

Die Berücksichtigung des magnetische Moments der Elektronen in der Quantentheorie

Helmut Nieke

Zusammenfassung

In vorhergehenden Arbeiten wurde gezeigt, daß die Berücksichtigung des magnetischen Momentes des Elektrons bei der Einführung in Spin und Bohrschen Atommodell neue Gesichtspunkte liefert. In dieser Arbeit wurde ergänzt, daß 'an Elektronen gekoppelte magnetische Flußschläuche' in der Quantenfeldtheorie sowie anschauliche Berücksichtigung des magnetischen Momentes des Elektrons und der Lorentzkraft gleiche Ergebnisse liefern können. Das zeigt, daß die Quantentheorie ergänzungsbedürftig ist. Einstein hatte also recht, wenn er die Heisenberg-Bohrsche Quantentheorie als unvollständig bezeichnete. Generell wird gezeigt, daß die Bezeichnung Welle durch Feld ersetzt werden muß, sowohl bei Licht als auch bei Materie.

Consideration of Magnetic Moment of Electrons in Quantum Theory

Abstract

In previous papers were shown that the consideration of magnetic moments of electrons delivered new aspects by introducing into Spin and Bohr's atomic model. In this paper could be shown that with 'on electrons coupled magnetic current-tubes' in quantum field theory was as well as vivid consideration of magnetic moment of electron and Lorentz-force can give the same results. This shows that quantum theory is necessary for completion. Einstein was right as he marked Heisenberg-Bohr's quantum theory as incomplete. General is shown that the designation of wave is to change for field, in light and also in matter.

1. Die Kopenhagener Deutung

Die Kopenhagener Deutung beinhaltet erstens den Dualismus von Welle und Korpuskel. Er baut auf Licht als Welle bei der Beugung nach Fresnel [1] und dem etwa 1900 entdeckten lichtelektrischen Effekt in der Form des Dualismus nach Broglie [2] was dieser auch auf Materie erweiterte.

In den vorstehenden Arbeiten zeigte Nieke [3] und [4], mit Berücksichtigung der Beugungsexperimente von Newton [5] und neuerer Beugungsexperimente, daß Licht niemals eine Welle sein kann. (Der angebliche Beweis Licht als Welle von Fresnel beruht auf einer unzulässigen und falschen Extrapolation der Beugung am Spalt auf die Entfernung null.) Die Beugung wurde danach von Nieke [6] als Richtungsänderung infolge Wechselwirkung des Photons mit seinem Feld beschrieben. Dazu ist statt Dualismus von Welle und Korpuskel zu setzen: Korpuskel stets mit Struktur, statt Welle das Feld des Korpuskels, und Dualismus ist durch Wechselwirkung von Korpuskel und Feld zu ersetzen. (Einstein forderte statt Dualismus: Verschmelzung).

Als zweites behauptet die Kopenhagener Deutung den Indeterminismus bei Quantenprozessen. Newton [5] hatte bereits bewiesen, daß gebeugtes Licht nur aus der engen Umgebung der Kante kommt, bei der Beugung ist also ein Indeterminismus nicht vorhanden. (Einstein: Gott würfelt nicht.) Einzelheiten bei Nieke [4].

Gegen das Dogma der Unanschaulichkeit bei Quantenprozessen, der aus dem Indeterminismus gefolgert wurde, legte bereits Schrödinger [7] Widerspruch ein, er schrieb: „Vom philosophischen Standpunkt würde ich eine endgültige Entscheidung in diesem Sinne einer vollständigen Waffenstreckung gleich erachten. Denn wir können die Denkformen nicht willkürlich ändern und was wir innerhalb derselben nicht verstehen, das können wir überhaupt nicht verstehen. Es gibt solche Dinge - aber ich glaube nicht, daß die Atomstruktur zu ihnen gehört.“

2. Die Struktur des Photon nach Heisenberg und die des Elektrons

Heisenberg [8] folgerte als Struktur des Photon, daß das Photon aus nebeneinander liegend Fermion und Antifermion mit Spin und Antispin besteht. In der Wirbeldynamik bezeichnet man ein solches Aggregat als Wirbelpaar. Wesentlich ist, daß damit Heisenberg den Spin als formale Spinquantenzahl aufgegeben und den Spin als Spin- Rotation- oder Wirbelaggregat eingeführt hat.

