

Folgerungen aus den Newtonschen Beugungsexperimenten für Photonen

Helmut Nieke

Zusammenfassung

Mit dem Nachweis der Lokalisierung des gebeugten Lichtes in der engen Umgebung der Kante in Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel durch Newton war bereits gezeigt, daß die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation für die Beugung am Spalt nicht anwendbar sein kann. Aus Newtons Beugungsexperimenten und deren Weiterführung wurde die Struktur des Photons als elektromagnetisches Wirbelpaar gefolgert. Für Photonen mit dieser Struktur wird das Einstein-Podolsky-Rosen Paradoxon gegenstandslos. Es wird diskutiert: Spontane-, Sammel-, Hertz'sche Dipol- und Stimulierte-Emission. Die Lebensdauer oder Verweilzeit wird als Zeit für den Aufbau des Photons mit Struktur gedeutet.

Consequences for Photons out of Newton's Diffraction Experiments

Abstract

With the proof of localization of bent light in the narrow surroundings of edge in dependence on angle of observation by Newton was already shown, that Heisenberg's uncertainty relation can not be applicable for diffraction at slit. Out of Newton's diffraction experiments and their continuations was inferred the structure of photon as electromagnetic vortex-pair with field. For photons with this structure the Einstein-Podolsky-Rosen paradoxon is without object. It is discussed: spontane-, collecting-, Hertz's dipol-, and stimulated- emission. The life-time is interpreted as time for building up a photon with structure.

1. Die Newtonschen Beugungsexperimente.

Newton [1] berichtete im dritten Buch seiner Optik über Beugungsexperimente. Hier interessiert besonders die Beobachtung 10, wo Newton bei der Beugung am Dreieckspalt zeigte, daß bei kurzen Entfernungen und großen Spaltweiten die inneren Beugungstreifen auftreten, die einer Beugung an den Kanten als Halbebene entsprechen. Erst bei großen Entfernungen treten die bekannten äußeren Beugungstreifen des Spaltes auf, deren Abstände konstant sind und reziprok der Spaltweite wachsen.

Dann interessiert die Beobachtung 5, wo Newton [1] III zeigte, daß das schattenseitig einer Kante gebeugte Licht als feine Lichtlinie sichtbar ist (schon vorher bekannt als Grimaldis leuchtende Kante), die um so schmaler wurde; je seitlicher er beobachtete. Gebeugtes Licht kommt danach nur aus der engen Umgebung der Kante. Newton schloß daraus, daß die am weitesten gebeugten Lichtteilchen die Kante am dichtesten passiert haben. Fresnel [2] konnte Grenzfälle der Beugung für große Entfernungen mit dem Fouriertheorem berechnen. Die Formel für den Spalt wurde unzulässig und falsch auf den Spalt selbst extrapoliert, und so kam man zu unrichtigen Vorstellungen. Aber bereits Newton hatte gezeigt, was in diesem Gebiet der Extrapolation wirklich passiert, aber das wurde nicht beachtet.

Der von Newton gezeigte Übergang von inneren zu äußeren Streifen und die Lokalisierung des gebeugten Lichtes im leuchtenden Gebiet war weder mit Lichtteilchen noch mit Wellen zu erklären, daher wurden diese Tatsachen verschwiegen. So ergab sich seit etwa 1850 eine unvollständiger Beschreibung und irreführende Begründung der Beugung. Bei Nieke [3] und [4] wurde dies diskutiert. Bei Elementarteilchen konnte ab etwa 1960 eine Struktur nachgewiesen werden. Für die Struktur des Photons kombinierte Nieke [5] als Arbeitshypothese die Struktur des linear polarisierten Photons als elektromagnetisches Wirbelpaar mit einem Feld, das einen Teil des Photons bildet.

Vom Photon mit Struktur geht nach Nieke [5] laufend, vor allem nach vorn, ein elektromagnetisches Feld aus, das normalerweise wieder zum Photon zurückläuft (ähnlich des Huygensschen Prinzips, aber mit zurücklaufendem Wirbelfeld). Wird das zurücklaufende Feld des Photons unsymmetrisch behindert, so hat das Photon nicht mehr exakt die Struktur eines Wirbelpaares, sondern die aus zwei Wirbeln mit entgegengerichtetem Drehsinn, aber nicht mehr genau der gleichen Wirbelstärke. Nach den Gesetzen der Wirbeldynamik führt dieses ehemalige Wirbelpaar eine Schwenkung aus (z. B. bei Sommerfeld [6]). Es ergibt sich also eine Deutung der Beugung als Richtungsänderung der Photonen.

2. Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation mit Photonen mit Struktur

Für einen Massepunkt oder ein Teilchen, das sich als Massepunkt darstellen läßt, genügen zwei Angaben: die des Ortes und des Impulses oder eines anderen Paares kanonisch konjugierter Variabler. Auch die Unbestimmtheitsrelation nach Heisenberg [7] bedient sich dieser beiden Angaben. Nieke [3] zeigte, daß die aus der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation für die Beugung am Spalt errechneten Werte nicht stimmen, nicht stimmen können da Newton [1] schon festgestellt hatte, daß gebeugtes Licht nur aus einer engen Umgebung der Kante kommt. Newton [1] III Frage 3 folgerte aus dem Beugungsfeld des Dreieckspaltes mit erst inneren und dann äußeren Streifen, daß die Lichtteilchen aalartig laufen müssen. Fresnel [2] stellte experimentell fest, daß die Abstände der Beugungsstreifen der Halbebene bei parallel eingestrahlem Licht nur proportional der Wurzel aus der Entfernung zunehmen. Nieke [3] und [4] fanden für schattenseitig gebeugtes Licht, daß es schattenseitig versetzt sein muß, da es von der Spaltbacke herzukommen scheint. Nach der Beugung können also gebeugte Photonen auch nicht geradlinig laufen, wie alle diese Experimente beweisen. Hier genügen also keinesfalls diese beiden Angaben, denn eine definierte Impulsänderung unmittelbar nach der Beugung gibt es gar nicht. Erst in sehr großer Entfernung vom Spalt, wenn sich die äußeren Beugungsstreifen gebildet haben, deren Abstände proportional mit der Entfernung zunehmen, könnte man die Photonen mit zwei Angaben kennzeichnen, da sie nun wieder geradlinig laufen, aber dann interessiert die Unbestimmtheitsrelation nicht mehr.

Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation setzt also voraus, daß die Teilchen als Massepunkte darstellbar sind, was für Teilchen mit Struktur nicht der Fall sein muß. Aus diesem Grund ist für die Beugung die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation nicht anwendbar. Nach Schrödinger waren zur Messung der Geschwindigkeit schon immer zwei Messungen notwendig, danach besteht das Problem der Unbestimmtheitsrelation an einem Ort überhaupt nicht. Da außer Photonen auch Elektronen, Atome usw. die Eigenschaft der Beugung zeigen, vgl. z. B. Carnal u. Mlynek [9], so könnte auch hier Struktur und Feld als Selbstwechselwirkung mit dem eigenen Feld die Beugung als Richtungsänderung begründen.

3. Das Einstein-Podolsky-Rosen Paradoxon

Nach Einstein, Podolsky u. Rosen [10] folgt die Emission von Photonenpaaren zur Erhaltung des Drehimpulses. Mit Photonen ohne Struktur und dem Spin 1 gab es damals dafür keine andere Möglichkeit. Mit der Annahme des Photons mit Struktur aus zwei Teilen mit entgegengerichtetem Spin oder Drehimpuls entfällt die Annahme der Emission eines Photonenpaares, denn ein Photon aus zwei Teilen mit entgegengerichtetem Spin hat bereits die richtige Symmetrie. Bei der Dipolstrahlung nach Abschnitt 7 entstehen die beiden Teile jeweils nacheinander in aufeinander folgenden Halbperioden oder bei der spontanen Emission nach Abschnitt 5 durch Sammelemission während der Lebensdauer. Über den Entstehungsprozeß zeitlich gemittelt heben sich also die entgegengerichteten Drehimpulse auf. Es wäre jedoch irreführend, vom Spin Null zu sprechen, denn für die Lagestabilität des Photons wirken die beiden entgegengerichteten Drehimpulse gemeinsam wie ein Kreiselkompaß. Nach dem Modell des Photons mit Struktur war der negative Ausgang der Experimente, die dies überprüften, zu erwarten, z. B., Clauser, Horne, Shimony u. Holt [11]. Auch der Schluß auf die Nichtexistenz verborgener Parameter erweist sich als unzulässig, denn sie sind danach gar nicht zu erwarten.

