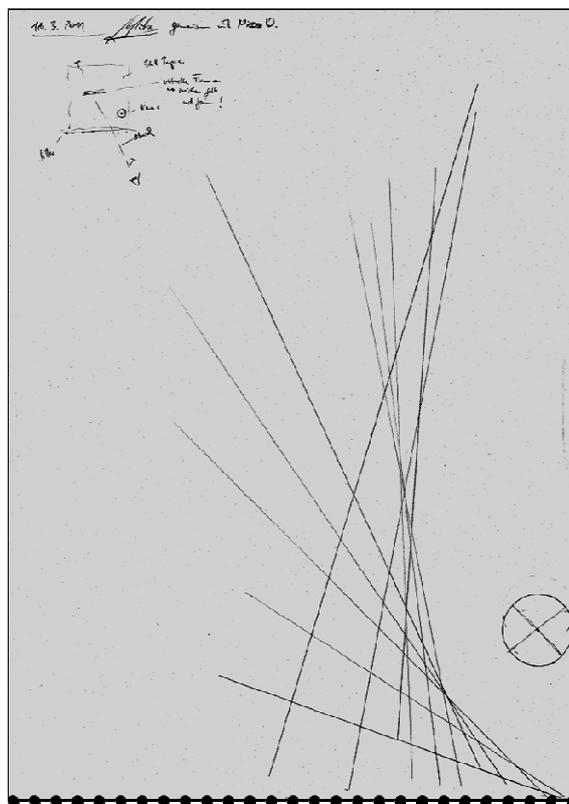


Abb.4: Zeichnung zur Beobachtung von Abb. 3: Einige mögliche Blickrichtungen, in denen das virtuelle Beugungsbild eines Teelichts (Kreis mit Kreuz) gesehen wird. Das Strichgitter stand an der unteren Kante.

Abbildung 4 zeigt die entstandene Zeichnung (original im Format A3). Das Gitter stand an der unteren kurzen Kante, der Kreis mit dem Kreuz kennzeichnet den Standort des Teelichtes.

Schon die wenigen, recht beliebig ausgewählten Blickrichtungen lassen vermuten, dass die gesamte Schar möglicher Blickrichtungen eine physikalisch ausgezeichnete Kurve einhüllen: eine virtuelle Beugungskautistik – ähnlich wie das an gekrümmten Spiegeln für die Katakautiken oder bei der Lichtbrechung an optisch unterschiedlich dichten Medien für die Diakautiken der Fall ist (vgl. z. B. [7]). Daher liegt die Vermutung nahe, die virtuellen Beugungsbilder würden sich auf dieser Kautistik befinden. Bevor dieser Vermutung nachgegangen wird, soll aber eine formale Beschreibung der Kurvenschar hergeleitet werden.

2.2. Formale Beschreibung der Situation

Da jede einzelne realisierte Blickrichtung auch in umgekehrter Richtung als einzelner ausgezeichneter Lichtweg aufgefasst werden kann, ist es möglich, von der bekannten Beziehung für die Beugung eines Laserslichtbündels am Gitter auszugehen.

Der einfachste Fall ist dabei ein senkrecht auf das Gitter strahlender Laser. Dabei wird das Lichtbündel nullter Ordnung am Gitter in verschiedene Bündel weiterer Ordnungen aufgefächert, von denen hier nur das vom Laser aus betrachtet linke Bündel erster Ordnung interessiert. Die entsprechende Beugungsbedingung, durch deren Erfüllung die Richtung des Bündels bestimmt wird, lautet, dass es zu konstruktiver Interferenz zwischen Strahlen kommt, die benachbarte Gitteröffnungen bzw. -stäbe passieren. Im Fall erster Ordnung müssen beide betreffenden Strahlen zueinander einen Lichtwegunterschied von gerade einer Basislänge λ aufweisen. Daraus ergibt sich die einfache Konstruktionsvorschrift (vgl. Abb. 5): Man schlage um G_0 einen Halbkreis mit dem Radius der Basislänge λ und fälle die Tangente vom benachbarten G_{-1} auf diesen Halbkreis. Die Verbindung zwischen G_0 und demjenigen Punkt, den Halbkreis und Tangente gemeinsam haben, gibt die gesuchte Richtung f_0 des gebeugten Lichtbündels erster Ordnung an.

Damit ist allerdings erst eine einzige Blickrichtung der Kurvenschar ermittelt. Die übrigen ergeben sich, wenn der eben benutzte Laser an die Stelle der Kerze gerückt und dort Stück für Stück gedreht wird. Anstatt senkrecht auf das Gitter zu leuchten, trifft er es dann schräg an den verschiedenen Gitterstellen G_i (vgl. Abb. 6). Zur Konstruktion der Richtungen der gebeugten Bündel f_i kann aber ebenso vorgegangen werden wie oben. Nur dass der Radius des Halbkreises vermindert werden muss. Denn die beiden Strahlen benachbarter Gitteröffnungen bzw. -stäbe besitzen hier bereits beim Erreichen des Gitters einen Lichtwegunterschied, der zusammen mit dem Lichtwegunterschied hinter dem Gitter wieder die

Basislänge λ ergeben muss. Zur Ermittlung dieses von λ abzuziehenden Wegstückes wird das Lot von G_{i-1} auf den Strahl von K durch G_i gefällt. Die Entfernung zwischen Lotpunkt und G_i ist das gesuchte, abzuziehende Wegstück.