Die Paarbildung fordert im einfachsten Fall, daß ein Elektron und ein Positron zu zwei Gammaquanten umgeformt wird. Nieke [9] folgerte aus der Struktur der Photonen nach Heisenberg als elektromagnetisches Wirbelpaar mit zwei entgegengesetzt rotierenden Einzelwirbel für Elektron und Positron die Umordnung als Struktur des Wirbelzwillings. Dabei unterscheiden sich Elektron und Positron durch die Rotationsrichtung der beiden in gleicher Richtung drehenden Wirbel, die sich gemäß den Gesetzen der Wirbeldynamik noch im gleichen Drehsinn einander umkreisen müssen. Also der Spin setzt sich bei Elektron und Photon aus drei Elementen zusammen. Beim Elektron aus zwei gleichgerichteten elektromagnetischen Wirbeln und deren gegenseitige Umkreisung im gleichen Drehsinn, beim Photon aus zwei entgegengerichteten Wirbeln und als drittes Element die Fortpflanzung mit Lichtgeschwindigkeit. In Ruhe ist also das Photon instabil, das Elektron dagegen ist in Ruhe stabil.

Nieke [9] bemängelte, daß Pauli [10] das Elektron mit 180° gedrehtem magnetischen Moment mit dem negativen Vorzeichen des Spins bezeichnet hatte, statt das negative Vorzeichen für die entgegengesetzte Rotation zu reservieren. Nieke begründete dies damit, daß eine Rechtsschraube bei einer Drehung senkrecht zur Achse um 180° nicht zu einer Linksschraube wird. Richtig erkannte Pauli, daß es keine einfache Rotation sein konnte, wohl aber kann der Spin nach Nieke [11] ein Rotations- oder Wirbelaggregat mit innerer Rotation sein. Pauli entwickelte seine Theorie 1925 nach der Entdeckung des magnetischen Momentes des Elektrons. Das Positron wurde aber erst 1932 entdeckt und Pauli änderte seine Spindefinition nicht, obwohl es notwendig gewesen wäre. Das Dogma der Unanschaulichkeit hatte daran maßgebenden Anteil. Die unanschauliche formale Definition des Spins hatte nach Nieke [9] weitreichende Folgen, denn z. B. der β -Prozeß erforderte dann ein zusätzliches Teilchen, das man Neutrino nannte. Mit dem der Rotation (Ladung) entgegengesetzten Spin erübrigt sich dieses Teilchen.

Da der Spin des Protons nur zum Teil mit den hypothetischen Quarks begründet werden konnte, sprach Düren [12] vom ‚Spinrätsel‘, also auch in zusammengesetzten Teilchen ist keineswegs alles geklärt. Weitere Erkenntnisse sind also notwendig.

3. Das magnetische Moment des um den Kern kreisenden Elektrons

Bohr begann 1913 mit der Berechnung des Atommodells entsprechend der Planetenbewegung. Das magnetische Moment des Elektrons konnte er noch nicht berücksichtigen, denn es wurde erst 1925 entdeckt. Als es dann entdeckt wurde, hatte sich Bohr bereits festgelegt, daß das Atom klassisch nicht zu berechnen sei, seine Berechnungen wurden daher nicht ergänzt.

Nieke [11] berücksichtigte beim Bohrschen Atommodell auch das magnetische Moment des um den Kern laufenden Elektrons und die dabei entstehende Lorentzkraft. Das so resultierende Magnetfeld bezeichnete er als magnetisches Moment-Blatt. Das magnetische Moment des Elektron stellt sich so ein, daß es mit dem Magnetfeld des magnetischen Blattes (das Feld der Ladung des um dem Kern kreisenden Elektrons) einen Ring bildet. Das Feld der Ladung des kreisenden Elektrons muß entweder wieder zum Elektron zurücklaufen oder von der positiven Ladung des Kernes genausoviel erhalten, wie es zur positiven Ladung sendet. Das Feld des magnetischen Momentes muß als Wirbelfeld in jedem Fall zurück zum Elektron laufen. Denn die innere Energie des Elektrons ist konstant, nur die kinetische Energie ist variabel. Im Gegensatz zum Photon, wo die Geschwindigkeit konstant, aber Energie und Frequenz (Comptoneffekt und Frequenzminderung nach Beugung bei Nieke [13]) variabel ist.

