

Versuch der Deutung der Newtonschen Beugungsexperimente

Helmut Nieke

Zusammenfassung

Durch Kombination von Heisenbergs Modell des Photons, Diracs Interferenz des Photons mit sich selbst, Broglies Führungsfeld und Sommerfelds unbewußten Beweis der Möglichkeit der Schrödinger-Gleichung als Formel der Wirbeldynamik wird eine Arbeitshypothese über den Mechanismus der Beugung gebildet. Mit Photonen mit der Struktur elektromagnetischer Wirbelpaare und Feld wird versucht deren Beugung als Richtungsänderung, infolge des behinderten Rücklaufes des Feldes gemäß der Wirbeldynamik, zu begründen. Damit sind die Newtonschen Beugungsexperimente erklärbar und die übliche unerlaubte und falsche Extrapolation der Beugungsformel für den Spalt auf die Spaltebene ist überflüssig.

Trial for Interpretation of Newton's Diffraction Experiments

Abstract

With combination of Heisenberg's structure of photons, Dirac's interference of Photon with itself, Broglie's guidance-field and Sommerfeld's unconscious proof that the Schrödinger-equation can be a formula of vortex-dynamics, a work-hypothesis for diffraction is formed. According to the vortex-dynamics the diffraction as change of direction of result of hindered returning field is tried to establish by photons with structure of electromagnetic-vortex pairs and their fields. With it Newton's diffraction experiments are explicable and the usual inadmissible and wrong extrapolation of the formula for diffraction at slit on the slit-plane is superfluous.

1. Historischen Entwicklung der Beugungsexperimente

Die Beugungsexperimente von Newton [1] und Fresnel [2] prüfte Nieke [3] nach. Newton teile seine Ergebnisse auch dort mit, wo er sie nicht erklären konnte. Wo Fresnel seine Meßergebnisse mitteilte, stimmen die Angaben, aber genau dort, wo sie seine Meßwerte die von ihm berechneten Grenzfälle nicht mehr hinreichend erfüllten, brach er die Mitteilung ab, ohne auf diese Diskrepanz hinzuweisen. Es ist aber nicht notwendig, daß jeder diese Experimente über die angegebenen Werte hinaus nachprüft, sondern es genügt die Extrapolation der Formel für die äußeren Beugungsstreifen des Spaltes auf die Spaltebene, die bei Nieke [3] diskutiert wurde, als unzulässig und falsch zu bestätigen. Diese folgen aus Newton's Beugungsexperimenten [1] III Beobachtung 5 und 10.

Newton [1] III Beobachtung 10 zeigte am Dreieckspalt die Umwandlung von inneren Beugungsstreifen (innerhalb und außerhalb der Schattengrenzen) zu äußeren Beugungsstreifen, die weder Fresnel noch später die Wellentheorie begründen konnte. Dann zeigte Newton [1] III Beobachtung 5, daß gebeugtes Licht nur aus der engen Umgebung jeder Kante kommt, was die Wellentheorie ebenfalls nicht bringt, denn danach sollte das gebeugte Licht vom gesamten Spalt kommen. Diese beiden Fakten, die die Wellentheorie nicht beschreiben konnte, bewogen die Lehrbuchautoren ab etwa 1850 die Newtonschen Beugungsexperimente zu verschweigen und die

Beugung auf die beiden Grenzfälle, Beugung an der Halbebene in nicht zu kleiner Entfernung und Beugung am Spalt in sehr großer Entfernung, zu beschränken. So kam es zu einer irreführenden Theorie der Beugung. Dies war nur möglich, da Newton und seine Nachfolger mit punktförmigen Lichtteilchen eine Beugung nicht begründen konnten, denn die Newtonsche Mechanik gab dazu keine Möglichkeit. Nieke [4] bis [8] führte die Newtonschen Beugungsexperimente weiter.

2. Historische Begründungen der Theorie der Beugung

Als etwa 1900 die Korpuskelstruktur des Lichtes bewiesen wurde, hätte man Newton eigentlich Recht geben müssen, denn er hatte behauptet, daß Licht niemals eine Welle sein könne. Aber an der Tatsache, daß mit (punktförmigen) Lichtteilchen, Lichtquanten oder Photonen die Beugung nicht zu begründen war, hatte sich nichts geändert. So suchte man beides philosophisch mit Hilfe der Hegelschen Dialektik mit These - Antithese - Synthese zu vereinen im Dualismus von Welle und Korpuskel.