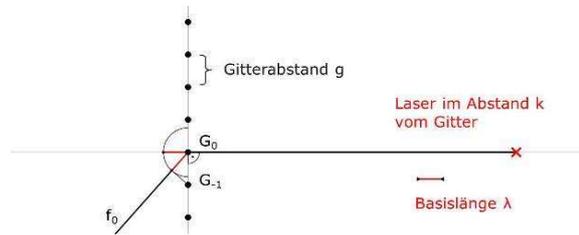


Abb.5: Konstruktion der Richtung, in der ein Laserlichtbündel erster Ordnung gebeugt wird, wenn der Laser senkrecht aufs Strichgitter strahlt.

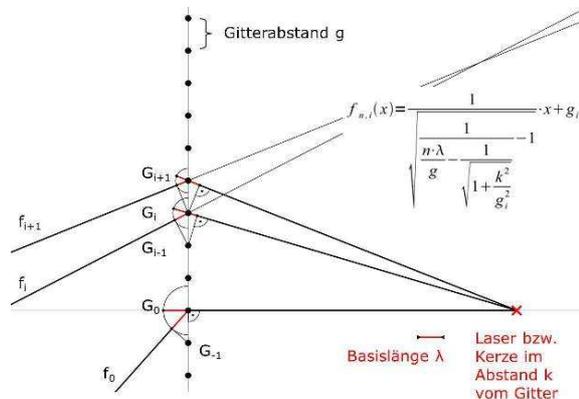


Abb.6: Konstruktion der Richtungen, in denen ein Laserlichtbündel erster Ordnung gebeugt wird, wenn der Laser beliebig schräg aufs Strichgitter strahlt – zugleich auch Konstruktion aller möglichen Richtungen, in denen ein virtuelles Kerzenbild erster Ordnung gesehen werden kann.

Somit kann die Konstruktion der gebeugten Lichtwege f_i für prinzipiell beliebige Stellen G_i des Gitters durchgeführt werden. Setzt man die Stelle G_0 in den Ursprung eines Koordinatensystems, stellt das Gitter entlang der Y-Achse auf und die Kerze bzw. den drehbar gedachten Laser an die Stelle K der X-Achse, ergibt sich zur Beschreibung der Kurvenschar die in den Abbildungen 6 und 7 angeführte Formel (der Parameter G_i heißt dort g_i).

Abbildung 7 zeigt einen Plot mit einer Reihe ausgewählter linearer Funktionen dieser Kurvenschar. Benachbarte Funktionen f_i entsprechen dabei allerdings nicht den Strahlenbündeln, die zu einzelnen, benachbarten Gitteröffnungen bzw. -stäben gehören. Der Gitterabstand g ist mit 1000 Strich je mm dafür viel zu winzig. Vielmehr wurden beliebige, aber fixe f_i mit ganzzahligem Parameter g_i ausgewählt.

Die linearen Funktionen f_i dieser Kurvenschar repräsentieren die Gesamtheit möglicher Blickrichtungen für den Blick auf das Nebenbild der Ordnung n einer

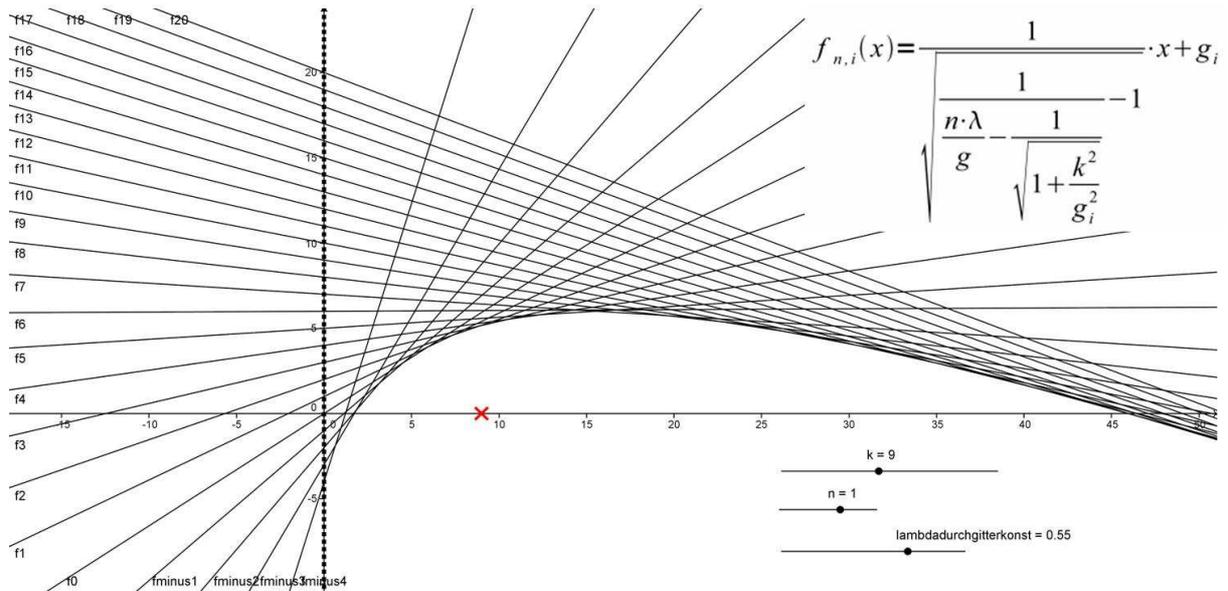


Abb.7: Ausgewählte Funktionen der Kurvenschar f_i , die die Gesamtheit möglicher Blickrichtungen auf das virtuelle Beugungsbild erster Ordnung repräsentieren (Objektort: rotes Kreuz). Die Kurvenschar f_i hüllt eine Beugungskausitik ein.

