

Die Beugung ab Newton

Helmut Nieke

Zusammenfassung

Newtons Auffassung der Beugung mit Teilchen wird beschrieben. Die Beugung wird in licht- und schattenseitig unterschieden und durch Hinweise auf zusätzliche Experimente ergänzt. Young und Fresnel konnten die Beugung mit Wellen berechnen, aber mit dem lichtelektrischen Effekt wurde 1887 die Teilchenauffassung gestützt. Aus der Farbenphotographie nach Lippmann (1891) wird geschlossen, dass der lichtelektrische Effekt nach Reflexion nur zeitweise auftritt im Abstand $\lambda/2$. Mit der periodischen Struktur der Photonen wird geschlossen, dass nach Reflexion das phasenverschoben zurückkehrende Feld vollständig zu seinem Photon zurückgekehrt sein muss, um einen lichtelektrischen Effekt zu erzeugen, es ist ein syntopisiertes Photon. Auch nach Beugung an Kanten kann das Photon und sein Feld eine Phasendifferenz erhalten. Dieses Model kann auf Ein- und Mehrstrahlinterferenzen übertragen werden.

Summary

Newton's view of diffraction with particles is described. Diffraction is differentiated in light- and shadow-side diffraction and supplemented with references to additional experiments. Young and Fresnel could calculate diffraction with the wave concept, but with the photoelectric effect 1887 was supported the particle view. Out of the colour photography by Lippmann (1891) is concluded that the photoelectric effect after reflection only takes place time restricted in distances of $\lambda/2$. With the periodic structure of electromagnetic photon is deduced, that after reflection the phase delayed field has completely returned to its photon to generate a photoelectric process, it is a syntoposized photon. Also after diffraction at edges photon and its field can get a phase difference. This model can also transferred to single- and multi-beam interferences.

1. Newton und Huygens

Newton wollte nur Erscheinungen mitteilen, Hypothesen wollte er nicht anstellen. Mit Postulaten suchte er eine mathematische Darstellung zu ermöglichen. Fremde Theorien und Hypothesen prüfte er sorgfältig, vermied aber in seinen beiden Büchern (Mathematical Principles und Opticks) die Mitteilung eigener. In Briefen und früheren Veröffentlichungen äußerte er sich z. B. etwa über einen alles durchdringenden Äther, den er zeitweise für die Ausbreitung der Gravitation in seine Überlegungen einbezog, und Licht sollte auch den Äther zu Vibrationen anregen. Diese überholten Überlegungen werden in dieser Arbeit nicht beachtet, es wird vor allem das III. Buch von Newton [1] benutzt, das die Beugung enthält, aber nur wenig der Fragen am Ende des Buches III.

Schematisiert ist allgemein bekannt der Streit: Newton Licht als Teilchen und Huygens Licht als Welle, aber den Streit trugen später die Nachfolger aus.

Newton hatte beobachtet, dass er mit einem kleinen Loch im Fensterladen von der Sonne einen Strahl ausblenden konnte, was eine Ausbreitung durch Stoßprozesse ausschließt, denn exzentrische Stöße hätten dieses Bündel schnell verbreitert, also blieb eine Ausbreitung durch Teilchen. Zur Demonstration der Beugung stellte er das Beugungsobjekt in diesem Bündel in einiger Entfernung vom Eingangsloch auf und beobachtete Beugungsstreifen zusammengefasst in Ordnungen seitwärts der Ausbreitung. Aber mit deren Deutung hatte er Schwierigkeiten.

Huygens [2] ging von einem ins Wasser geworfenen Stein erzeugten Wellen aus und verglich die weiträumige Umrundung eines Hindernisses mit der Beugung des Lichtes.

2. Die Beugung nach Newton und Fresnel

Während bei der Brechung (bei normaler Dispersion) das Blau am stärksten gebrochen wird, erfolgt bei der Beugung die stärkste Beugung bei rotem und die schwächste bei blauem Licht.

Das Prisma liefert ein Spektrum, bei der Beugung wird Licht in mehrere Ordnungen gespalten, das Spektrum tritt hier mehrfach auf. Die Beugung hängt, wie wir heute wissen, nicht vom Material der Kante ab, sondern nur von der Farbe des Lichtes und dem Abstand von der Kante.

Zu Beugungs- oder auch Brechungsversuchen muß ein schmales paralleles Bündel von weißem Licht auf das Beugungsobjekt oder Prisma fallen. Mit Sonnenlicht muss man dazu im Fensterladen der dunklen Kammer ein kleines Loch anbringen und in größerer Entfernung in diesem Strahlenbündel das Beugungsobjekt oder Prisma aufstellen, dahinter kann man dann die Beugungsfigur oder das Spektrum der Sonne auffangen. Die Bedingung für deren Sichtbarkeit wird im Abschnitt 5.1 gegeben. Anderenfalls sieht man keine eindeutige Beugungsfigur, oder etwa mit dem vor das Auge gehaltenen Prisma wie dies Goethe [3] tat, von einem weißen Körper die Mitte weiß und nur die Ränder bunt gestreift in den Farben des Spektrums. Goethe wollte alles sehen, er sah aber nur die Summen und keine Einzelheiten. Auch Newton benutzte das vor das Auge gehaltene Prisma, aber nur um die in der dunklen Kammer erzeugte Beugungsfigur genauer anzusehen.

Die Sonne erscheint uns unter einem Winkel von etwas über 30 Winkelminuten, also etwa ein halbes Winkelgrad. Maßgebend für die Auflösung ist aber der Winkel zum Loch im Fensterladen, also die Divergenz des einfallenden Lichtes. Zum Vergleich: bei normaler Sehschärfe trennt das menschliche Auge zwei Punkte im Abstand einer Winkelminute.

Die Beugung erfolgt licht- und schattenseitig unterschiedlich und wird getrennt betrachtet.

2.1. Lichtseitige Beugung

Lichtseitige Beugung - lichtseitig der Halbebene, äußere Beugungsstreifen beim Hindernis und innere beim Spalt - also maßgebend beeinflusst von einer Kante, dort fand Newton [1] III 4. Beobachtung bei paralleler Einstrahlung die Abstände der ersten drei Beugungsstreifen (Ordnungen) und ihrer Zwischenräume in einem Abstand proportional

$$1, \sqrt{1/2}, \sqrt{1/3}, \sqrt{1/4}, \sqrt{1/5},$$

also enger werdend. Dies ist nicht einfach periodisch, er konnte also noch nicht auf die Periodizität des Lichtes schließen.