4. Das mechanische Modell

Auf einer Drehscheibe kann man zwei Kreisel so in entgegen gerichtete Drehungen bringen., daß sich die Momente dazu aufheben. Am einfachsten, wenn sich die Kreisel symmetrisch zum Drehpunkt befinden und man passend in die Speichen greift. Wenn sich die Kräfte, und damit die Momente aufheben, so sollte sich auch deren reactiones aufheben. Auch die dann entstehenden Drehmomente der beiden Kreisel sollten entgegengesetzt gleich sein, also die Drehscheibe bleibt in Ruhe. In einem Raumflugkörper müßten sich die Momente bezüglich des Schwerpunktes aufheben.

Das Modell wäre also mechanisch möglich. Nun aber ist das Photon kein mechanisches Wirbelpaar, sondern ein elektromagnetisches Wirbelpaar und die elektrischen und Wirbel- Eigenheiten sind zu berücksichtigen, es hat also keinen Sinn dieses mechanische Modell weiter auszuführen, damit sollte nur gezeigt werden, daß dies nicht zu einem Widerspruch führt.

5. Spontane Emission bei atomaren Prozessen

Unter der Voraussetzung, daß die Länge des Dipols klein gegen die sog. Wellenlänge ist, fand man für die Emission während einer Periode:

$$S = 4 \pi^3 f^3 M^3 / 3 \epsilon_0 c^3 \quad (1)$$

Planck [12] wandte dies auf den harmonischen Oszillator beim atomistischen Emissionsprozeß an. Mit $f = k_D/m$, $M_0 = e l_0$ und $E_A = k_D l_0^2/2$, wo e und m Ladung und Masse des Elektrons sind, erhielt er

$$S = 8 \pi^3 f^3 e^3 E_A / 3 \epsilon_0 c^3 m \quad (2)$$

Soll pro Periode ein Quant emittiert werden, so muß $S = hf$ sein.

Die Anregungsenergie errechnet sich dann zu

$$E_A > 6,7 \cdot 10^{-14} \text{Ws} = 4,2 \cdot 10^{15} \text{ eV}. \quad (3)$$

Es wäre also eine Anregungsenergie notwendig, die der Gammastrahlung entspricht. Deshalb forderte auch Planck [12] eine Strahlungsdämpfung, damit in jeder Periode nur wenig abgestrahlt wird. Mit der Wellenhypothese war das verträglich, nicht aber mit der Quantenhypothese. Dabei findet man experimentell eine Verweilzeit oder Lebensdauer in der Größenordnung von 10^{-8} s, und dann wird nach bisheriger Auffassung indeterministisch das volle Energiequant abgestrahlt.

Für Photonen mit Struktur nach der Wirbelhypothese könnte dieser Sachverhalt detaillierter beschrieben werden. In jeder Halbperiode der Feldänderung wird ein elektromagnetischer Impuls oder ein Wirbel induziert. Diese bleiben beim Atom und umkreisen ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Im richtigen Rhythmus aufeinander folgend könnten sich jeweils gleichgerichtete Wirbel solange verstärken, bis die Energie hf erreicht ist, denn erst dann kann das Photo mit der Energie hf abgestrahlt werden. Man könnte diesen Mechanismus periodische Kollektions- oder Sammelemission nennen, der mit dem Aufschaukeln einer Torsionsschwingung zu vergleichen wäre. Damit wäre die von Schrödinger so heftig bekämpfte Quantenspringerei [13] vermieden.

Die Lebensdauer ergibt sich dann als die Zeit, die notwendig ist, um die Anregungsenergie über die Schwingungsenergie in elektromagnetische Wirbelenergie hf umzusetzen. Die Sammelemission würde den statistischen und trotzdem deterministischen Charakter der Lebensdauer erklären, wenn elektromagnetische Wirbelenergie unterhalb eines speziellen hf nicht abstrahlbar am Atom verweilen kann. Diese Energie, sie muß nach dem Energieerhaltungssatz bleiben, wird man in Verbindung bringen mit dem virtuellen Photon z. B. nach Georgi [14]. Vom virtuellen Feld der Strahlung sprachen auch schon Slater [15] und vom virtuellen Oszillator Bohr, Kramers u. Slater [16]. Virtuelle Teilchen wurden bisher mehr formal gebraucht als Übergangsglieder (als formale oder hypothetische Zwischenprodukte von Vernichtungs- und Erzeugungs-Operator) im Prozeß der Elementarteilchen z. B. im Feynman-Diagramm.