Variation des Parameters g_i ein – so als würde eine Verbindungslinie zwischen dem vor dem Gitter befindlichen Beobachterstandort und dem zugehörigen hinter dem Gitter befindlichen Standort des Nebenbildes gezogen und der Durchstoßpunkt G_i dieser Linie am Gitter markiert werden. Die Entfernung dieses Punktes vom Koordinatenursprung gibt den Parameter g_i .

Der Plot von Abbildung 7 wurde bereits für die Parameter der Situation aus Abbildung 3 bzw. 4 angefertigt. Abbildung 8 zeigt den Plot über die entsprechende Zeichnung gezogen. Beide stimmen sehr gut überein!

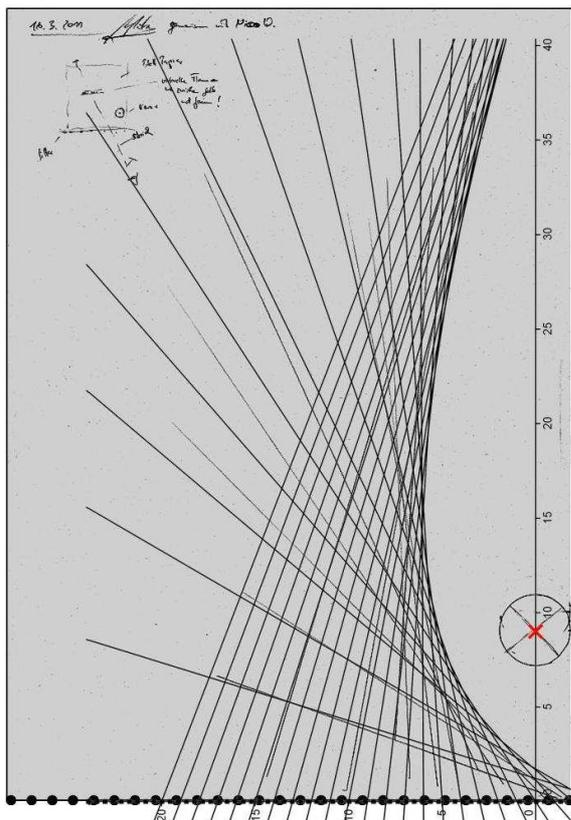


Abb.8: Der Plot aus Abb. 7 wurde über die Zeichnung von Abb. 4 gezogen.

3. Die Entfernungsbedingung für die Lage der virtuellen Beugungsbilder

Der Umstand, dass die Gesamtheit möglicher Blickrichtungen, die zu einem virtuellen Beugungsbild am Strichgitter gehören, eine Beugungskausitik einhüllt, legt die Vermutung nahe, dass sich die Beugungsbilder selbst auf dieser Kausitik befinden, d. h. dass sie für eine vor dem Gitter entlang wandernde, einäugig (!) schauende Beobachterin ihrerseits auf der Kausitik entlang wandern. Denn erstens ist es für das Sehen eines virtuellen Bildes nötig, ein vom virtuellen Objekt herkommendes, die Pupille durchmessendes Strahlenbündel auf der Netzhaut zu fokussieren. In unserm Fall müsste daher für jedes mögliche Strahlenbündel – d. h. für jeden möglichen Beobachterstandort – auf einen Ort auf bzw. nahe bei der Kausitik fokussiert werden (vgl. mit Abb. 7). In akkommodativer Hinsicht sollten die Nebenbilder also auf ihrer Kausitik oder wenigstens nahe bei ihr liegen. Eine solche Prüfbeobachtung, mit Hilfe derer auf die akkommodative Entfernung geschlossen werden kann, ist allerdings mit bloßem Auge in den meisten Fällen sehr schwierig. Aussagekräftiger wäre es, durch eine Kamera mit händisch regelbarer Scharfstellung zu beobachten.

Kerze (Basislänge λ), die im Abstand k hinter einem Strichgitter mit dem Gitterabstand g steht. Der Wechsel der Beobachterposition geht durch die

Davon unabhängig bietet sich aber zweitens noch eine andere Prüfbeobachtung an: Bei gewähltem Beobachterstandort kann durch leichtes horizontales Hin- und Herbewegen des Kopfes die parallaktische Entfernung abgeschätzt werden. Parallaktisch nahe Objekte „bleiben zurück“, d. h. sie wandern entgegen der eigenen Bewegungsrichtung aus dem Gesichtsfeld hinaus, während parallaktisch ferne Objekte „mitgehen“ bzw. im Gesichtsfeld, „stehen bleiben“ (vgl. [8]). Diese Prüfbeobachtung ist in aller Regel vertrauter als die erste und auch zuverlässiger. Abbildung 7 legt nahe, dass die Nebenbilder auch in parallaktischer Hinsicht auf der Kaustik bzw. nahe bei ihr gesehen werden sollten.