Fresnel [4] fand die Abstände y der Ordnungen k der Beugungsstreifen nur mit der Wurzel der Entfernung wachsend wie

$$y = (k \lambda s')^{1/2}, \quad \text{allgemein} \quad y = [k \lambda s' (s + s') / s]^{1/2}$$

mit λ sog. Wellenlänge des Lichtes (neutral: Periodizitäts- oder Identitätsabstand), k die Ordnung der Beugung, s Abstand der Lichtquelle und s' Abstand der Auffangebene. Die Ordnungen sind zwar getrennt, aber nicht gebündelt, so dass in größeren Entfernungen das lichtseitig gebeugte Licht keine Rolle spielt.

Also bei lichtseitiger Beugung kann das Licht nicht geradlinig laufen. Newton [1] III Frage 3 spricht daher von aalartiger Bewegung des Lichtes, auch die Entstehung der Ordnungen begründet er so. Bei Fresnel ergibt sich die nicht geradlinige Bewegung aus mathematischen Ansätzen mit Wellen und nur davon spricht er. Lichtseitig gebeugtes Licht muss hier nicht nur eine, sondern mehrere oft vielfache Richtungsänderungen notwendig durchführen.

Newton [1], III 4. Beobachtung fand hinter einem Haar die 1. Ordnung erst in 1 Zoll und die 3. in etwa 3 Zoll Entfernung. Fresnel begann entsprechend die Mitteilung seiner Messergebnisse in etwa 10 cm, wo sie mit seiner Theorie hinreichend übereinstimmten. Nieke [5] Arbeit 3 bestätigte das mit Licht zu etwa 5 cm, Hiller u. Ramberg [6] mit Elektronen zu etwa $s' > 10^5 \lambda$.

2.2. Schattenseitige Beugung

Schattenseitig fällt bei der Halbebene die Intensität kontinuierlich ab. Beim Hindernis oder Spalt - innere Beugungsstreifen am Hindernis, äußere am Spalt - treten die schattenseitigen Beugungsstreifen erst in größeren Entfernungen auf, etwa bei $s' \approx d^2 / \lambda$, abhängig von deren Breite oder Weite d . Also hier sind zwei Kanten maßgebend. Diese Ordnungen, bei weißem Licht drei nicht überlappende Ordnungen, sonst auch mehr, haben dann jedoch gleiche Winkelabstände und wachsen proportional der Entfernung. Lichtteilchen oder Photonen laufen also hier in größeren Entfernungen, wenn die schattenseitige Beugung ausgeprägt ist, geradlinig. Dort wird in großen Entfernungen vom Spalt oder Hindernis für die Minima

$$\sin \alpha = k \lambda / d,$$

wo α der Beugungswinkel. Für Gitter gilt das für die Maxima mit d als Gitterkonstante.

Lichtteilchen oder Photonen laufen dann geradlinig, aber dies ist nicht auf kurze Entfernungen zu interpolieren. Erst hier ist die Erscheinung der Beugung in großen Entfernungen bezüglich des Beugungswinkel einfach periodisch. Das schattenseitig gebeugte Licht ist also gebündelt und spielt daher insbesondere am Gitter eine praktische Rolle.

Newton [1] III Beobachtung 6 stellte eine Aufspaltung der nullten Ordnung bei einem 0,0065 mm engen Spalt fest. Arndt u. Nieke [7] fanden die Aufspaltung nur während der Verengung des engen Spaltes, Struwer [8] bezeichnete dies als physiologischen Effekt.

Den Übergang innerer (lichtseitiger) zu äußeren (schattenseitigen) Beugungsfiguren am Spalt zeigte Newton [1] III 10. Beobachtung übersichtlich am Dreieckspalt. Das Übergangsbereich von inneren zu äußeren Beugungsstreifen am Spalt wird bei Newton nicht getrennt durchgehend gezeichnet und auch im Photo erscheint dieses Gebiet unscharf und diffus, auch bei monochromatischer Beleuchtung. Summarisch versuchte das Schwarzschild [9] durch hin- und herüber werfen von Lösungen zu berechnen, Malange u. Gronkowski [10] mit einem Computer Programm. Die lichtseitig nur von einer Kante des Spaltes beeinflussten Photonen formieren sich neu in diesem Übergangsbereich zu den schattenseitig gebeugten von zwei Kanten beeinflussen Photonen. Mit einem Hindernis ist das schwieriger oder gar nicht zu beobachten.

3. Die Beugung nach Fresnel und Fraunhofer

Die Autorität Newtons sorgte dafür, dass Newton (1643-1727) mit seiner Teilchentheorie anfangs anerkannt wurde. Young [11] und Fresnel [4] konnten ab etwa 1800 mit der Deutung der Beugungserscheinungen mit Wellen Erfolge erzielen, so dass sich die Deutung Licht als Welle durchsetzte. Das Huygenssche Prinzip wurde von Fresnel und späteren Bearbeitern formal nur für ein jeweils spezielles geeignetes Gebiet genutzt, die Ergebnisse sind brauchbare Näherungen der Beugungsexperimente für diese jeweiligen Fälle.

Newtons Beugungsexperimente wurden ab etwa 1850 nicht mehr beachtet, da er die Periodizität des Lichtes nicht begründen konnte, Nieke [12] berichtete darüber. Hall [13] schrieb ein Vorwort zu Newtons Optics, erwähnte Bd. III nur kurz aber lobend.

Fraunhofer [14] ordnete das Beugungsobjekt vor einem Fernrohrobjektiv an und beobachtete die Beugungsfigur in dessen Brennpunkt mit einem Okular. Das Fernrohr war auf die ferne Eingangsöffnung des Lichtes scharf eingestellt. So konnte er die Beugungsfigur erzeugen, die sonst ohne Optik schattenseitig nach 2.2 im Unendlichen zu beobachten ist. Die Divergenz des einfallenden Lichtes machte er extrem klein, er konnte so die unten im Abschnitt 5.1 genannte Divergenz-Winkelbedingung besonders gut erfüllen und die Beobachtung der dunklen Streifen im Sonnenspektrum genau durchführen.

Im Abschnitt 5.2 wird beschrieben, dass in der Fraunhoferschen Anordnung vor und auch hinter dem Brennpunkt des Fernrohres z. B. innere Beugungsstreifen des Spaltes auftreten, also Beugungserscheinungen, die sonst in kürzeren Entfernungen auftreten. Das Fernrohrobjektiv transformiert also die Beugung auf den Raum zwischen Objektiv und Brennpunkt und wiederholt dies dahinter.