Nieke [11] deutete das magnetische Moment des Elektrons als magnetischen 'Wirbeltrieb' und nicht als magnetischen Dipol oder Monopol. Wenn das Elektron die Struktur des Wirbelzwillings mit zwei gleichdrehenden Wirbeln hat, die sich im gleichen Drehsinn gegenseitig umkreisen, so scheint dieses Aggregat insgesamt nicht ohne Drehmoment. Aber es ist zu bedenken, daß es sich um elektromagnetische Wirbel handelt und der magnetische Wirbeltrieb erlaubt dann das Gleichgewicht, wenn Elektro- und Wirbeldynamik kombiniert berücksichtigt wird. Die Lorentzkraft erzeugt im Verein mit dem magnetischen Moment-Blatt und der bewegten Ladung eine der elektrischen Anziehung entgegengerichtete Kraft. Diese Kraft stabilisiert die Bahn des Elektrons und bewirkt Energiestufen der Elektronen durch phasenrichtigen Rücklauf des Feldes des magnetischen Momentes, so daß das Elektron nicht in den Kern fallen muß. Da das Feld im stationären Zustand phasenrichtig zum Elektron zurücklaufen muß, ergeben sich im Verein mit der Struktur Energiestufen, die Quantenzustände. Es ist also unbedingt notwendig, beim Bohrschen Atommodell das magnetische Moment des Elektrons mit zu berücksichtigen.

Den Prozeß der Quantisierung kann man sich danach so vorstellen:

Kreisende Elektronen strahlen nicht, denn es kann sich nach Nieke [6] und [14] kein Photon mit der Struktur eines Wirbelpaares bilden, wohl aber bauen sie ein Feld als magnetisches Moment-Blatt auf. Das Feld des Elektrons, das der Ladung und vor allem das des magnetischen Momentes, muß nach Nieke [6] und [11] phasenrichtig zurücklaufen. Das ergibt dann die stationären Bahnen. Wird das Elektron zu einer instabilen Bahn mit Dipolmoment (das kann keine kreisförmige Bahn sein) angeregt, so kann beim Rückübergang zu einer stationären Bahn ein Photon aufgebaut werden. Die sog. Lebensdauer eines Zustandes beträgt größenordnungsmäßig 10^{-8} s, in 10^6 Perioden bei sichtbarem Licht, könnte nach Nieke [6] das Photon halbperiodenweise aufgebaut werden. Es ist in dieser Zeit im 'status nascendi', bis ein Photon gebildet ist, das eine zur Frequenz gehörige Energie hat. Ist das erreicht, so löst sich das Photon mit der Struktur eines Wirbelpaares mit Lichtgeschwindigkeit ab, oder sicher richtiger, die beiden Wirbel treiben sich gegenseitig vorwärts. Für Photonen mit Struktur muß es also keinen Quantensprung geben.

4. Die Chern-Simons Invarianz

Chern u. Simons [15] berichteten nur über charakteristische Gruppentheorien ohne Hinweis auf eine Anwendung. Sie weisen aber auf Lie-Gruppen (differenzierbar und Drehungen um festen Punkt) und Weil-Gruppen (Ring- und Faserstrukturen), die eine formale Anwendung auf magnetische Felder zulassen. Chern [16] referierte Anwendungen der Chern-Simons Invarianz sowie Rebbi u. Soliani [17]. Als erstes wurde dies auf die Symmetrie der Spektrallinien angewendet, dann wurde die Quanten-Feldtheorie, Selbstdualität, viele Dimensionen, Wirbel im magnetischen Feld,

Polarisation, Beziehungen zur Schrödinger-Gleichung, Anwendungen auf den Quanten-Halleffekt, Anyonen und Solitonen damit bearbeitet. Folgerungen aus der Chern-Simons Invarianz wurden so als Chern-Simons Term oder insgesamt als Chern-Simons Theorie bezeichnet.