Verblüffend ist, dass zwar bei konzentrierter Durchführung der parallaktischen Prüfbeobachtung genau dieser Befund eintritt, dass die Nebenbilder aber ohne entsprechende Konzentration, also im entspannten Normalfall *nicht* auf der Kaustik gesehen werden! Diesem Umstand gilt der zweite Schritt, der mit einer weiteren systematischen Beobachtung einhergeht.

3.1. Beobachtungen

Dazu wählten wir wieder eines der Nebenbilder aus (hier: erste linke Ordnung) und rückten wieder in kleinen, recht arbiträren Abständen vor dem Gitter von links nach rechts. Diesmal bestand die Aufgabe aber darin, die Lage des Nebenbildes direkt abzuschätzen und auf das Papier zu übertragen (vgl. Abb. 9). Der Beobachter gab dabei einem Helfer Anweisungen, nach denen dieser ein zweites, nicht brennendes Teelicht genau an die Stelle des Nebenbildes setzen sollte (hier: Docht an der Grenze zwischen Rot und Orange des Flammenbildes). Diese Stelle wurde dann auf dem Papier markiert. Als Prüfbeobachtung, ob die Anweisungen erfolgreich ausgeführt wurden, galt dabei alles, wodurch ein rasches und intuitives Urteil gefällt werden konnte. D. h. allzu starke Konzentration sollte vermieden werden.

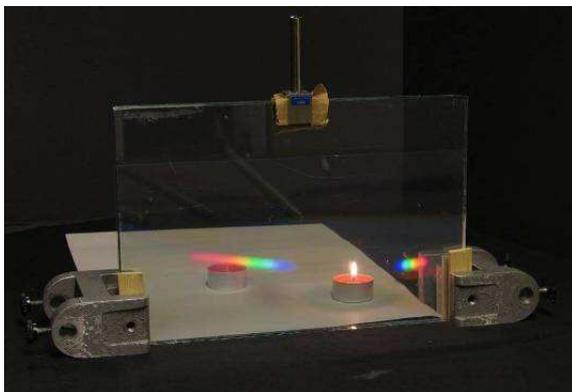


Abb.9: Aufbau zur Ermittlung der geometrischen Orte des Nebenbildes unter verschiedenen Blickwinkel auf das Gitter. Die Orte werden mit Hilfe der Prüfkerze auf Papier übertragen.

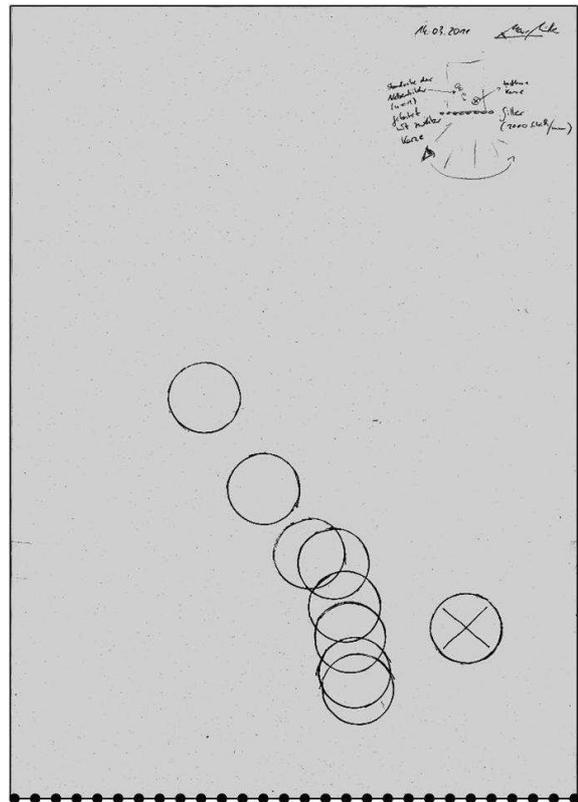


Abb.10: Zeichnung zur Beobachtung von Abb. 9: Einige mögliche virtuelle Bildorte (Kreise) eines Teelichts (Kreis mit Kreuz). Das Strichgitter stand an der unteren Kante.

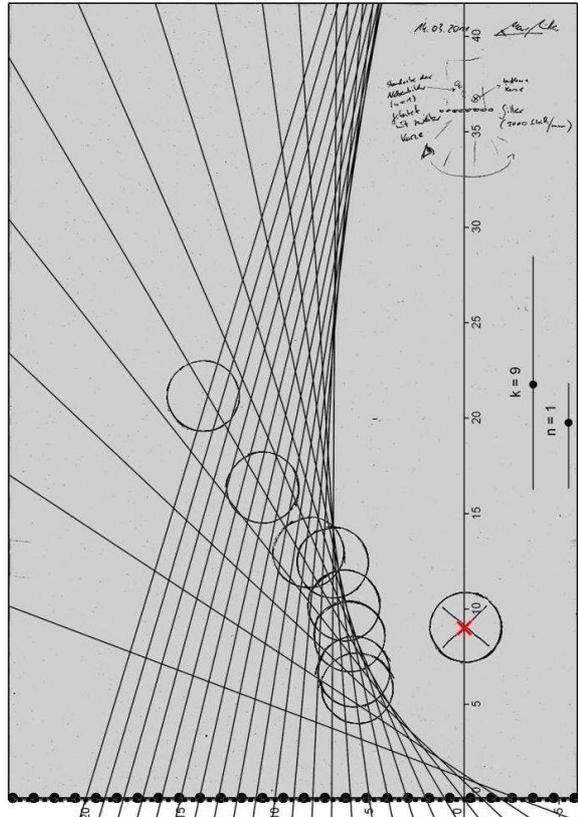


Abb.11: Der Plot aus Abb. 7 wurde über die Zeichnung von Abb. 10 gezogen. Die Kreise liegen nicht auf der Kaustik.