Am Ende der hier betrachteten Zeit fand Lippmann [15] 1891 eine Farbphotographie, wo er eine feinkörnige Photoplatte auf Quecksilber legte und durch das Glas belichtete. Nur mit je einer Spektralfarbe erhielt er Schwärzungsstreifen im Abstand $\lambda/2$. Entsprechend der Anschauung dieser Zeit deutete man dies als stehende Wellen.

4. Die Entwicklung ab 1900

4.1. Der lichtelektrische Effekt

Die entscheidende Wende kam vor 1900 mit der Auswertung des lichtelektrischen Effektes durch Hertz 1887. Mit Lichtquanten wurde dies aber erst erklärt durch Lenard und Einstein. Man hätte jetzt Newtons Teilchentheorie anerkennen können als Quantennatur des Lichtes, aber nach wie vor wollte man die Periodizität des Lichtes nur mit Wellen erklären, Einstein mit der

Energie des Photons $E = h\nu$ genügen als Periodizität nicht. Bohr baute seine Quantentheorie auf eine dialektische Erklärung, den Dualismus von Welle und Teilchen auf, wobei er den Welle - Teilchen Dualismus als Komplementarität verallgemeinerte.

Jammer [16] und Murdoch [17] machten darauf aufmerksam, dass Bohr von der Religionsphilosophie Kierkegaards - [18] beeinflusst war, was auch in seine Quantenmechanik einging. Kierkegaards Religionsphilosophie wird 'qualitative Dialektik' genannt und dieser vertrat den Dualismus von Körper und Geist.

Die Methode der Dialektik wurde im Alten Griechenland entwickelt und bereits die Sophisten haben gezeigt, dass man mit der Dialektik (geschickt geführte Unterhaltung) alles, selbst die unmöglichsten Sachen, 'beweisen' kann. Damit wird ein Teil des menschliche Irrtums begründet. Physik und Philosophie oder Religion sind zu trennen in Erwartung des Fortschritts der Physik mit einem Strukturmodell, das alles selbst bringt..

Von der Wellentheorie wurde später aber nur deren Periodizität verwendet und nicht deren Energietransport durch Stoßprozesse. Nur zur Erklärung der Richtungsänderung des Lichtes, der Beugung an speziellen Stellen wurde das Huygenssche Prinzip angesetzt. Dies ist also nur als pragmatischer, mathematischer Trick zu werten. Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall und Licht unterscheiden sich um den Faktor 10^6 . Die Erscheinung der Polarisation des Lichtes erforderte eine transversale Schwingung, was einen steifen Äther verlangt, der nie befriedigend erklärt werden konnte und generell konnte nie ein Äther nachgewiesen werden. Licht erscheint an einem Punkt sofort, während nach der Wellentheorie dort erst die Energie an einem Punkt gesammelt werden müsste. Der Dualismus von Welle und Teilchen verhinderte bisher eine physikalische Begründung der Beugung mit Photonen. Also, wie schon Newton bemerkte: 'Niemals kann Licht eine Welle sein'.

4.2. Die Struktur des Photons

Dirac [19] folgerte aus der gleichen Beugungsfigur bei niedrigsten Intensitäten, wo jeweils nur ein Photon in der Apparatur sein konnte, die 'Interferenz des Photon mit sich selbst', was experimentell mehrfach bestätigt, aber nicht für die Interpretation der Beugung benutzt wurde. Jedes Photon muss also seinen Weg selbst finden, es bedarf dazu keines zweiten Photons.

Nach Broglie führt das Photon eine Führungswelle, was Born in Führungsfeld korrigierte.

Etwa 1960 wurde die Struktur der Elementarteilchen anerkannt, jedoch diese Struktur wurde nur zögerlich aufgenommen, denn es gab keine direkte Methode, um diese Struktur nachzuweisen, etwa wie die der Kristalle mit Röntgenstrahlen. Die Struktur der Elementarteilchen suchte man vorwiegend durch Zusammenstoß bei extrem hohen Geschwindigkeiten zu bestimmen. Beim Photon sind innere Rotationen zu suchen.

Heisenberg [20], der dies bald danach aufnahm, bezeichnete als Struktur des Photons: nebeneinander liegend Fermion und Antifermion mit Spin und Antispin. Das ist nach der Wirbeldynamik ein Wirbelpaar. Heisenberg hatte bei Sommerfeld über Wirbeldynamik promoviert, aber weder er noch Sommerfeld konnten die Wirbeldynamik mit der Quantenmechanik verknüpfen, daher begnügte sich Heisenberg mit einer formalen Bezeichnung der Struktur des Photons.

Sommerfeld [21] zeigte, dass sich Wellen- und Schrödinger-Gleichung nur durch zweiten und ersten Differentialquotient nach der Zeit unterscheiden. Sommerfeld [22] schrieb über die Wirbeldynamik: „Es ist eine sehr eigenartige Dynamik, die wir hier kennengelernt haben. Schon die lex prima von Newton ist hier abgeändert. Der isolierte, also kräftefreie Wirbel beharrt im Zustand der Ruhe. Der gleichförmig geradlinigen Bewegung ist er nur fähig im Verein mit einem zweiten Wirbel gleicher Stärke und entgegengesetztem Drehsinn. ... Noch bemerkenswerter ist der Unterschied in der lex sekunda. Die äußere Wirkung, die von einem zweiten Wirbel ausgeht, bestimmt hier nicht die Beschleunigung, sondern die Geschwindigkeit. ...“

Also Wirbeldynamik und Schrödinger-Gleichung befolgen die gleiche Abhängigkeit, nur die erste Ableitung nach der Zeit. Wie Schrödinger gezeigt hat, liefert seine Gleichung die gleichen Ergebnisse wie Heisenbergs Matrizen Mechanik. Die Grundlagen für den ersten oder zweiten Differentialquotient nach der Zeit sind weiterhin unklar.

Die Maxwell'schen Gleichungen lauten:

$$- \text{dB} / \text{dt} = \text{rot E} \quad \text{und} \quad \text{j} + \text{dD} / \text{dt} = \text{rot H}.$$

Der Operator rot E und H hängt also auch von der ersten Ableitung der Feldkomponenten in der Materie B und D nach der Zeit ab mit j als Stromdichte. Maxwell betrachtete Licht als elektromagnetische Störung. Auf die Analogie von elektromagnetischen Feldern und Wirbelfeldern wird oft hingewiesen. Für praktische Berechnungen wurde meist die zeitfreie Form verwendet, wo diese Unterschiede Schwingung oder Rotation verwischt sind.

Ein Wirbelpaar, also zwei entgegengerichtete Wirbel, haben die Symmetrie des Photons, treiben sich nach der Wirbeldynamik mit großer Geschwindigkeit gegenseitig geradlinig vorwärts und sind in Ruhe instabil. Die Achsen der Wirbel stehen senkrecht zur Laufrichtung, die transversale Rotation erfüllt also die Richtung der Polarisation des Lichtes.