Befürworter des Dualismus von Welle und Korpuskel betrachteten die Welle bzw. die Größe $(\Psi)^2$ als Wahrscheinlichkeit, im Volumenelement ein Korpuskel anzutreffen. Als Begründer dieser Interpretation gilt Born [9]. Auch Bohr [10] und [11] verwendete diese Auffassung, er ging noch weiter mit dem Dualismus als komplementäres Doppelantlitz der Wirklichkeit.

Die meisten, insbesondere die modernen Autoren, begnügen sich den Dualismus von Welle und Korpuskel als Tatsache zu betrachten. Als Beispiel sei hier Feynman [12] zitiert: „Newton dachte, das Licht bestehe aus Teilchen, doch dann entdeckte man, daß es sich wie eine Welle verhält. Später jedoch fand man, daß sich das Licht tatsächlich manchmal wie ein Teilchen verhält. ... In Wirklichkeit verhält es sich also weder wie das eine noch das andere. Geben wir es auf. Wir sagen: Es ist wie keines von beiden.“

Nach Broglie [13] führt die Welle als Führungswelle das Photon entsprechend der Wahrscheinlichkeit, ein Photon anzutreffen. Born [14] korrigierte schon Führungswelle in den allgemeineren Ausdruck Führungsfeld.

Das andere Extrem ist die konsequente Ablehnung des Dualismus. Der prominenteste Vertreter dieser Gruppe war Einstein [15], wobei dieser eine Verschmelzung von Welle und Korpuskel forderte. In einem Brief [16] an Schrödinger schrieb er 1928: „Die Heisenberg-Bohr'sche Beruhigungsphilosophie - oder Religion? - ist so fein ausgeheckt, daß sie dem Gläubigen einstweilen ein sanftes Ruhekissen liefert, von dem er nicht so leicht sich aufscheuchen läßt.“

Einzelheiten über die Diskussion zwischen Einstein und Bohr sind bei Jammer [17] und Bunge [18] referiert. Hund [19] schrieb: „Jedoch ist die Gründung der Quantentheorie auf den Dualismus von Welle und Korpuskel ein voreingenommener Standpunkt, und man sollte sich dessen bewußt bleiben.“ Schon Mach [20] hat gezeigt, daß alle Beugungs- und Interferenzexperimente nur die Periodizität des Lichtes beweisen und nicht die Welle, was man leicht nachprüfen kann.

Feynman [12] hatte also recht, wenn er schrieb, daß Licht sich weder wie eine Welle noch wie ein (massepunktförmiges) Teilchen verhält, es ist wie keines von beiden. Seine Folgerung: „Geben wir es auf“ ist jedoch schlecht, richtig wäre: „Wir geben nicht auf, sondern versuchen es indem wir wirklich die Gesamterscheinung betrachten und nicht nur einfache Grenzfälle.“ Das wird in dieser Arbeit versucht.

3. Ansätze für die Struktur von Photonen

Im vorigen Abschnitt wurde gezeigt, daß mit Photonen als Massepunkte die Beugung nicht erklärt werden konnte. Da ab etwa 1960, z. B. nach Hofstadter [21] eine Struktur für alle Elementarteilchen angenommen wird, so sollte dies auch für Photonen und Elektronen möglich sein. Für die Struktur der Photonen werden zwei Ansätze diskutiert:

a. Das linear polarisierte Photon als Basis

Heisenberg [22] gab als Struktur des linear polarisierten Photons nebeneinander liegend Fermion und Antifermion mit entgegengerichtetem Spin je $1/2$ als Isospin an, Hughston [23] bezeichnete dies als Twistorpaar. Nach Broglie [24] ist das Photon aus zwei Halbphotonen mit entgegengesetztem Spin zusammengesetzt.

b. Das zirkular polarisierte Photon als Basis

Um die Polarisation des Lichtes mit Photonen zu erklären, benutzten Christiansen [25], Shewadow [26] und schon ähnlich Nowak [27] das zirkular polarisierte Photon als Basis. Der elektrische Feldvektor rotiert senkrecht zur Ausbreitungsrichtung mit der Frequenz f , der E-Vektor beschreibt daher eine Schraube. Beim linear polarisierten Licht treten ein Rechts- und ein Linksphoton paarweise zusammen, so daß der resultierende Feldvektor in einer Ebene bleibt. So betrachtete Levitt [28] das linear polarisierte Photon als Doppelwendel. Deutsch [29] und Lennan [30] verbanden dieses Modell mit rotierenden Ladungen, was Cornals-Frau [31] diskutierte. Aber beim Photon wurden nie Ladungen nachgewiesen.