Abbildung 10 zeigt die entstandene Zeichnung (original im Format A3). Das Gitter stand wieder an der unteren kurzen Kante, der Kreis mit dem Kreuz markiert den Standort des brennenden Teelichts und die übrigen Kreise die verschiedenen Orte der Prüfkerze.

Schon die wenigen ausgewählten Fälle schüren Zweifel daran, dass das Nebenbild auf der Kaustik entlang gewandert ist. Deutlich zeigt sich das in Abbildung 11, wo der zugehörige Plot über die Zeichnung gezogen wurde. Die Kaustik wurde zwar gestreift, aber grundsätzlich ist die Erwartung von oben enttäuscht. Die *Richtungen*, in denen die Nebenbilder gesehen wurden, stimmen freilich mit den oben gefundenen überein – nur die *Entfernungen* hinter dem Gitter sind anderes als vermutet!

3.2. Formale Beschreibung der Situation

Allerdings mag die Durchführung des Versuches selbst Skepsis hervorrufen. Vielleicht ist die „intuitive“ Prüfbeobachtung einfach ungeeignet und der Befund daher wenig interessant. Es gibt aber ein physikalisches Argument dafür, diesem Befund doch zu trauen:

Abbildung 12 (oben) zeigt eine Übersicht der Situation. Neben der horizontal liegenden Tischfläche (grau) und dem auf ihr stehenden Gitter (transparentes Rechteck), sind dort ein Beobachterstandort vor dem Gitter (Mitte des roten Kreises) und eine Kerze hinter ihm (aufrechte, rote Linie) stilisiert abgebildet. Insgesamt vier Lichtwege, die von den Enden der Kerze zur Beobachterin führen, sind eingetragen. Zwei davon durchqueren das Gitter direkt und ungebeugt – sie stellen die perspektivischen Sichtverhältnisse der nullten Ordnung dar. Die beiden übrigen Lichtwege laufen von der Kerze her nicht direkt auf die Beobachterin zu, sondern „eigentlich“ rechts an ihr vorbei, knicken aufgrund der Beugung erster Ordnung aber am Gitter nach links ab und erreichen sie daher doch noch – diese Lichtwege stehen für die perspektivischen Sichtverhältnisse der ersten Ordnung (der zugehörige Anteil, der das Gitter ungebeugt durchquert, ist nicht dargestellt).

Der Verlauf des gebeugten Lichtweges, der an der Unterkante der Kerze beginnt, ist bereits oben ermittelt worden. Er liegt in einer zum Gitter senkrechten Ebene und erfüllt daher die Richtungsbedingung. Der Verlauf des gebeugten Lichtweges, der an der Oberkante der Kerze beginnt, könnte aber fragwürdig sein, da er in einer zur Horizontalen gekippten Ebene liegt. Weil die Striche des Gitters jedoch ausschließlich vertikal orientiert sind und somit das Abknicken der Lichtwege ausschließlich in der Horizontalen stattfinden kann, muss dieser Lichtweg trotz Beugung in konstantem Winkel zur Tischfläche verlaufen. Dadurch ergibt sich zwingend der eingetragene Weg.

Die Perspektive der Abbildung ist freilich eine unrealistische, denn während der Beobachterstandort von der Seite betrachtet wird, sind die optischen Ver-

hältnisse gerade so eingetragen, wie sie nur von diesem aus sichtbar sind und nicht etwa vom Betrachter der Abbildung her. Die Abbildung ist keine Art von stilisierter Fotografie! Die Darstellungsweise ist vielmehr eine Zwischenform von abgelöster und eingebundener Perspektive (– quasi eine abgelöste eingebundene Perspektive). Sie liegt letztlich auch den Abbildungen 4, 7 und 10 zu Grunde.