Da das Photon ein elektromagnetisches Teilchen des elektromagnetischen Spektrums ist, hätte es mit der periodischen Struktur eines Wirbelpaares auch ein Feld. Bei einer Brechung, Reflexion, Streuung oder Beugung muss das zum Photon zurücklaufende Feld und das Wirbelpaar nicht gleichmäßig betroffen sein, sie können eine Phasendifferenz bekommen und diese Phasendifferenz kann eine Richtungsänderung bewirken. Die Interferenz des Photons mit sich selbst nach Dirac erfordert diese Möglichkeit. Bei der spontanen Emission wurde wegen der Spinerhaltung die Struktur des Photonpaares gefordert, aber das Wirbelpaar fordert das nicht, denn es hat bereits die richtige Symmetrie.

Das Elektron könnte danach die Struktur eines Wirbelzwillings haben, das sind zwei Wirbel gleichen Drehsinns, die sich gegenseitig kreisförmig umeinander treiben, der Wirbelzwillig ist in Ruhe stabil. Ohne Zusatzannahmen wird hier die Möglichkeit der Deutung von Ladung und magnetischem Moment gegeben. Aber warum das Elektron nur mit einer Frequenz stabil ist, darüber gibt die Wirbeldynamik keine Auskunft.

4.3. Folgerungen

Einstein [23] forderte statt des Dualismus von Welle und Korpuskel eine Verschmelzung von Welle und Teilchen.

Hund [24] schrieb: „Jedoch ist die Gründung der Quantentheorie auf den Dualismus Welle und Korpuskel ein voreingenommener Standpunkt, und man sollte sich dessen bewußt bleiben.“

Feynman [25] schrieb über den Dualismus von Welle und Teilchen: „Geben wir es auf. Wir sagen: Es ist wie keines von beiden.“

Aber das Problem besteht weiter, in dieser Arbeit wird es nicht aufgegeben, sondern versucht eine physikalische Erklärung von Photon mit periodischer Struktur und Feld durchzuführen,

5. Weitere Beugungsexperimente

Die mit Nieke [5] bezeichneten Experimente wurden nirgends zur Veröffentlichung angenommen, denn sie waren wie Newtons Beugungsexperimente, worüber Nieke [12] berichtete, nicht auch mit Wellen deutbar, wie es nach dem Dualismus von Welle und Teilchen sein sollte.

5.1. Die Divergenz-Winkelbedingung

Verdet [26] formulierte die Bedingung für scharf sichtbare Beugungsfiguren als Kohärenzbedingung $X \sin \varphi < \lambda/2$ mit X als Größe der Lichtquelle (oder des Beleuchtungsspalt) und φ den Winkel dazu. Nach Nieke [5] Arbeit 4 und schon beiläufig bei Arkadiew [27] und Berge [28] mit der Beugung am Doppelspalt kann man als 'Divergenz-Winkelbedingung' formulieren: „**Die Divergenz des einfallenden Lichtes muß kleiner sein als der Winkel zur aufzulösenden Beugung**“, also die Divergenz des einfallenden Lichtes wird gemäß Beugungsgesetz auf die Beugungsfigur als Unschärfe übertragen. Dies ist auch auf die Brechung zu übertragen, wenn entsprechend das Brechungsgesetz berücksichtigt wird.

5.2. Fraunhofersche Beugung

Nieke [5] Arbeit 4 zeigt auch, dass **in der Fraunhoferschen Beobachtungsart** nur im Brennpunkt des Objektivs die Beugungsfigur wie im Unendlichen entsteht, im Strahlengang davor und dahinter entstehen auch z. B die inneren (lichtseitigen) Beugungsstreifen des Spaltes.

Also **die Abbildung transformiert die Beugungsfiguren in Größe und Entfernung, und damit führt jedes Photon von der Kante aus sein volles Beugungsprogramm durch.**

Nieke [29] zeigte am Doppelspalt in der Fraunhoferschen Anordnung wenn die nullte Ordnung auf den Zwischenstreifen fiel und die erste oder höhere Ordnung jeweils auf die Spalte, dass die Beugungsfigur des Doppelspaltes auftritt, obwohl die Divergenz-Winkelbedingung nicht erfüllt war, denn die Ordnungen kommen nur aus einem engeren Bereich. Ganci [30] erreichte das auch mit streifendem Einfall der Beugungsfigur einer Halbebene.

5.3. Die Beugung in der Schlierenapparatur

Schon Grimaldi [31] berichtete über die leuchtende Kante, die man vom Schattenraum aus beobachtet. Das gebeugte Licht kommt nach Newton [1] III Beobachtung 5 von zwei zarten Streifen dicht neben der Kante und nach Young [11] direkt von den Kanten. Nieke [5] Arbeit 2 untersuchte das Spaltbild in der Schlierenapparatur nach Abbe (die Schlierenblende deckt das ungebeugte Licht ab). Er fand **von jeder Kante einen Doppelstreifen, ein Streifen innen und einen Streifen außen vom Kantenbild** im Auflicht, den dunklen Zwischenstreifen genau im Kantenbild. Bei einer Spaltweite von etwa 0,1 mm berühren sich die beiden inneren Teile der Doppelstreifen beider Kanten und **0,1 mm** ist auch die **Breite** eines Doppelstreifens. Der äußere Streifen scheint von der Kante zu kommen, er muss also seitlich versetzt sein. So stellten auch Brauer u. Fröhlich [32] eine Verbreiterung des Spaltbildes fest.

Das Babinetsche Prinzip fordert von Spalt und Hindernis gleicher Abmessung (komplementäre Schirme) in gleichen Entfernungen die gleiche Beugungsfigur, wenn man das direkte Licht ausnimmt. Da die Lichtwege unterschiedlich sind, ist das nicht selbstverständlich, aber die obige Arbeit zeigt in der Schlierenapparatur, dass das Licht in beiden Fällen von den entsprechenden Stellen zu kommen scheint.

5.4. Frequenzminderung gebeugten Lichtes

Nieke [5] Arbeit 6 berichtete von einer Frequenzminderung gebeugten Lichtes. Er untersuchte das Licht des mit einem Laser beleuchteten engen Spaltes hinter einer Lummer-Gehrcke Platte. Die Erniedrigung der Frequenz ist abhängig von Spaltweite, Ordnung und Frequenz des Lasers. Dabei erhielt er **keine Verschiebung der gesamten Linie, sondern nur eine Verbreiterung zur niedrig frequenten Seite**, besonders augenfällig war dies mit der Feinstruktur der blaugrünen Linie des Argon Lasers. Mit dem Auge ist die Frequenzminderung nicht zu bemerken. **Smekal [33] sagte diesen Effekt** schon in der Arbeit **voraus** in der er auch die Frequenzminderung und Frequenzerhöhung bei Bestrahlung von Molekülen als zusätzliche Streustrahlung voraussagte, wo Rotations- und Schwingungsenergie aufgenommen und abgegeben werden kann, was Raman experimentell bestätigte.