Beim Modell b mit dem zirkular polarisierten Photon ist aber die Umwandlung eines zirkular polarisierten Photons z. B. durch ein $\lambda/4$ -Plättchen in ein linear polarisiertes durch ein hinzutretendes Photon unwahrscheinlich, es wird daher die Variante a mit dem linear polarisierten Photon als Basis bevorzugt. Das linear polarisierte Photon hat in beiden Modellen die gleiche Struktur. Wird vom linear polarisierten Photon als Grundbaustein ausgegangen, entsteht das zirkular polarisierte Licht durch Rotation des gesamten Photons um die Ausbreitungsrichtung.

Hunter u. Wadlinger [32] betrachteten das Photon als oszillatorische zweigeteilte Zustände des elektromagnetischen Feldes, das als Soliton abgegrenzt ist, sie behielten aber die Bezeichnung „Wavicle“ bei. Honig [33] benutzte das Strahlungsfeld des Dipol nach Hertz, betrachtete jedoch nur $1/2$ Periode als Feld des Photons, das er als stationären toroidalen Wirbel kennzeichnete.

Da Heisenberg die Kopenhagener Deutung vertrat, also die Unanschaulichkeit bei Quantenprozessen, so unterlegte er seinem Modell keine anschauliche Deutung. Uhlenbeck u. Goudsmith [34] deuteten den Spin als Drehimpuls. Aber mit rotierenden starren Körpern konnte der Spin nicht richtig berechnet werden, deshalb betrachtete man den Spin in der Heisenberg-Bohrschen Quantentheorie als formale Spinquantenzahl.

Marshall [35] diskutierte Lokalität und Nichtlokalität in der Optik. Mit Kenntnis der Newtonschen Beugungsexperimente wäre die Lokalisierung mit dem Nachweis der Lokalisierung des gebeugten Lichtes bewiesen.

4. Arbeitshypothese für ein anschauliches Modell des Photons

Licht hat unbestritten seit Maxwell ein elektromagnetisches Feld. Seit Anfang dieses Jahrhunderts besteht Licht unbestritten aus Photonen, und so muß jedes Photon ein elektromagnetisches Feld haben. Die Maxwellschen Gleichungen fordern von veränderlichen Feldern, daß der Rotor der einen Feldkomponente sich wie die zeitliche Änderung der anderen verhält, das Feld muß stets ein Wirbelfeld sein. Nach Hertz [36] lösen sich im Dipolfeld geschlossene elektromagnetische Feldlinien in jeder Halbperiode als Strahlungsfeld ab.

Zur Klärung dieser Fragen ist die Wirbel- und die Elektrodynamik zu Rate zu ziehen. Die hierzu beste Darstellung über die Wirbeldynamik gab Sommerfeld [37]. Er schrieb: „Es ist eine sehr eigenartige Dynamik, die wir hier kennen gelernt haben. Sie weicht in entscheidenden Punkten von der Dynamik der Massenpunkte ab. 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 oder unter Einwirkung einer festen Wand. ... Noch bemerkenswerter ist der Unterschied in der *lex secunda*. Die äußere Einwirkung, die von einem zweiten Wirbel ausgeht, bestimmt hier nicht die Beschleunigung sondern die Geschwindigkeit.“ Die beiden Wirbel bewegen sich (man kann auch sagen, daß sie sich

gegenseitig vorwärts treiben) mit der Geschwindigkeit v (senkrecht zu a und den Wirbelachsen), wenn die Wirbelstärke μ (= halbe Zirkulation) und der Abstand der Wirbel a beträgt:

$$v = \mu / 2 \pi a. \quad (1)$$

Zwei Wirbel gleicher Stärke und entgegengerichtetem Drehsinn bezeichnet man als Wirbelpaar. Ein solches Wirbelpaar hat die Symmetrie eines Photons. Eine Drehung des Wirbelpaares um 180° um die Ausbreitungsrichtung ergibt das gleiche Wirbelpaar wie beim Licht die gleiche Polarisation.