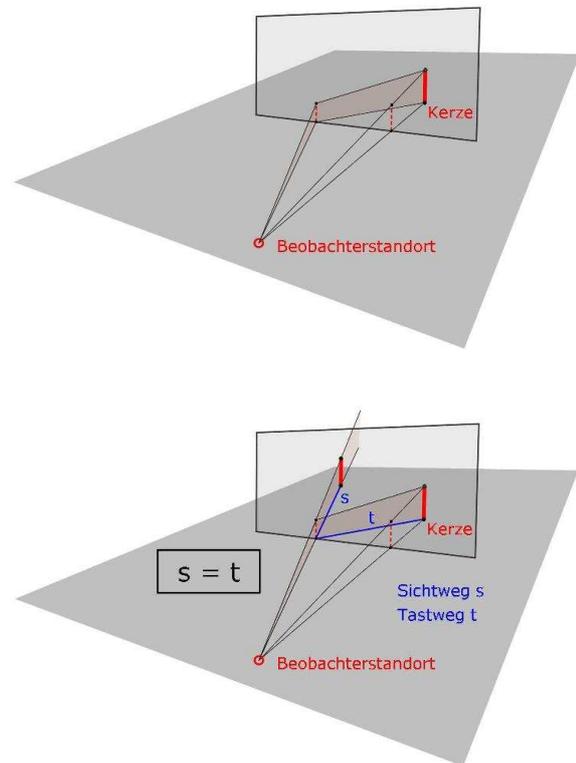


Abb.12: Zu den perspektivischen Verhältnissen im Sehraum hinter dem Strichgitter – unter der Voraussetzung, dass das virtuelle Beugungsbild als Bild einer vertrauten Kerze gesehen wird, muss es perspektivisch gleich groß wie die Kerze sein. Daraus folgt: Sichtweg und Tastweg sind gleich lang.

Wie lautet das versprochene physikalische Argument? Dazu müssen zuerst die eingetragenen Lichtwege als Sehwege bzw. Blickrichtungen umgedeutet werden. Für das Kerzenbild nullter Ordnung ist das unproblematisch; die Beobachterin sieht die Kerze genau dort, wo sie steht. Aber wo sieht sie das Bild erster Ordnung? Da Sehwege bzw. Blickrichtungen nicht abknicken, muss sie das Kerzenbild erster Ordnung in direkter Rückverlängerung hinter dem Gitter sehen – vgl. Abb. 12 (unten). Damit ist aber wieder nur die Blickrichtung festgelegt. Die eigentliche Frage lautet, *wie weit* hinter dem Gitter sieht sie das virtuelle Bild?

Das Kriterium, nach dem sie die Entfernung beurteilt, gibt ihr die Prüfbeobachtung vor. Diese bestand im Erfüllen folgender Aufgabe: „Platziere eine zweite Kerze genau dort, wo du das Nebenbild der ersten

sieht!“ An dieser Stelle taucht das physikalische Argument auf: Da die Prüfkerze von gleicher Art ist, wie die brennende Kerze (Größe, Höhe, Form etc.), und da sie genau in das virtuelle Nebenbild gerückt werden soll, muss sie zwingend dort zu liegen kommen, wo beide Ansichten *perspektivisch gleich groß* sind. D. h. die Prüfkerze steht zwingend genau so weit hinter dem Gitter (Sichtweg s), wie die brennende Kerze von der Durchblicksstelle des Gitters entfernt steht (Tastweg t) – vgl. Abbildung 12 (unten) und [1]. D. h. aber auch: Wann immer das virtuelle Beugungsbild der brennenden Kerze als das Bild einer echten, aus dem Alltag vertrauten Kerze gesehen wird – also im Normalfall! –, wird es dort gesehen, wo auch die Prüfkerze platziert wurde. Würde das virtuelle Objekt näher gesehen werden, schiene es verkleinert („Liliputismus“), würde es ferner gesehen werden, schiene es vergrößert („Gigantismus“). Kurzum: Im Normalfall ist der virtuelle Sichtweg s von gleicher Länge wie der Lichtweg bzw. Tastweg t .

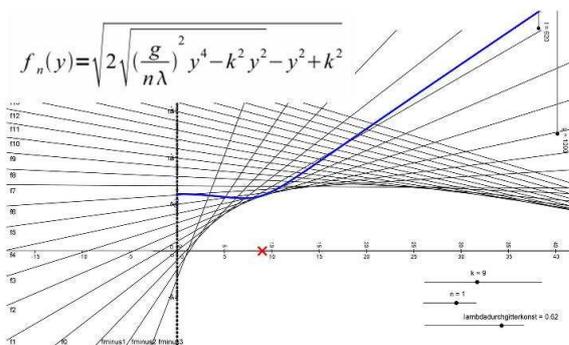
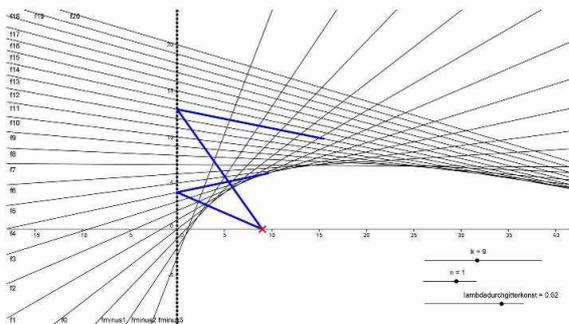


Abb.13: Wenn die Entfernungsbeziehung mit der Richtungsbeziehung kombiniert wird, zeigt sich, dass die virtuellen Bilder nicht zwingend auf der Kaustik liegen (oben). Es ergibt sich eine andere Kurve f_n , die die Gesamtheit ihrer möglichen Orte repräsentiert (unten).