Man wird die Frage stellen, ob grundsätzlich jede Richtungsänderung des Lichtes mit einer Frequenzverminderung verbunden ist. Bei Brechung und Reflexion liegen keine Hinweise vor, die Frequenzverminderung wäre danach eine spezielle Eigenschaft der Beugung, wo die Energie der mehrfachen Richtungsänderungen vom Photon allein aufgebracht werden muss.

Als technische Anwendung könnte man das Auflösungsvermögen etwa des Mikroskops steigern, wenn es gelingt das frequenzverminderte Licht auszuschalten und die Abbildung nur mit dem unveränderten Licht durchzuführen.

Hubble [34] beobachtete im Licht außergalaktischer Nebel eine Rotverschiebung der (gesamten) Spektrallinien, die er als Doppler Effekt oder Alterung der Photonen deutete. Mit Kenntnis der Rotverschiebung bei der Beugung wird man hier eine Alterung der Photonen für wahrscheinlicher halten und einer Expansion des Weltalls kritisch gegenüber stehen.

5.5. Sonstige Experimente

Nieke [35] zeigte die Machschen Streifen an der bewegten Scheibe als physikalischen Effekt, als Beugung an bewegten Kanten. Die Farben der Benhamschen Scheibe konnte Nieke [36] nicht als physikalischen Effekt zeigen, es ist ein physiologischer Effekt.

Nieke [5] Arbeit 5 zeigte, dass hintereinander folgende Beugungen sich anders verhalten als mit ungebeugten Photonen, sowohl hinsichtlich Richtung als auch Intensität. Beim Doppelspalt erhielt er mit Zwischenabbildung bei Abdeckung eines Spaltbildes die Beugungsfigur des Doppelspaltes wenn der Weg der Zwischenabbildung lang genug war (Dezimeter).

Nieke [5] Arbeit 9 konnte mit Quecksilberlicht, rot an der einen Kante des Spaltes und blau an der anderen Seite bei lichtseitiger Beugung jeweils die Farbe an der Kante nachweisen, schattenseitig ist die Beugungsfigur doppelt belegt.

Nieke [5] Arbeit 10 bestrahlte schmale Spalte mit linear polarisiertem Licht. Die Gesamtintensität hinter dem Spalt war bei E-Vektor parallel dem Spalt etwa doppelt so groß als bei E-Vektor senkrecht zum Spalt, aber hohe Ordnungen und kleinste Spaltweiten waren stärker betroffen, die nullte Ordnung kaum. Mit rechts und links zirkular polarisiertem Licht am Doppelspalt konnten Fresnels Ergebnisse bestätigt werden, aber mit einem Polarisationsfilter vor der Filmebene entsprach die Beugungsfigur der des Doppelspaltes, wo bei Drehung des Polarisationsfilter die Streifen wanderten. Wurden die Spalte mit senkrecht zueinander polarisiertem Licht beleuchtet, brachte ein Polarisationsfilter vor der Filmebene nicht die Beugungsfigur des Doppelspaltes.

6. Deutung der Beugung mit Photonen

6.1. Die nur zeitliche Fähigkeit des Photons zum lichtelektrischen Effekt

Die Farbphotographie nach Lippmann [15] (1891) wurde bereits im 3. Abschnitt erwähnt. Lippmanns Farbenphotographie, Wienerscher Versuch und auch Holographie zeigen nach Reflexion am Quecksilber oder nach der Strahlungsteilung zur Erzeugung des Referenzstrahles nur Schwärzungen der Photoplatte in Abständen von $\lambda/2$, was man damals als stehende Welle deutete. Hertz entdeckte den lichtelektrischen Effekt bereits 1887, aber gedeutet mit Photonen wurde der Hertzsche Versuch erst später von Lenard und Einstein.

Für Sehvorgang und photographischen Prozess machen wir heute (im Laufe des 20. Jahrhunderts) den lichtelektrischen Effekt der Photonen maßgebend verantwortlich. Wir können daher aus den örtlichen Schwärzungen bei Lippmann folgern, dass hier Photonen nur zeitweise zum lichtelektrischen Effekt fähig sind. Da das Photon ein elektromagnetisches Teilchen ist, kann man folgern, dass deren Feld vollständig zum Photon zurückgekehrt sein muss, um zum lichtelektrischen Effekt fähig zu sein. Aber bereits das einfallende Photon muss vor der Reflexion im Voraus beeinflusst sein, denn sonst würden abweichende Schwärzungen stören. Der Vorgang der Reflexion von Photonen ist also neu zu betrachten.

Man wird fragen, ob das Photon nur nach dem Reflexionsprozess einen zeitabhängigen und damit auch ortsabhängigen lichtelektrischen Effekt ausführt oder ob dieses eine generelle Eigenschaft der Photonen ist. Dies ist experimentell zu prüfen. Dass Photozellen nur mit einem Wirkungsgrad zu etwa 20 % hergestellt werden können, könnte ein Hinweis darauf sein.

Weiter wäre zu erwarten, dass eine Anordnung der Photozellen nach dem Muster der Farbphotographie nach Lippmann deren Wirkungsgrad erhöhen kann. Für Solarzellen jedoch ist dies zweifelhaft, da das Lippmannsche Verfahren nur bei monochromatischem Licht erfolgreich war.

Konzept: Zeitabhängigkeit des lichtelektrischen Effektes.

Aus der Farbphotographie nach Lippmann wird zwangsweise gefolgert: Nach Reflexion erscheint der lichtelektrische Effekt nur zeitabhängig im Abstand $\lambda/2$. Also Licht löscht sich nicht aus, an diesen Stellen ist das Photon nicht zum lichtelektrischen Effekt fähig. Es ist experimentell zu untersuchen ob dies generell auch bei unbeeinflussten Photonen auftritt.