Für den Fall, daß die Wirbelstärken nicht gleich sind, schrieb Sommerfeld [37]: „Zwei gerade Wirbelfäden beliebiger Stärke beschreiben Kreise um ihren gemeinsamen Schwerpunkt.“ Im Fall entgegengesetzten Drehsinns liegt der Schwerpunkt außerhalb der Verbindungslinie der Einzelschwerpunkte. Der Schwerpunktsatz ergibt dann

$$v_1 \mu_1 = v_2 \mu_2, \quad (2)$$

also unterschiedliche Geschwindigkeiten v_1 und v_2 und damit eine Schwenkung. Eine Unsymmetrie der beiden Wirbelstärken nach Gleichung (2) würde also eine Richtungsänderung bewirken.

Wie oben berichtet wurde, hat Heisenberg [22] bereits für das Modell des Photons nebeneinander liegend Fermion und Antifermion mit entgegengesetztem Spin vorgeschlagen. Wenn man die von Heisenberg vertretene Unanschaulichkeit bei Quantenprozessen aufgibt, ist dies die Struktur eines Wirbelpaares. Helmholtz [38] zeigte schon die Analogie von Wirbel- und Elektrodynamik, was Sommerfeld [39] in moderner Form referierte. Bei Übertragung auf die elektromagnetische Strahlung im Vakuum ist keine Reibung zu berücksichtigen.

Zur Einführung der Wirbeldynamik für das Heisenbergsche Modell des Photons gibt es aber noch ein weiteres Argument. Nach Sommerfeld [36] bestimmt, wie oben zitiert wurde, die äußere Einwirkung beim Wirbel nicht die Beschleunigung, sondern die Geschwindigkeit, Sommerfeld [40] beschrieb als wesentlichen Unterschied zwischen klassischer- und Schrödinger-Wellengleichung außer Faktoren nur das Auftreten der ersten Ableitung nach der Zeit bei der Schrödinger-Gleichung und der zweiten Ableitung nach der Zeit bei der klassischen Wellengleichung.

Es sind dazu die Gleichung (I.1.5) in [40], die Differentialgleichung der Wellenoptik, mit u als rechtwinklige Komponente des optischen Feldes und a die Phasengeschwindigkeit des Lichtes:

$$\Delta u = 1 / a^2 \cdot \delta^2 u / \delta t^2, \quad \text{wobei } \Delta u = \delta^2 u / \delta x^2 + \delta^2 u / \delta y^2 + \delta u^2 / \delta z^2 \quad (3)$$

zu vergleichen mit der raum-zeitlichen Schrödinger-Wellengleichung (I.6.9a) in [40]

$$\Delta u - 2 m V u h^2 + 2 i m h^{-1} \cdot \delta u / \delta t = 0 \quad (4)$$

wobei hier die Kräfte ein von der Zeit abhängiges Potential V als potentielle und W als kinetische Energie haben können.

Im Anschluß daran macht Sommerfeld darauf aufmerksam, daß (I.1.5) vom Typ der Schwingungsgleichung mit der Beschleunigung ist. Die Gleichung (I.6.9) vom Typ der Diffusionsgleichung mit der Geschwindigkeit.

Würde dann noch der Wirbel durch die imaginäre Komponente von gekennzeichnet, so erfüllt man mit der Anweisung der Schrödinger-Gleichung, Ψ mit der konjugiert komplexen Größe zu multiplizieren, den Satz von Sommerfeld [37] „nur ... im Verein mit einem zweiten Wirbel gleicher Stärke und entgegengesetztem Drehsinn“, also es wäre ein Wirbelpaar gebildet.

Aus Sommerfeld [37] kann man schließen, daß der Zusammenhang zwischen örtlicher und zeitlicher Änderung bei Massenpunkten und Wirbel unterschiedlich ist.

Aus Sommerfeld [40] kann man schließen, daß der Zusammenhang zwischen örtlicher und zeitlicher Änderung bei klassischer und Schrödinger-Wellengleichung unterschiedlich ist.