Ist bei der Anregung noch Wirbelenergie vorhanden, so genügt zur Emission des Quants eine kürzere Zeit. Andererseits muß die Anregung für die gesamte Zeit der Lebensdauer zur Verfügung stehen, also thermische Stöße dürfen sie nicht verkleinern. Bei Lumineszenzanregung bewirkt so ein thermischer Stoß während der Sammelemission die 'Temperaturlöschung.' Aus der Hypothese, daß jedes Lichtquant die Struktur eines Wirbelpaares hat, folgt automatisch, daß Elektronen auf stationären Bahnen nicht strahlen; denn es werden nicht zwei entgegengerichtete Wirbel induziert. Bei der

13

Sammelemmission wäre in dieser Entstehungszeit das Photon also nicht als virtuelles Photon, sondern als Photon im 'status nascendi' zu bezeichnen.

Hier ist ein Experiment im HF-Gebiet zur Prüfung dieses Prozesses denkbar. Im Frequenzgebiet des EHF, wo ein Dipol noch mechanisch herstellbar ist, und ein Quant im Maserverstärker nachweisbar ist, wird ein Dipol mit so kleiner Energie betrieben, daß nur während jeder Periode ein Quant emittiert wird. Wird jetzt die Energiezufuhr halbiert, so sollte nur in jeder zweiten Periode ein Quant emittiert werden.

6. Statistische Sammelemmission

Es ist nach diesem Modell nicht notwendig, einen Dipol periodisch anzuregen, sondern auch Stoß-Dipolmomente können elektromagnetische Impulse oder Wirbel bewirken. Soll dabei ein Photon mit Struktur während der Stoßzeit gebildet werden, so ist das wegen der im vorigen Abschnitt berechneten hohen Anregungsenergie höchst unwahrscheinlich. Wenn aber eine periodische Kollektions- oder Sammelemmission möglich ist, so kann auch eine statistische Kollektions- oder Sammelemmission angenommen werden. Die Frequenz des jeweiligen Wirbels sollte sich nach Landau u. Lifschitz [17] aus den Nulldurchgängen von D oder D/dt beim Stoß ergeben. Ein weiterer Stoß kann die Zeit zwischen den Nulldurchgängen verlängern oder verkürzen. Reicht die Energie des Stoßes zusammen mit der durch statistische Sammlung vorhandenen elektromagnetischen Energie zur Emission, so wird ein Photon emittiert, anderenfalls bleibt die Schwingungs- und/oder Wirbelenergie beim Atom. Da Zeitdauer und Größe der Dipolmomente bei thermischen Stößen unterschiedlich sind, kann ein kontinuierliches Spektrum entstehen.

Wird durch Abstrahlung oder Abkühlung der absolute Nullpunkt erreicht, so geht die kinetische Energie der Atome nach Null. Dann kann aber noch elektromagnetische Wirbelenergie vorhanden sein, die nicht abgestrahlt werden konnte und am absoluten Nullpunkt erst recht nicht abgestrahlt werden kann. Diese Energie würde nach dieser Hypothese die Nullpunktsenergie bilden.

Zur Prüfung dieses Modells der Nullpunktsenergie liegen bereits Experimente vor. Für die Lamb-Shift beim Wasserstoff wird nach Lamb u. Retherford [18] auf ein virtuelles Strahlungsfeld geschlossen. Weiterhin haben James u. Brindley [19] bei Röntgen-Interferenzen einen Einfluß der Nullpunktsenergie nachgewiesen.

7. Emission des Dipols nach Hertz

Bei der Emission durch atomare Prozesse steht nur die begrenzte Anregungsenergie zur Verfügung und es kann jeweils nur ein Quant pro Anregung abgestrahlt werden, also pro Periode höchstens ein Quant. Anders bei der Hertzschen Dipolstrahlung, hier wird laufend Energie zugeführt, auch viele Quanten pro Periode können abgestrahlt werden.

Zur Erklärung der Emission elektromagnetischer Strahlung im Bereich der Hochfrequenz benutzt man nach wie vor das Modell der Strahlung eines Dipols, das Hertz [20] 1889 gab. Direkt eignen sich die Maxwell'schen Gleichungen hier nicht zu Berechnungen. Es half der mathematische Kunstgriff von Hertz durch Einführung des durch einen Rotor-Ausdruck definierten Hertz'schen Vektors oder eines Hilfsvektors. Eine physikalische Deutung des Hertz'schen Vektors wurde nicht gegeben, er kennzeichnet aber eindeutig ein Wirbelfeld.