Dies war möglich, da die Gruppentheorie eine vollständige oder zumindest vollständigere Theorie bot, die Quanten-Feldtheorie hingegen berücksichtigte nicht hinreichend Wirbelfelder, da auch Bohr das magnetische Moment des Elektron nicht berücksichtigt hatte.

Einstein hatte also recht, wenn er die Heisenberg-Bohrsche Quantentheorie als eine unvollständige Theorie bezeichnete. Außerdem wurde die Kopenhagener Deutung auf einer unzulässigen und falschen Extrapolation aufgebaut, was schon im Abschnitt 1 begründet wurde.

5. Elektronen mit gekoppelten magnetischen Flußschläuchen

Weller [18] berichtete zusammenfassend über magnetische Flußschläuche, die als Quasiteilchen an Elektronen gekoppelt sind. Die theoretische Konstruktion beschreibt die Chern-Simons-Elektrodynamik, vgl. Dunne [19] mit fiktivem Magnetfeld \mathbf{B}

$$\mathbf{B} = (\tilde{\mathbf{N}} \times \mathbf{A})_z = -m \Phi_0 \rho(x,y,t) \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = m \Phi_0 / 2 \pi r \quad (2)$$

Dabei ist $\tilde{\mathbf{N}}$ ein Differentialoperator, \mathbf{A} Vektorpotential des magnetischen Flußschlauches, Φ_0 Flußquanten, m deren Anzahl, ρ deren Dichte. Es sind also Wegintegral und Vektorprodukt mit Magnetfeld angefügt.

Guadagnini [20] schrieb (übersetzt): „Das Ergebnis (das Magnetfeld der Chern-Simons Vakuum Erwartung) hat eine einfache Interpretation. Der Exponent enthält die Zirkulation des entlang eines geschlossenen Weges des magnetischen Feldes, erzeugt durch den zweiten Draht. Diese Quantität ist genau die gewonnene Energie ε des entlang des Weges bewegten imaginären magnetischen Monopoles, erzeugt in Anwesenheit des Feldes durch den zweiten Draht. Für jede „Windung“ des magnetischen Monopoles entlang des Weges wächst die Energie um einen definierten Betrag, welcher in unseren Einheiten gegeben ist durch

$\varepsilon = -2 e_1 e_2 (2 \pi / k)$. Für willkürliche, nicht-kreuzende, Wege werden die Werte des Ausdrucks (Gauss-Integral) als eine ganzzahlige Darstellung gewonnen, genau wie oft der Weg gewunden ist.“

Das ist mit virtuellem Monopol das, was im Abschnitt 3 mit magnetischen Moment des Elektron als magnetisches Moment-Blatt ausgeführt wurde. Aber das Elektron hat weder einen imaginären magnetischen Monopol, noch einen realen magnetischen Dipol, sondern nach Nieke [11] einen Wirbeltrieb, der das magnetische Moment erzeugt. Mit der Lorentzkraft auf das bewegte Elektron und dem Feld des magnetischen Moment-Blattes, das als Wirbelfeld zum Elektron zurückläuft, ergibt sich:

$$\mathbf{F}_L = e (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = e (|\mathbf{v}| |\mathbf{B}|). \quad (3)$$

Da $\tilde{\mathbf{N}}$ eine geometrische Änderung ist, so entspricht dies der Geschwindigkeit \mathbf{v} und das Vektorpotential \mathbf{A} des magnetischen Flußschlauches dem Magnetfeld \mathbf{B} des magnetischen Moment-Blattes, dessen Magnetfeld bewirkt dann am kreisenden Elektron die Lorentzkraft. Mit unterschiedlichen Mitteln, statt formal mit Quasiteilchen und imaginärem Monopol, sondern physikalisch anschaulich, wird hier also das Gleiche beschrieben: die Wirkung des magnetischen Momentes des Elektrons. Hier wird also auch der Nachteil der unanschaulichen Beschreibung offenbar, denn der wirkliche physikalische Vorgang wird verschleiert.

Es ist also zu prüfen, ob die Berücksichtigung vom magnetischen Moment des Elektrons und der Lorentzkraft beim Bohrschen Atommodell ausreicht, die experimentell gefundenen Werte zu erhalten.