6.2. Die Struktur des Photons

Licht ist ein Teilgebiet der elektromagnetischen Strahlung, als elektromagnetisches Teilchen hat das Photon ein Feld. Seit 1960 sind Elementarteilchen mit Struktur denkbar. Wie in 4.2 beschrieben, liegt für das Photon insbesondere Heisenberg [20] mit einer formalen Struktur vor. Anschaulich ist das ein Wirbelpaar, aber da es Sommerfeld und Heisenberg nicht gelang die Wirbeldynamik an die Quantenmechanik anzuschließen, wurde dies nicht eingeführt. Aber das Photon hat nach Heisenberg einen Spin und einen Antispin und daher eine Struktur mit periodisch rotierenden oder wirbelnden Teilen.

Eine übersichtliche Erzeugung hat die Hertzsche Dipolstrahlung. Die Strahlung wird durch eine Wechselspannung erzeugt, deren Frequenz der Dipollänge angepasst ist. Im Fernfeld

könnten Teile von zwei entgegengerichteten Wirbeln einer Periode sich vereinigen und als Wirbelpaar ein Photon bilden. Aber für so niedrigere Energie der Quanten gibt es kein Material, das den lichtelektrischen Effekt zeigt (denn es ist zusätzlich die Ablösearbeit aufzubringen). So ist man auf den Nachweis der Strahlung durch elektromagnetische Induktion angewiesen und damit kann man keine Quanten nachweisen, sondern nur Felder.

Konzept: Die Struktur des Photons.

Das Photon ist ein elektromagnetisches Teilchen mit Feld, als wahrscheinliche Struktur wird das Wirbelpaar angenommen. Es ist periodisch mit einer Rotationsstruktur. Nach Reflexion erfolgt ein zeitabhängiger lichtelektrischer Effekt nur, wenn das Feld völlig zu seinem Photon zurückgelaufen ist.

6.3. Das Photon im Status der Beugung oder der Phasendifferenz

Die Ergebnisse der Farbphotographie nach Lippmann lassen sich vielleicht auf Newton [1] III Beob. 4 mit dem verzögerten Aufbau der Beugungsfigur bei der lichtseitigen Beugung im Abschnitt 2.1 übertragen. Nach Lippmann war der zeitabhängige lichtelektrische Effekt zwingend, für die Beugung ist er nur naheliegend.

Das Feld des Photons läuft nicht kugelförmig von diesem weg, sondern es läuft zu seinem Photon zurück, die Energie bleibt erhalten. Wir wissen aber nicht was ein Feld oder eine Kraft im Vakuum, 'ist', wie das schon Jodl [37] beschrieb, die Beschreibung bleibt nur formal.

Licht wird bei Passage in sehr kurzem (kleiner als einige mm) Abstand von jeder Kante je nach Farbe und Abstand von der Kante unterschiedlich gebeugt, aber es gibt kein einfaches Beugungsgesetz, alle bisherigen Beugungstheorien sind nur Näherungen für spezielle Fälle.

Wenn sich in der Nähe eines Punktes eine Kante befindet, so kann dort eine Beugung des Lichtes stattfinden – aber wenn sich dort keine Kante befindet, so läuft dort das Licht geradeaus weiter und wird nicht gebeugt. - Generell das Huygenssche Prinzip anzuwenden ist also für Licht unberechtigt und nur für Schall in der Atmosphäre berechtigt.

Passieren Photonen nahe einer Kante oder auch zweier Kanten, so wird ein Teil jedes Feldes abgedeckt oder zu einem Umweg gezwungen. Das Feld kann nach Beugung also nicht normal zum Photon (das mit der Lichtgeschwindigkeit läuft!) zurücklaufen, es ergibt sich eine Phasendifferenz zwischen dem Photon mit Struktur und seinem Feld.

Das Photon wird dann durch diese Behinderungen seines Feldes zum unruhigen Photon, die Phasendifferenz zwischen Feld und Photon bringt eine Unruhe in das Photon, es ist ein Photon im 'Status der Beugung'. Da ein solcher Zustand nicht nur bei der Beugung auftritt, ist es wahrscheinlich zweckmäßiger, dies als Photon im 'Status einer Phasendifferenz' zu bezeichnen. Das Photon kann reagieren mit zeitweiser Unfähigkeit zum lichtelektrischen Effekt, mit Richtungsänderung oder Frequenzminderung. Diese Phasendifferenz muss sich nicht beim ersten Rücklauf des Feldes ausgleichen sie kann dazu auch viele Rückläufe benötigen und so Richtungsänderungen bewirken, auch die Ordnungen können dadurch entstehen. Das Photon hat dann allein die Energie dazu zu liefern, denn von der Kante ist es dann entfernt. Ähnlich wie Born in 4.2 könnte man sagen, dass das Feld des eigenen Photons sein Photon führt. Das Feld muss die Ausdehnung von Spalt oder Hindernis haben, was für Elementarteilchen eine ungewöhnliche Ausdehnung wäre, aber das Feld hat diese Ausdehnung und nicht das Photon.

Dies entspricht der aalartigen Bewegung der Photonen nach Newton [1] III, Frage 3 bei der lichtseitigen Beugung in 2.1. Newton nahm Kräfte der Kante auf das Lichtteilchen an, was aber nicht erfolgreich war. Die Kanten verursachen nach dieser Auffassung eine Behinderung des Feldes, das unruhige Photon gibt dafür eine Erklärung: Photonen löschen sich danach nicht aus, sondern das Photon ist an diesen Stellen nicht zum lichtelektrischen Effekt fähig.

Young [12] nahm Interferenz von zwei Lichtstrahlen an, die von den Kanten als Wellen ausgingen. Sie können ersetzt werden durch ein Photon dessen Feld durch diese Kanten beeinflusst wurde und dann als Photon 'im Status der Beugung' mit seinem Feld wechselwirkt. Photon und Feld kann dann die von Young berechnete Phasendifferenz haben.

Fresnel konstruierte seine Zonen so, dass für jede Zone der Lichtweg um je $\lambda/2$ länger war, sie waren für spezielle s und s' berechnet. Er integrierte über eine Zone und stellte Phasendifferenzen fest, was sich auch auf das Photon mit Phasendifferenz übertragen lässt.

Konzept: Beugung.