Aus der gleichen zeitlichen Abhängigkeit wird daher gefolgert, daß die Schrödinger-Gleichung eine Gleichung der Wirbeldynamik sein kann. Das ist eindeutig bei $V = 0$ in Gleichung (4). Als Arbeitshypothese ergibt sich damit folgendes Modell des Photons: Das Photon hat die Struktur eines elektromagnetischen Wirbelpaares. Vom Photon geht laufend ein elektromagnetisches Feld aus, vor allem nach vorn, das normalerweise zu seinem Photon zurück läuft (Wirbelfeld!). Das wäre eine neue Formulierung eines Huygensschen Prinzips. Eine nach vorn gerichtete Welle wurde von Hönl, Maue u. Westphal [41] als vektorielles Huygensches Prinzip referiert. Einstein [15] forderte eine Nadelstrahlung.

Da Schrödinger gezeigt hat, daß seine Gleichung den Heisenbergschen Matrizen entspricht, so hätte damit Heisenberg außer seiner Dissertation noch unbewußt einen Beitrag zur Verbindung von Quantentheorie und Wirbeldynamik geliefert.

5. Deutung der Experimente mit dem Photon mit Struktur

Vom Photon geht laufend ein elektromagnetisches Feld aus, es bildet also eine Quelle, und da das Feld zum Photon zurücklaufen sollte, würde es auch als Senke für das eigene Feld dienen. Da das Feld die Wirkung einer Phase hat, könnte die Feldgeschwindigkeit auch größer oder kleiner als die Lichtgeschwindigkeit sein. Das Feld ist ein Teil des Photons. Wird das Feld unsymmetrisch behindert, so daß das Feld nicht oder nur verzögert zurückkehren kann, so führt das Photon eine Schwenkung nach Gleichung (2) aus bis sich das Photon wieder symmetriert hat. Als Richtungsänderung und nicht als Auslöschung würde dies dem Youngschen oder Huygens-Fresnelschen Prinzip entsprechen. Hier würde die Wechselwirkung des Photons mit seinem Feld die Beugung bedingen.

Die Beugung am Dreieckspalt nach Newton, wie sie Nieke [3] referierte, läßt sich dann so beschreiben: Ist zum Photon, das nahe der Kante passierte, nur das Feld aus der Nähe der Kante unsymmetrisch zum Photon zurückgekehrt, so führt das Photon die Schwenkungen aus, die diese Symmetriestörung erfordert. Das sollte die inneren Beugungsstreifen des Spaltes ergeben, die der Beugungsfigur der Halbebene entsprechen. Wenn auf dem weiteren Weg Feldteile zum Photon zurück laufen, die die andere Spalthälfte passierten, so hat das Photon jetzt die Information vom gesamten Spalt und führt die Schwenkungen aus, die den äußeren Beugungsstreifen des Spaltes entsprechen.

Die Ergebnisse in der Schlierenapparatur nach Nieke [4] weisen auf die Herkunft der gebeugten Photonen, denn alle Photonen, die nicht hinreichend gebeugt wurden, deckt die Schlierenblende ab. In der Abbeschen Schlierenapparatur wird der Spalt als Doppelstreifen mit dunklem Streifen am Ort der Bilder jeder Kanten abgebildet. Die Breite der Doppelstreifen betrug maximal 0,1 mm und hängt von der Apertur des Abbildungsobjektivs ab.

In der Schlierenapparatur findet eine Abbildung des Spaltes mit gebeugten Photonen statt, wobei sie geradlinig zurückverfolgt werden. So wurde es für schattenseitig gebeugte Photonen nach Nieke [3], [4] und [5] notwendig, eine seitliche Versetzung anzunehmen, denn von der Spaltbacke können Photonen nicht kommen. Diese Versetzung wäre also bedingt zuerst durch Behinderung des Feldes durch die Kante und dann durch den Rücklauf von Feldteilen, die etwas entfernter die Kante passierten.

Wenn bei hintereinander folgenden Beugungen nach Nieke [7] das Photon sich noch nicht wieder symmetriert hat, so verhält es sich bei der folgenden Beugung anders, denn es reagiert auch noch auf das von der ersten Beugung noch fehlende oder zurücklaufende Feld.