6. Ehrenhafts Versuche über Bahnen kleiner Probekörper

Ehrenhaft [21] schüttete staubförmige Probekörper aus den verschiedensten Materialien in Gasen oder im Vakuum auf, beleuchtete sie nur zur Beobachtung oder intensiv und beobachtete im Dunkelfeld ihre Bahnen im elektrischen-, magnetischen- oder Gravitations-Feld. Dabei beobachtete er Photo-, Elektro-, Magneto- und Gravitato-Phorese. Außer den zu erwartenden Bahnen beobachtete er positive und negative Effekte, Rotationen und Schraubenbahnen. Trotz enorm vieler Experimente konnte er keine einheitliche Beschreibung geben. Zur Erklärung nahm er magnetische Monopole an, die zu dieser Zeit auch Dirac diskutierte. In jedem Fall geht aus diesen Versuchen hervor, daß es wenigstens noch eine grundlegende Erscheinung geben muß, die bisher nicht berücksichtigt wurde.

Vorschlag zur Erklärung (außer den hier berichteten Erscheinungen): Die Schwerpunkte von elektrischer Ladung, magnetischen Dipol und Gravitation müssen in zusammengesetzten Teilchen nicht zusammenfallen.

7. Vergleich von Licht- und Atomstrahlen

Carnal u. Mlynek [22] zeigten das Youngsche Doppelspaltexperiment mit Heliumatomen mit Eintrittsspalt $2 \mu\text{m}$, Doppelspalt $8 \mu\text{m}$ Spaltabstand und $1 \mu\text{m}$ Spaltweite. Da jedes Heliumatom nur einen Spalt passieren kann, so wird man auch hier die Wechselwirkung der Atome mit ihrem Feld annehmen. Schon vorher zeigten Staudenmann u. a. [23] Interferenzen mit Neutronen.

Dabei ist zu bemerken, daß Licht seine Polarisationsrichtung normalerweise fest einhält, was nach Nieke [6] auf die Struktur des Photon als Wirbelpaar zurückzuführen ist, die mit der eines Kreiselkompasses übereinstimmt. Diese Konstanz der Polarisationsrichtung findet man bei Materiestrahlung nicht so ausgeprägt, sie ist leichter störrisch.

Da Licht niemals aus Wellen bestehen kann, so ist das erst recht nicht für Materie anzunehmen. Es ist unbestritten, daß jedes Elementarteilchen und Atom ein Feld hat, das muß nur ernst genommen werden. Man kann die Feststellung von Mach für Licht auch auf Materie übertragen: 'Alle ,Beugungs- und Interferenzexperimente beweisen nur die Periodizität der Materie und nicht die Welle'. Sicher ist es kein Gleichfeld wie bei einer ruhenden Ladung und daher kann das Feld auch Phasenverschiebungen zum Teilchen haben. Also auch hier gibt es keine Führungswelle, sondern höchstens ein Führungsfeld oder besser ein Wechselwirkungsfeld, mit dem es bei Unsymmetrie oder Phasenverschiebung wechselwirkt. Wie bei Photonen kann diese Wechselwirkung mit der Wirbeldynamik begründet werden.

Bell [24] hielt die Führungswelle aus anderen Gründen für unmöglich, was er vor allem mit der Wellenfunktion und Abtrennung der Messung begründete. Nach ihm sollten mit der Führungswelle nur Abweichungen von der Quantenauffassung begründet werden und das Wort wurde mißbraucht. Er führte Born an, bemerkte aber nicht, daß dieser schon Welle in Feld korrigiert hatte.

Damit in Zusammenhang steht das Problem der verborgenen Parameter, das z. B. Bell [25] diskutierte, wobei er den Beweis der Unmöglichkeit von v. Neumann nicht für gültig, aber die verborgenen Parameter für einfache Gemüter für interessant hält. Wenn man von der unzulässigen und falschen Extrapolation der nur für große Entfernungen gültigen Formel für die Beugung am Spalt auf die Spaltebene ausgeht, so kann man die Frage nicht entscheiden. Experimentell hat aber schon Newton [5] bei der schattenseitigen Beugung an der Kante gezeigt, daß hier der offenbare Parameter die Entfernung von der Kante ist, in der das Lichtteilchen die Kante passierte. Die

Zusammenhänge zwischen Beugungsordnung und den beiden Orten im Spaltbild in einer Schlierenapparatur zeigte Nieke [4]. Wenn man ein weites Lichtbündel insgesamt betrachtet, dann kann man natürlich nur statistische Aussagen machen, aber für den Einzelprozess müssen offenbare Parameter vorhanden sein. So zeigte schon Schrödinger [26] den Compton-Effekt als Stoßprozeß mit exzentrischen Stoß als offenbaren Parameter.