In Abbildung 13 (oben) ist diese Beziehung für zwei ausgewählte Blickrichtungen eingetragen (blaue Linien). Es zeigt sich, dass der Ort des virtuellen Bildes nicht zwingend auf der Kaustik liegt. Die Entfernungsbeziehung lässt sich auch auf die gesamte Kurvenschar f_i anwenden, wodurch sich eine Kurve f_n ergibt, die die Gesamtheit aller möglichen Nebenbildorte der ausgewählten Ordnung n reprä-

sentiert. Diese Kurve ist als Plot in Abbildung 13 (unten) über den zugehörigen Plot der Blickrichtungen f_i gezogen. Ihre Formel ist gleichfalls angegeben. Beide Plots wurden bereits für die Parameter der Situation aus Abbildung 9 bzw. 10 angefertigt. Abbildung 14 zeigt die Kurve f_n über die entsprechende Zeichnung gezogen. Beide stimmen sehr gut überein!

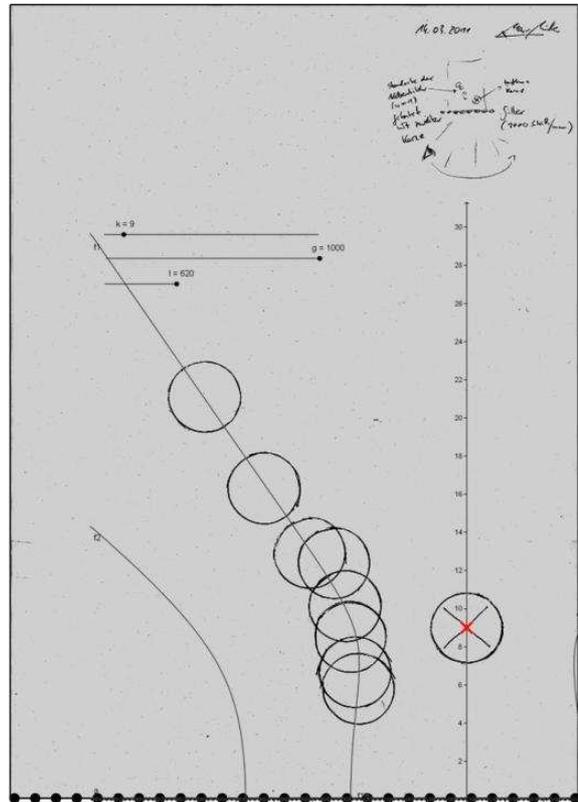


Abb.14: Der Plot aus Abb. 13 wurde über die Zeichnung von Abb. 10 gezogen.

4. Zusammenfassung

Den Ausgang der Untersuchungen bildeten virtuelle Beugungsbilder an Strichgittern wie in den Abbildungen 1 und 2. Es ging darum, die Lage dieser Bilder hinter den Gittern in Abhängigkeit vom Beobachterstandpunkt anzugeben.

4.1. Die Lage virtueller Beugungsbilder am Strichgitter

Zwei Bedingungen konnten gefunden werden, eine Richtungs- und eine Entfernungsbedingung.

Abbildung 15 zeigt, wie mit ihrer Hilfe die Lage eines virtuellen Beugungsbildes angegeben werden kann, wenn die Art des Gitters (Gitterabstand g), die Lage des fraglichen Objektes, dessen zugehörige Basislänge λ , die interessierende Nebenbildordnung n und der Beobachterstandort bekannt sind. Die Kurvenschar f_i für alle möglichen Blickrichtungen reduziert sich bei bekanntem Beobachterstandort wegen der oben besprochenen Konstruktionsvor-

schrift auf eine einzige Richtung, die die angegebene Winkelbeziehung (i) erfüllt (vgl. mit Abb. 6). Zusammen mit der Entfernungsbeziehung (ii) ergibt sich der gesuchte Ort (vgl. mit Abb. 13).

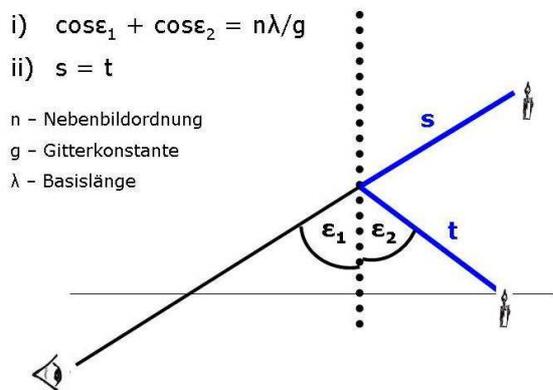


Abb.15: Bei bekanntem bzw. ausgewähltem Beobachterstandpunkt wird das virtuelle Beugungsbild an einem Ort gesehen, der mit Hilfe der geometrischen Beziehungen i) und ii) konstruiert werden kann. Die Beziehungen erfüllen die Richtungs- und die Entfernungsbedingung.

Bemerkenswert ist, dass die geschilderten Beobachtungsaufgaben, die zu den beiden aussagekräftigen Zeichnungen führten (Abb. 4 und 10), weder hohen Aufwand noch übermäßig genaues Arbeiten erfordern. Sie können auch von Laien gemeistert werden.

Die Entfernungsbeziehung (ii) besitzt außerdem eine verblüffende Eigenschaft: Sie ist weder von der Art des Gitters (Gitterabstand g), noch von der Basislänge λ , noch von der Nebenbildordnung abhängig. Deswegen ist es bei bekanntem Beobachterstandpunkt und bekannter Objektlage möglich, aus ihr eine Kurve abzuleiten, auf der *alle möglichen* Nebenbilder liegen müssen – gleich welcher Ordnung oder Farbe und für jede Art von Strichgitter! Die entsprechende Kurve hat die Form einer verallgemeinerten Konchoide (vgl. [1]).