Bei der Abdeckung eines Spaltbildes des Doppelspaltes nach Nieke [7] kehrt nach hinreichender Weglänge (Größenordnung dm) nicht nur das durch den Einzelspalt passierende Photon und dieser Teil des Feldes zurück, sondern es kehren auch Feldteile zum aussendenden Photon zurück, die den anderen Einzelspalt passierten. Bei abgedecktem Spaltbild hat daher das Photon, wenn es einen hinreichend langen Weg zurücklegte, die Information von beiden Spalten des Doppelspaltes. Es entsteht also trotz Abdeckung des Bildes eines Einzelspaltes die Beugungsfigur des Doppelspaltes. Die Beugungsstreifen des abgedeckten Einzelspaltes können aber nicht mehr entstehen.

Nieke [8] zeigte, daß Licht nach der Beugung teilweise eine niedrigere Frequenz hat, was bei kleinen Spaltweiten nachweisbar ist. Wenn ein Teil des Photons nicht zum aussendenden Photon zurückkehren kann, so sollte eine Energie- oder Frequenzminderung selbstverständlich sein, denn das Feld ist ein Teil des Photons.

Nicht selbstverständlich erscheint, daß das gebeugte Licht aus der Umgebung beider Spaltbacken in größeren Entfernungen bei äußeren Beugungsstreifen gemeinsam die Ordnungen bilden. Sie münden, wie die Abdeckversuche in der Schlierenapparatur bei Nieke [4] zeigten, rückwärts verfolgt, in die gleichen Ordnungen ein. Da das Feld der Photonen hier den gesamten Spalt passiert hat, so ist diese Symmetrie verständlich. Dies war ja schließlich auch der Befund von Young, der ihn zum Youngschen Prinzip veranlaßte, wenn er auch fälschlich gebeugtes Licht nur von der Kante ausgehend annahm.

Nach Carnal u. Mlynek [42] zeigen auch Atome und Elementarteilchen eine Beugung. Da die Atome unbestritten eine Struktur haben, so sollte es auch für diese möglich sein, damit die Beugung zu erklären.

Die Interferenz des Photons mit sich selbst nach Dirac [43] hätte so eine anschauliche Deutung gefunden durch die Wechselwirkung des Photons mit seinem Feld. Wird dieses Feld unsymmetrisch behindert, so findet eine Ablenkung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, also eine Beugung statt. Auch die Forderung von Einstein [15] nach einer Verschmelzung von Welle und Korpuskel kann damit erfüllt werden.

Die Kapitulation von Feynman [12]: „Geben wir es auf“ verlängerte also nur die Lebensdauer der üblichen unzulässigen und falschen Extrapolation und deren Übernahme in den Dualismus von Welle und Korpuskel durch Bohr. Nicht zu kapitulieren, brachte in dieser Arbeit eine neue Interpretationsmöglichkeit der Beugung.

Literaturverzeichnis

- [1] I. Newton, Opticks, or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light. London 1704;
Opera quae exstant omnis, Tom IV. London 1782;
Reprint, Bruxelles 1966;
Optik II + III, Übers. W. Abendroth, Ostwald's Klassiker Nr. 97, Engelmann Leipzig 1898;
Neuaufgabe Bd. 96/97, Vieweg, Braunschweig. 1983;
Optique. Trac. J. P. Murat 1787;
Reproduction, Bourgois, Paris 1989.
- [2] A. J. Fresnel, Oeuvres Complètes I. Paris 1866;
Abhandlungen über die Beugung des Lichtes. Ostwalds Klassiker Nr. 215, Engelmann, Leipzig 1926.
- [3] H. Nieke, Newtons Beugungsexperimente und ihre Weiterführung. Arbeit 1.
- [4] Wie [3], Arbeit 2.
- [5] Wie [3], Arbeit 3.
- [6] Wie [3], Arbeit 4.
- [7] Wie [3], Arbeit 5.
- [8] Wie [3], Arbeit 6.
- [9] M. Born, Albert Einstein - Hedwig und Max Born - Briefwechsel. Nymphenburger, München 1969, S. 119.
- [10] N. Bohr, Atomphysik und menschliche Erkenntnis I. Die Wissenschaft Bd 112, Vieweg, Braunschweig 1964, S. 5 + 11.
Atomic Theory and Description of Nature. Univ. Press Cambridge 1934, 1949.
- [11] N. Bohr, Atomphysik und menschliche Erkenntnis II. Die Wissenschaft Bd. 123, Vieweg, Braunschweig 1966, S. 4 + 5
Atomics Physics and Human Knowledge. Wiley, New York 1958; Interscience, New York 1965,
- [12] R. P. Feynman, R. B. Leighton u. M. Sands, Feynman Vorlesungen über Physik. Bd. III Quantenmechanik. Oldenburg, München-Wien und Addison-Wessely, London 1971, S. 1-1
- [13] L. de Broglie, Die Elementarteilchen. Govarts, Hamburg 1943.
- [14] M. Born, Physik im Wandel meiner Zeit. Vieweg, Braunschweig u. Akademie-Verlag, Berlin 1958.
Physics in my Generation. Pergamon, London, New York 1956.
- [15] A. Einstein, Phys. Z. **18** (1917) 121.
- [16] K. Przibram (Hrsg.), Schrödinger, Planck, Einstein, Lorenz, Briefwechsel zur Wellenmechanik. Springer, Wien 1963, S. 29.
- [17] M. Jammer, in: Einstein Symposium Berlin. Lecture notes in physics, Bd. 100. Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1979. S. 146-167.
- [18] M. Bunge, wie [17] S. 204-219.
- [19] F. Hund, Materie als Feld. Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1954, S. 379.
- [20] E. Mach, Die Prinzipien der physikalischen Optik. Barth, Leipzig 1921.
- [21] R. Hofstadter, Rev. mod. Phys. **28** (1956); **30** (1958) 482, Phys. Bl. **18** (1962) 193.