8. Das Feld

Vom Feld kennt man nur die Wirkungen. Mit ruhenden Teilchen muß man, um das elektrische Feld nachzuweisen, eine elektrische Ladung einbringen, für das magnetische Feld einen magnetischen Dipol und für das Gravitationsfeld eine Masse. Mit bewegten Teilchen gibt es weitere Möglichkeiten, aber das braucht hier nicht diskutiert zu werden.

Der Einfluß des magnetischen Momentes wird auch beim Bohm- [27] und Aharonov-Casher-Effekt [28] demonstriert, wobei sie vom Einfluß des Quanten-Potentials sprechen, das auch mit dem Ψ -Feld der Schrödinger-Gleichung verglichen wird. Nach Aharonov-Bohm [29] tritt eine Wirkung noch auf, wenn das Feld sonst nicht nachweisbar ist. Darüber berichten auch Zeiske u. a. [30].

Auch wenn ein Teilchen keine Ladung trägt, wird das bewegte Teilchen mit magnetischem Moment abgelenkt, was auch als kanonischer Impuls zusammen gefaßt wird:

$$\mathbf{p} = m \mathbf{v} + m \times \mathbf{E} \quad (4)$$

Also das Integral über Vektorprodukt magnetisches Moment \mathbf{m} mal elektrische Feldstärke \mathbf{E} entspricht (1) oder (3). Boz, Fainberg u. Pak [31] verknüpfte Aharonow-Bohm Streuung formal mit dem Chern-Simons Term mittels S-Matrix und Feynman-Diagramm.

Das Photon interferiert oder wechselwirkt also mit seinem Feld, was als Diracs Interferenz des Photons mit sich selbst bezeichnet wird. Aber: in der Laserstrahlung interferiert ein Photon auch mit dem Feld eines Photons gleicher Phase und Mode. Als anderes Extrem, bei hoher Strahlungsdichte, tritt die nichtlineare Optik auf: Photonen wechselwirken offenbar dann direkt miteinander.

Was ein Feld aber wirklich 'ist', das weiß man nicht, aber es muß so etwas geben. Aus der Hertzschen Dipolstrahlung und dem lichtelektrischen Effekt kann man folgern, daß Photonen ein Feld-, Energie- oder Wirbel-Aggregat bilden. Aus der Paarbildung ist zu folgern, daß auch das Elektron ein Feldaggregat darstellt mit anderer Struktur. Dies würde Hund [32]: 'Materie als Feld', entsprechen, aber dieses Buch wurde vor 1960 geschrieben, wo eine Struktur der Elementarteilchen noch nicht anerkannt war.

9. Folgerungen

Wie schon im ersten Abschnitt beschrieben, ist die Kopenhagener Deutung bei Berücksichtigung der Newtonschen Beugungsexperimente ohne physikalische Grundlage. Aus diesen und neuen Experimenten wird gefolgert, daß auch die Grundlagen der gesamten Quantentheorie überprüft werden müssen.

Die Berücksichtigung des magnetischen Momentes des Elektrons fordert die Definition des Spin statt als formale magnetische Spinquantenzahl durch ein Spin-, Rotation- oder Wirbelaggregat zu ersetzen. Dabei wird für das Photon die Struktur des Wirbelpaares und für das Elektron die des Wirbelwillings vorgeschlagen.

Die Quantenelektrodynamik hat vor allem statt der zweiten Quantisierung die Quantisierung durch den Aufbau der Photonen innerhalb der sog. Lebensdauer zu berücksichtigen. Hier ist speziell

das magnetische Moment des um den Kern kreisenden Elektrons wirklich zu berechnen und nicht als angehängter magnetischer Flußschlauch formal zu deuten.