Nach den Hertz'schen Vorstellungen schnürt sich noch im Raum befindliche Energie oder Feldlinien einer Halbperiode ab. Nach seinen Berechnungen oder Zeichnungen bilden sich geschlossene Feldlinien und in der nächsten Halbperiode entsteht ein entgegengerichteter Wirbel. Die Wellenvorstellung brachte er erst nachträglich hinein, um mit den damaligen Vorstellungen in Übereinstimmung zu bleiben.

Daß die elektromagnetische Strahlung gequantelt ist, darüber besteht heute wohl kein Zweifel, denn der Nachweis dazu wurde zu immer niedrigeren Frequenzen geführt. So müßte auch die Hertz'sche Dipolstrahlung gequantelt sein. Rein formal könnte man im Feldlinienbild das Feld in Einzelgebiete unterteilen, denn die Trennlinien werden vom benachbarten Gebiet in umgekehrter Richtung durchlaufen, das zusätzliche Feld hebt sich so dort auf. Eine physikalische Beschreibung kann dafür noch nicht gegeben werden, die Stabilität des Photons mit Struktur könnte dies begründen.

Hertz [20] schrieb: „Indem wir versuchten, die Beobachtungen aus der Maxwellschen Theorie zu erklären, ist es uns nicht gelungen, alle Schwierigkeiten zu beseitigen. Gleichwohl wird man die Vollständigkeit mit welcher jene Theorie den größten Teil der Erscheinungen wiedergibt, als eine nicht verächtliche Leistung derselben betrachten dürfen.“ Hierzu ist zu bemerken, daß die Schwierigkeiten im Entfernungsbereich des Übergangs der Ernfernungsabhängigkeit der Feldstärke des Dipols vom Nahfeld mit r^{-3} zum Fernfeld mit r^{-2} auftraten, also dort wo die Bildung der Quanten anzunehmen ist.

Solange Quanten im HF-Bereich nicht einzeln nachgewiesen werden können ist nur indirekt ein Nachweis möglich. Wenn sendeseitig der Dipol mit einer Halbperiode gespeist (und aus meßtechnischen Gründen dieses Signal nach einem Abstand von etlichen Perioden in gleicher Form laufend wiederholt wird), so ist zu prüfen, ob dieses Signal im Nahfeld und Fernfeld zu empfangen und mit einem mit dem Sender synchronisierten Kathodenstrahl-Oszillographen nachweisbar ist. Dieser Versuch ist dann mit 1 Periode, 1 ½ Periode, 2 Perioden usw. zu wiederholen. Nach dem obigen Modell wird man bei einer Halbperiode im Fernfeld kein Signal erwarten, wohl aber bei einer Vollperiode. Was bei 1 ½ Periode emittiert wird, läßt sich nur experimentell entscheiden.

8. Stimulierte Emission

Bei der stimulierten Emission löst ein Photon ein zweites Photon aus, die dann den Weg gemeinsam fortsetzen. Wenn sich das Photon während der Lebensdauer aufgebaut hat, d. h. die zur Frequenz gehörige Energie angesammelt hat, löst das Feld des ersten Photons das zweite im gleichen Rhythmus aus, also in gleicher Mode und Phase. So konnte nach dem Vorschlag von Kapitza u. Dirac [21], Schwarz [22] im Inneren eines Lasers mit Elektronenstrahlen Beugungsinterferenzen nachweisen. Danach wird der Laserstrahl als ‘Lichtkristall’ bezeichnet. Gould [23] ergänzte dies mit Atomen. Dann fanden Magyar u. Mandel [24] ohne Strahlungsteiler mit zwei Laser Interferenzen, wenn diese Laser hinreichend Phasen- und modenstabilisiert waren. Hieraus folgerten Richter, Bruder u. Paul [25], daß Photonen nicht nur mit sich selbst, sondern auch mit Photonen interferieren, die in Phase und Mode übereinstimmen. Mit dem hier vertretenen Modell des Photons mit Struktur und Feld wäre das verständlich.

Die Auffassung von Nieke [5] und dieser Arbeit, daß ein Photon schrittweise aus Schwingungsenergie mit einem Dipolmoment in elektromagnetische Wirbelenergie umgebildet wird, unterstützen die Experimente mit Ein-Atom Laser. Rempe [26] referierte darüber zusammenfassend. Er berichtete: die natürliche Lebensdauer wird von der Umgebung der Atome beeinflusst; Unterdrückung und Verstärkung treten in Abhängigkeit von der Entfernung vom Spiegel auf; das Atom tritt mit seinem Spiegelbild in Wechselwirkung und das nicht erst, wenn das Photon fertig ist.