- [22] W. Heisenberg, Introduction to Uniform Field Theory of Elementary Particles. Interscience, New York 1966;
Einführung in die einheitliche Feldtheorie der Elementarteilchen. Hirzel, Stuttgart 1967, S. 116.
- [23] L. P. Hughston, Twistors and Partides. Lecture notes in physics Bd 97, Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1979, S. 102.
- [24] Wie [13], S. 215.
- [25] J. A. Christiansen, Mt. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk **37** (1968) 1.
- [26] N. D. Shewandow, Die Polarisation des Lichtes. WTB 44, Akademie-Verlag, Berlin 1973.
- [27] K. Nowak, Neue Physik (Wien) **1** (1953) 56; **4** (1964) 120.
- [28] L. S. Lewitt, Lett. Nuovo Cimento **21** (1978) 222.
- [29] D. H. Deutsch, Phys. Essays **2** (1989) 3.
- [30] D. E. Mc Lennan, Phys. Essays **2** (1989) 51.
- [31] D. Cornals-Frau, Phys. Essays **4** (1991) 577.
- [32] G. H. Hunter a. R. L. P. Wadlinger, Phys. Essays **2** (1989) 158.
- [33] W. M. Honig, Found. Physics **4** (1974) 367;
Quantum Uncertainties. Nato Series B Nr. 162, New York, London 1987, 69.
- [34] G. E. Uhlenbeck u. S. Goudsmith, Naturwiss. **13** (1915) 953.
- [35] J T. W. Marshall, Found. Physics **22** (1992) 363.
- [36] H. Hertz, Ann. Physik (III) **36** (1889) 1;
Gesammelte Werke Bd. 1. Barth, Leipzig 1892.
- [37] A. Sommerfeld, Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. II, Mechanik deformierbarer Medien. Akad. Verlagsges. Leipzig 1945, S. 155, 156 u. 153.
- [38] H. Helmholtz, J. angew. Math. **55** (1858) 25; Ges. Werke Bd. II, Barth, Leipzig 1882, S. 101.
- [39] Wie [37] S 142.
- [40] A. Sommerfeld, Atombau und Spektrallinien. Bd. II, Vieweg~ Braunschweig 1960.
Atomic Structure and Spectral Lines. Transl. L. Brose, Methuse, London 1923, 1930, 1934.
- [41] H. Hönl, A.W. Maue u. K. Westphal, in: Handbuch der Physik Bd. XXII/1, Springer, Göttingen, Heidelberg, Berlin 1961.
- [42] O. Carnal u. J. Mlynek, Phys. Rev. Lett. **66** (1991) 2689; Phys. Bl. **47** (1991) 379.
- [43] P. M. A. Dirac, Die Prinzipien der Quantenmechanik. Hirzel, Leipzig 1930, S. 14.
The Principles of Quantum Mechanics. Clarendon, Oxford 1935, 1947, 1958.