Das Feld des Photons wird von nahen Kanten abgedeckt oder zu einem Umweg auf dem Rückweg zum Photon gezwungen. Es wird dadurch ein unruhiges Photon im ‘Zustand der Beugung oder Phasendifferenz’. Das unruhige Photon reagiert mit zeitabhängigem lichtelektrischen Effekt, Richtungsänderung oder Frequenzminderung. Photonen löschen sich nicht aus, sondern sind an diesen Stellen nicht zum lichtelektrischen Effekt fähig, oder Photonen sind so abgelenkt, dass dort kein Photon hin kommt (Ferne, Franhofer)

6.4. Das synchronisierte Photon

Mit Hilfe der stimulierten Emission ist es möglich synchronisierte Photonen zu erzeugen. Eine Emission von Photonen wurde für das von Bohr entworfene Atommodell abgeleitet. Das Atom wird vom Grundzustand in ein höheres Niveau angeregt. Abstrahlen kann es aber nur die zugehörige Eigenfrequenz (Spektrallinien) in einem Quantensprung, der kontinuierlich verläuft. Das wurde bisher als Wellenzug beschrieben, den das Atom aussendet. Die in diesem Rhythmus gebildeten Photonen werden abgestrahlt, sie können also Photonenkorrelationen bilden. Damit lässt sich die bisherige Deutung auf Photonen übertragen, die Photonen müssen hinter einander folgen, also einen Photonenzug bilden, die Photonen sind synchronisiert. Die Länge des Photonenzuges sollte der Kohärenzlänge entsprechen. Bei thermischer Emission folgen diese Wellenzüge in unregelmäßigen Abständen, man sprach von Photonenklumpen (photon bunching), denn die Photonenzüge können sich zeitlich überlagern.

Wenn Licht auf eine durchsichtige Platte fällt, so wird ein Teil der Strahlung reflektiert und der andere gebrochen durchgelassen. Die Anteile ergeben die Fresnelschen Formeln. Eine solche Strahlungsteilung erfolgt stets zu Beginn einer Interferenzmessung zur Längenmessung oder Brechzahlbestimmung, wo die beiden Strahlen am Ende wieder zusammengeführt werden. Mit Licht als Kontinuum, etwa als Welle, war die Teilung kein Problem, aber bei Teilchen kann das Teilchen nur entweder reflektiert oder durchgelassen werden. Newton [1] II, 3. Prop. XII-XX nahm bereits bei den Farben dünner Blättchen periodische Dispositionen der leichteren Reflexion oder des leichteren Durchgangs an. Beim Photon mit Struktur muss das Photon und sein Feld bei der Strahlungsteilung nicht gleichartig betroffen sein, Photon und sein Feld können auch getrennt werden und verschiedene Wege nehmen.

Der Photonenzug eröffnet die Möglichkeit, dass diese Photonen etwa abwechselnd reflektiert oder durchgelassen werden, zusammengeführt kann dies die volle Information ergeben oder bei Wegdifferenzen phasenverschobene oder unruhige Photonen ergeben.

Das Michelson Interferometer ist ein Beispiel für Einstrahlinterferenzen.

Beim Doppelspalt muss ein Teil des Feldes den anderen Spalt passieren, so lange die Ausdehnung des Feldes die des Doppelspalt übertrifft. Das Photon wird nicht geteilt, nur ein Teil des Feldes wird zum Rücklauf zu seinem Photon auf den anderen Weg gezwungen.

Konzept: Einzelstrahlinterferenzen.

Der Wellenzug eines Emissionprozesses kann durch den Photonenzug ersetzt werden. Die rhythmisch folgenden Photonen sind ‘synchronisiert’. Nach Strahlungsteilung (Trennung von Photon und seinem Feld) und zeitlicher Verschiebung wird bei Vereinigung die Fähigkeit zum lichtelektrischen Effekt gestört, es können dunkle Streifen entstehen.

6.5. Das syntoposierte Photon

Die zeitabhängige Fähigkeit zum lichtelektrischen Effekt nach Reflexion oder Strahlungsteilung zur Erzeugung des Referenzstrahles erfordert nach 6.3 eine Phasenverschiebung zwischen Photon und seinem Feld. Wenn dann das Feld der einlaufenden und reflektierten Photonen zum Photon zurückgelaufen und das Photon erst dann jeweils im Abstand $\lambda/2$ zum lichtelektrischen Effekt fähig ist, wird das als Schwärzung von der Photoplatte registriert mit der Reflexionsebene als Null- oder Ausgangspunkt. Die Photonen bilden eine geometrische (keine zeitliche) Front, sie sind als Mehrstrahlinterferenzen (an parallelen oder keilförmigen Platten, Interferenzen gleicher Neigung und Dicke, Newtonsche Ringe) ‘syntoposiert’.

Syntoposiert aus dem Griechischen: $\sigma\nu\nu$ = zusammen, gleichzeitig, $\tau\omicron\pi\omicron\sigma$ = Ort, Gegend.

Konzept: Vielstrahlinterferenzen.

Die durch Vielstrahlinterferenzen, Reflektion oder Strahlungsteilung monochromatischen Lichtes erzeugte Wellenfront wird ersetzt durch eine örtlich geometrische (keine zeitliche) Photonenfront. Dadurch erhalten ein- und auslaufende Photonen und ihr Feld eine Phasendifferenz und sind erst im Abstand $l/2$ zum lichtelektrischen Effekt fähig, sie sind 'syntoposiert'

6.6. Interferenzen

Interferenz ist aus dem Lateinischen abgeleitet: inter = zwischen, ferrare = tragen. Dies bedeutet nach Überlagerung also nicht unbedingt bleibende Wechselwirkung, nach Überkreuzung kann das ursprüngliche Licht erscheinen.

Interferenz und Beugung stellen unterschiedliche Anforderungen an ihre Sichtbarkeit.

Interferenz von Licht findet nicht vom Licht verschiedener Lichtquellen statt, auch nicht von verschiedenen Punkten der gleichen Lichtquelle. (Auch bei Fresnels Spiegel oder Biprisma).

Für Interferenz von Schall und Wasserwellen gilt diese Einschränkung nicht, zwei Stimmgabeln geben Interferenzen! Der Vergleich der Beugung in der Wellenwanne mit der mit Licht ist also nur begrenzt brauchbar, ja fraglich. Welle und Licht sind periodisch, unterscheiden sich aber grundsätzlich.

Bei der Beugung muss nur die Divergenz-Winkelbedingung 5.1 für alle Photonen erfüllt sein, dann wird die Beugung eines jeden Photons sichtbar, denn jedes Photon wird entsprechend Frequenz und Abstand zur Kante zu einem anderen Ort gebeugt, bei der Beugung mit weißem Licht erscheinen also getrennt Farben. Es gelten also nur die Voraussetzungen der syntoposierten Photonen. In den dunklen Streifen der Beugungsfigur muss sich Licht (früher 2 Wellen) nicht auslöschen, sondern das Photon kann dort entweder keinen lichtelektrischen Effekt ausführen (Nähe) oder dort kommt kein Photon hin, es ist abgelenkt (Ferne, oder nach Fraunhofer).