9. Das Feld des Photons

Nieke [3] und [4] bestätigte, daß Newton mit seiner Behauptung: ‘Niemals kann Licht eine Welle sein’ recht hatte, denn das hatte er mit dem Übergang innerer zu äußeren Beugungsstreifen am Spalt und der Lokalisierung gebeugten Lichtes bewiesen. Nach Nieke [5] haben die Photonen mit Struktur ein elektromagnetisches Feld, wobei das Feld ein Teil des Photos ist. Diese Feld wird mit dem Photoeffekt nachgewiesen, aber dieses Feld zeigt auch Wirkungen auf sein Photo mit Richtungsänderungen. Die Wirkung des Feldes wurde früher als Welleneigenschaft bezeichnet. Dies ist also auch ein Beitrag zu Genz [27], der den leeren Raum betrachtete.

Literatur

- [1] I. Newton, *Opticks or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*. London 1704;
Opera que exstant omnis, Tom IV, London 1782;
Optics. Reprint, Bruxelles 1966;
Optik II + III, Übers. W. Abendroth, Ostwald's Klassiker Nr. 97, Engelmann, Leipzig 1898;
Neuaufgabe, Nr. 96/97, Vieweg, Braunschweig 1983;
Optique, trad. J. P. Marat 1787; Reproduction, Bourgois, Paris 1989.
- [2] A. J. Fresnel, *Oeuvre Complètes I*. Paris 1866;
Abhandlungen über die Beugung 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 12.
- [6] A. Sommerfeld, *Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. II Mechanik der deformierbaren Medien*. Akad. Verlagsges., Leipzig 1945, S. 155.
- [7] W. Heisenberg, *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*. 2.Aufl. Hirzel; Leipzig 1941;
The Physical Principles of Quantum Theory. University Press Chicago 1930.
- [8] E. Schrödinger, *Über den Indeterminismus in der Physik*. Barth, Leipzig 1932, S. 9.
- [9] O. Carnal u. J. Mlynek, *Phys. Bl.* **47** (1991) 379.
- [10] A. Einstein, B. Podolsky a. N. Rosen, *Phys. Rev.* **47** (1935) 777.
- [11] J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony a. R. A. Holt, *Phys. Rev.* **23** (1969) 880.
- [12] M. Planck, *Wärmestrahlung*. 5. Aufl. Barth, Leipzig 1923.
- [13] In: Pauli, (Ed.), *Niels Bohr - and the development of physics*. Pergamon, London 1955, p. 14.
- [14] H. Georgi, *Sci. Am (USA)* **244** (1981) Nr. 4, p. 40;
Spectrum d. Wiss. (1981) Juni, S. 70.
- [15] I. C. Slater, *Nature* **113** (1924) 307.
- [16] N. Bohr, A. W. Kramers a. I. C. Slater, *Z. Phys.* **24** (1924) 69; *Phil. Mag.* **47** (1924) 785.
- [17] L. D. Landau. E. M. Lifschitz, *Lehrbuch der theoretischen Physik, Bd II, Klassische Feldtheorie*. Akademie Verlag, Berlin 1967, S. 199.
- [18] W. E. Lamb jr. a. R. C. Retherford, *Phys. Rev.* **72** (1947) 241; **79** (1950) 549; **81** (1950) 222.
- [19] R. W. James a. G. W. Brindley, *Proc. Roy. Soc. London A* **121** (1928) 155
- [20] H. Hertz, *Ann. Physik (III)* **36** (1889) 1;
Ges. Werke, Bd. II, Barth, Leipzig 1892, S. 147, Zitat S. 170.
- [21] P. L. Kapitza a. P. A. M. Dirac, *Proc. Cambridge Phil. Soc.* **28** (1933) 297.
- [22] H. Schwarz, *Z. Phys.* **204** (1967) 276; *Phys. Bl.* **26** (1970) 436.
- [23] P. Gould *Am. J. Phys.* **62** (1994) 1046.
- [24] G. Mayar a. L. Mandel, *Nature* **198** (1963) 255.
- [25] G. Richter, W. Brunner u. H. Paul, *Ann. Physik (7)* **14** (1968) 239.
- [26] G. Rempe, *Phys. Bl.* **51** (1995) 383.
- [27] H. Genz, *Naturwissenschaften* **82** (1995) 170.