Für ein Kreuzgitter gilt letztlich genau das gleiche. Denn es kann als Überlagerung zweier zueinander senkrecht orientierter Strichgitter angesehen werden (vgl. Abb. 2). Das vertikal orientierte Strichgitter gibt Nebenbilder in der Horizontalen und das horizontale in der Vertikalen. Wichtig (und womöglich unerwartet) ist dabei, dass beide Strichgitter nicht nur für Nebenbilder der tastbaren Kerze selbst, sondern auch für Nebenbilder der Nebenbilder des jeweils anderen Strichgitters sorgen. Das erklärt u. a. das Zustandekommen der Nebenbilder in der Diagonalen und ist ein weiterer Hinweis darauf, dass die virtuellen Beugungsbilder in optischer Hinsicht ebenso real sind, wie tastbare Objekte. Und: Die Vorhersage der Geometrie der Nebenbilder an einem Kreuzgitter, das von *nicht* senkrecht zueinander orientierten Strichgittern gebildet wird, ist nicht unbedingt trivial...

4.2. Virtuelle Beugungsbilder eines Lasers

In der Einleitung wurde angedeutet, dass die Beugungsmuster, die ein durch das Strichgitter leuchtender Laser auf einem Schirm erzeugt, als eine Art von Nebeneffekten virtueller Beugungsbilder aufgefasst werden können. Diesem Gedanken gilt der letzte Abschnitt.

Die Abbildung 16 zeigt einen solchen Laser hinter einem Strichgitter. Links neben dem Laser ist außerdem ein Nebenbild erster Ordnung des Lasers zu erkennen. Der tastbare Laser sorgt für den linken hellen Fleck auf dem Schirm, während sein virtuelles Beugungsbild für den rechten hellen Fleck sorgt.



Abb.16: Ein Laser und dessen virtuelles Beugungsbild erster Ordnung durchleuchten das Strichgitter.

Verallgemeinert heißt das: Die hellen Stellen eines Beugungsmusters auf einem Schirm sind genau diejenigen Stellen, von denen aus eine Beobachterin direkt in den Laser bzw. direkt in eines seiner virtuellen Beugungsbilder hineinschauen könnte (– was nachzuprüfen sie tunlichst vermeiden sollte). Wenn sie sich also bereits mit virtuellen Beugungsbildern auskennen sollte (z. B. mit denen von Kerzen), dann wird es für sie kaum verwunderlich sein, dass es solche Beugungsmuster überhaupt gibt. Sie könnte sogar sagen, diese Muster seien ja nur Nebeneffekte der virtuellen Bilder; auch am Spiegel funktionierten virtuelle Laser schließlich genauso wie tastbare. Sie wäre dazu sogar dann berechtigt, wenn sie nichts Genaueres darüber wüsste, wie diese Beugungsbilder zustande kommen. Denn alles, was sie mitbringen müsste, wäre eine gewisse Vertrautheit mit Gitterfolien und z. B. Kerzen. Der Grad dieser Vertrautheit ist vergleichbar mit demjenigen, der mit Hilfe des Spiegelraum-Konzeptes über ebene und gekrümmte Spiegel vermittelt werden soll [3]. In diesem Sinne haben wir an anderer Stelle auch von einem Gitterraum-Konzept gesprochen [1].

5. Literatur

- [1] MÜLLER, M.; SCHÖN, L.-H. (2009): Die geometrische Struktur des Gitterraums – Skizze eines ercheinungsorientierten Lehrgangs zur Beugung. In: Nordmeier, V.; Oberländer, A.

- (Hrsg.): Didaktik der Physik – Regensburg 2009. Berlin: Lehmanns Media.
- [2] MAIER, Georg (1986). Optik der Bilder. Dürnau.
- [3] SCHÖN, Lutz-Helmut (1994): Ein Blick in den Spiegel – Von der Wahrnehmung zur Physik. In: Physik in der Schule 32, 1, 2-5.
- [4] THEILMANN, Florian (2006): Wie kinematisch ist die Lichtgeschwindigkeit? In: Grebe-Ellis, J.;Theilmann, F. (Hrsg.): Open Eyes 2005. Tagungsband. Berlin: Logos.
- [5] SOMMER, W.; GREBE-ELLIS, J.; VOGT, J. (2004): Zur Beugung - Von einfachen Freihandversuchen über die Laue-Kegel zum reziproken Gitter und zur Ewald-Kugel. In: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule (Phy-Did) 3, 2, 67-86.
- [6] GREBE-ELLIS, Johannes (2005). Grundzüge einer Phänomenologie der Polarisation. Berlin: Logos.
- [7] MÜLLER, M.; GREBE-ELLIS, J. (2008): Kaustiken – Zur Bildentstehung an sphärischen Spiegeln. In: Nordmeier, V.; Oberländer, A. (Hrsg.): Didaktik der Physik – Berlin 2008. Berlin: Lehmanns Media.
- [8] v. MACKENSEN, M.; OHLENDORF, H.-C. (1998). Modellfreie Optik. Kassel.