6.7. Sterninterferenzen

Im Sterninterferometer nach Michelson [38] können Interferenzen beobachtet werden, wenn zwei Spalte vor dem Objektiv eines Teleskops angeordnet werden, deren Abstand noch durch Spiegel vergrößert werden kann. Aus dem Verschwinden der Interferenz bei dem größten Abstand kann auf Sterndurchmesser oder Abstand von Doppelsternen geschlossen werden.

Einen Hinweis ergibt die Divergenz-Winkelbedingung in 5.1, wenn daraus eine Winkelabhängigkeit der Figur entsteht. Die Divergenz-Winkelbedingung ist hier extrem gut erfüllt, es genügen also geringe Winkelablenkungen. Die Anordnung entspricht der von Fraunhofer mit einem Doppelspalt als Beugungsobjekt, wo der Doppelspalt eine ungewöhnliche Größe hat, die Abmessungen sind für das Feld eines Photons ungewöhnlich, es sollten also Mehrstrahlinterferenzen auftreten. Die von den Spalten ausgeblendeten Bündel treffen im Bildpunkt des Sternes mit unterschiedlichen Winkel zusammen. Die geringe Divergenz des einfallenden Lichtes lässt große Spaltabstände zu, wenn das Teleskop hinreichend vergrößert. Damit lässt sich die Sterninterferenz mit der Abhängigkeit der Abbildung von der Divergenz des einfallenden Lichtes erklären, wobei die lichtelektrischen Effekte registriert werden.

In der Literatur wird dies mit der Photonenstatistik begründet. Die Photonenstatistik wertet das Eintreffen der Photonen aus. Der eben beschriebene unterschiedliche Einfluss der Divergenz des einfallenden Lichtes durch die beiden Bündel wirkt sich auch auf die Photonenstatistik aus und damit kann die Sterninterferenz auch nachgewiesen werden.

Es ist nicht alles über Beugung in Newtons Optik auch heute noch gültig, aber erstaunlich viel. Aber Newton konnte noch nicht die periodische Struktur der Lichtteilchen erwägen.

Herrn Dr. Thomas Nickol (Halle) danke ich für zahlreiche Diskussionen.

Anschrift des Verfassers: Dr. rer. nat. habil. H. Nieke, Ulmenweg 3, D-06120 Halle (Saale).

Literatur

- [1] I. Newton, Opticks or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light. 1704. Optik, Übers.W. Abendroth, Braunschweig 1983..
- [2] C. Huygens, Traité de la Lumière. Leiden 1690.
- [3] W. v. Goethe, Die Schriften zur Naturwissenschaften I. Abt: Band 5, Zur Farbenlehre, didaktischer Teil. Weimar 1955; Band 6 , Zur Farbenlehre, historischer Teil. Weimar 1957.
- [4] A. J. Fresnel, Oeuvre Complètes. Paris 1866.
Abhandlungen über die Beugung des Lichtes. Ostwalds Klassiker Nr. 215 Leipzig 1926.
- [5] H. Nieke, Newtons Beugungsexperimente und ihre Weiterführung. Halle 1997. Vorhanden in vielen Universitätsbibliotheken. www.gebeugtes-licht.de.
- [6] J. Hiller u. E. Ramberg, J. Appl, Phys. **18** (1947) 48.
- [7] H. Arndt u. H. Nieke, Z. Psychologie **193** (1985) 295.
- [8] R. H. Struwer, Isis **61** (1970) 188.
- [9] K. Schwarzschild, Math. Annalen **55** (1902) 177.
- [10] C. Malange u. J. Gronkowski, phys. stat. sol. (a) **85** (1984) 389.
- [11] T. Young, A course of lectures on natural philosophy and mechanical arts. London 1807.
- [12] H. Nieke, Die Folgen der Nichtbeachtung von Newtons Beugungsexperimenten. Sudhoffs Archiv **85** (2001) 1.
- [13] A. R. Hall, All was Light. An Introduction to Newtons Optics. New York 1993.
- [14] J. v. Fraunhofer, Gesammelte Schriften. München 1888.
- [15] G. J. Lippmann, C.R. **112** (1891) 274; **114** (1892) 961. (Nobelpreis 1908).
- [16] M. Jammer, The Conceptual Development of Quantum Mechanics. New York 1966.
Lecture notes in physics **100** (1979) 146. Berlin, Heid. New York. (Einstein Symp. Berlin)
- [17] D. Murdoch, Niels Bohr's Philosophy of Physics. Cambridge 1987.
- [18] H. Höffding, Sören Kierkegaard als Philosoph. Stuttgart 1896.
- [19] P. A. M. Dirac, Die Prinzipien der Quanten Mechanik. Leizig 1930.
The Principles of Quantum Mechanics. Oxford 1935, 1947, 1958.
- [20] W. Heisenberg, Introduction to Uniform Field Theory of Elementary Particles. New Jork 1966. Einführung in die einheitliche Feldtheorie der Elementareilchen. Stuttgart 1967.
- [21] A. Sommerfeld, Atombau und Spektrallinien Bd II. Braunschweig 1960. (I 1 5) – (I 6 9a)
- [22] A. Sommerfeld, Vorlesungen über theoretische Physik Bd II, Mechanik der deformierbaren Medien. Leipzig 1945. S. 155.
- [23] A. Einstein, Phys. Z. **18** (1917) 121.
- [23] F. Hund, Materie als Feld. Berlin, Göttingen, Heidelberg 1954.
- [25] R. P. Feynman, R. B. Lighton, M. Sands, Feynmans Vorlesungen über Physik. Bd II. Oldenburg, München–Wien, London 1971.
- [26] M. E. Verdet, Ann. Sci. L'Ecole Norm Super (Paris) **2** (1865) 291.
- [27] W. Arkadiew, Phys. Z. **14**(1913) 832.
- [28] E. Berge, Math. naturwiss. Unterricht **27** (1947) 326.
- [29] H. Nieke, Exp, Techn. Physik **31** (1983) 119.
- [30] S. Ganci, Am. J. Phys. **57** (1989) 370.
- [31] F. M. Grimaldi, Physico-mathesis de lumine, coloribus et iride. Bononiae 1665.
- [32] K. H. Brauer u. F. Fröhlich, Experim. Techn. Physik **6** (1958) 326.
- [33] A. Smekal, Naturwiss. **11** (1923) 973.
- [34] E. Hubble, The realm of nebula. London 1936. Das Reich der Nebel. Braunschweig 1938.
- [35] H. Nieke, Exp. Techn. Physik **31** (1983) 53.
- [36] H. Nieke, Z. Psychol. **194** (1986) 115.
- [37] H. Jodl, Felder. Studium Naturwissenschaften. Wiesbaden 1976.
- [38] A. A. Michelson a. F. G. Pease, Astrophysic. J. **53** (1951) 249.