Literatur

- [1] A. J. Fresnel, Oeuvres complètes 1. Paris 1866;
Abhandlungen über die Beugung des Lichtes. Ostwalds Klassiker Nr. 215, Engelmann, Leipzig 1926.
- [2] L. de Broglie, J. Phys. Radium **8** (1927) 225-241.
- [3] H. Nieke, Newtons Beugungsexperimente und ihre Weiterführung. Arbeit 1.
- [4] Wie [3], Arbeit 2.
- [5] 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. Marat 1787; Reproduction Bourgois, Paris 1989
- [6] Wie [3], Arbeit 12.
- [7] E. Schrödinger, Ann. Physik IV **81** (1926) 109.
- [8] 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.
- [9] Wie [3], Arbeit 14.
- [10] W. Pauli, Aufsätze und Vorträge über Physik und Erkenntnistheorie. Vieweg, Braunschweig 1961, S. 120-146 (Nobelvortrag 1946);
Z. Physik **31** (1925) 373, 765.
Collected and Selected Papers. New York 1964.
- [11] wie [3], Arbeit 17.
- [12] M. Düren, Phys. Bl. **52** (1996) Nr.3, 243-6;
DESY Hermes 95 - 02 (1995).
- [13] Wie [3], Arbeit 6.
- [14] Wie [3], Arbeit 13.
- [15] S.-S. Chern a. J. Simons, Proc. Nat. Acad. Sci. USA. **68** (1971) 791;
Ann. of Math. **99** (1974) 48-69
S.-S. Chern, Selected Papers Vol. 1. Springer, New York, ... 1980. paper 103 p. 444-465.
- [16] S.-S. Chern, Complex Manifolds without Potential Theory. Second edition, Universaltext, Springer, Berlin u.a. 1995, § 7, p.148-154 u. 157.
- [17] C. Rebbi a. G. Soliani, Solitons and Particle Physics. World Scientific, Singapore 1985.

- [18] W. Weiler, Phys. Bl. **52** (1996) 121-4.
- [19] G. Dunne, Self-Dual Cern-Simons Theories. Lecture Notes Physics M 36 Springer, Berlin 1995.
- [20] E. Guadagnini, The Link Invariants of the Chern-Simons Field Theory. De Gruyter, Berlin 1993, p. 5
- [21] F. Ehrenhaft, Acta physica austriaca **4** (1951) 461-88; **5** (1952) 12-29.
- [22] O. Carnal u. J. Mlynek, Phys. Bl. **47** (1991) Nr. 5, 379-81; Phys. Rev. Lett. **66** (1991) Nr. 21, 2689-96.
- [23] J. L. Staudenmann, S. A. Werner, R. Colelia a. A. W. Overhauser, Phys. Rev. A **21** (1980) 1419-38.
- [24] J. S. Bell, Speakable and unspeakable in quantum mechanics. Cambridge Univ. Press Cambridge a. O. 1987. Nr. 17 p. 159-168; Foundations of Physics **12** (1982) 989-99.
- [25] Wie [204] Nr. 1, p. 1-13, Nr. 4, p. 29-39;
Rev. Mod. Phys. **38** (1966) 447-52
Deutsch: M. Baumann u. R. U. Sexl, Deutungen der Quantentheorie. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden 1987, S. 193-205.
- [26] E. Schrödinger, Ann. Physik (4) **82** (1927) 257.
- [27] D. Bohm, Phys. Rev. **85** (1952) 166-179.
- [28] Y. Aharonov, a. A. Casher, Phys. Rev. Lett. **53** (1984) 319.
- [29] Y. Aharonov a. D. Bohm, Phys. Rev. **115** (1959) 485;
Y. Imry u. R. A. Web, Spectrum d. Wiss. 1989 Juni 88-95.
Sc. Am. (USA) 1989, April 36.
- [29] Y. Aharonov a. A. Casher, Phys. Rev. Lett. **53** (1984) 319.
- [30] K. Zeiske, G. Zinner, F. Riehle u. J. Helmcke, Phys. Bl. **51** (1995) Nr. 12, 1188-9; Appl. Phys. B **60** (1995) 205.
- [31] M. Boz, V. Fainberg, N. K. Pak, Ann. Phys. N.Y. **246** (1996) 374.
- [32] F. Hund, Materie als Feld. Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1954.