

Beugung, Interferenz und Laser als Problem der Synergetik

Helmut Nieke

Zusammenfassung

Die experimentellen Grundlagen für das ‚Photon mit Struktur und Feld‘ werden ausführlich referiert. Mit diesen Grundlagen wird versucht als Problem der Synergetik darzustellen: Interferenz-Winkelbedingung, Beugung, Interferenz und induzierte Emission, soweit sie zum Laser führt. Dabei ist wesentlich, daß das Photon während der sog. Lebensdauer aufgebaut wird, wobei schon das Photon im ‚status nascendi‘ vom dominanten Feld des Lasers beeinflußt, also synchronisiert, wird. Ursache dieses synergetischen Verhaltens ist stets die Wechselwirkung des Feldes mit dem Photon als: Richtungsänderung, Reflexion-Refraktion oder Synchronisation.

Diffraction, Interference and Laser as Problem of Synergetics

Abstract

The experimental foundations of the ‚photon with structure and field‘ are reported in detail. With those basis facts is tried to describe as problem of synergetics: interference-angle condition, diffraction, interference and induced emission, as far as leading to laser. Therefore it is essential that the photon is built up during the so called life-time, but already the photon in ‚status nascendi‘ is influenced by the dominant field of laser, and therefore synchronized. Cause for this synergetic behaviour is always the interaction of photons with their field as: change of direction, reflection-diffraction or synchronisation.

1. Aufbau des Photons mit Struktur

Zwischen spontaner Anregung (mit im Betrag veränderlichen oder oszillierendem Dipolmoment) und Emission vergehen bei sichtbarem Licht etwa 10^{-8} sec. Die Frequenz dieses Lichtes beträgt etwa 10^{14} Hz, es liegen zwischen Anregung und Emission also $\sim 10^6$ Perioden. Nach bisheriger Anschauung ist das Photon nach Bohr, Kramers u. Slater [1] in dieser Zeit, die als (mittlere) Lebensdauer bezeichnet wird, ein virtuelles Photon. Nach Nieke [2] jedoch wird in dieser Zeit das Photon aufgebaut, es ist in dieser Zeit ein Photon im ‚status nascendi‘. Dazu muß man dem Photon allerdings eine Struktur zugestehen (was nach 1960 selbstverständlich sein sollte) und nicht auf der Struktur des Dualismus von Welle und Korpuskel beharren. Der angebliche Beweis von Licht als Welle von Fresnel, mit dem Satz: ‚Der Spalt begrenzt eine Wellenfront und jeder Punkt der Wellenfront wird zum Ausgangspunkt einer neuen Kugelwelle‘, beruht nach Nieke [2] und [4] auf einer unzulässigen und falschen Extrapolation der Formel für die Beugung am Hindernis mit inneren Beugungstreifen oder am Spalt mit äußeren Beugungstreifen (inner- und außerhalb der Schattengrenzen) in großen Entfernungen auf die Entfernung Null. Nämlich, in kurzen Entfernungen treten die inneren Beugungstreifen des Spaltes auf, die der Beugungsfigur der Halbebene entsprechen mit den Kanten als Halbebenen. Die Experimente dazu hatte bereits Newton [5] III mit seinen Beugungsexperimenten Beobachtung 5 (gebeugtes Licht kommt nur aus der engen Umgebung der Kante) und 10 (Beugung am Dreieckspalt mit inneren **und** äußeren Beugungstreifen) geliefert. Aber da Newton

keine Begründung der Beugung mit seinen Lichtteilchen liefern konnte, wurde die unzulässige und falsche Extrapolation benutzt, mit der eine Erklärung der Beugung vorgetäuscht werden konnte.

Nach Heisenberg [6] hat das Photon die Struktur nebeneinander liegend Fermion und Antifermion mit Spin und Antispin. Das deutete Nieke [2] anschaulich als Wirbelpaar. Dazu hat er gezeigt, daß Sommerfeld [7] und [8] unbewußt bewiesen hat, daß die Schrödinger-Gleichung eine Formel der Wirbeldynamik sein kann. (Schrödinger-Gleichung und Wirbeldynamik enthalten nur die erste Ableitung nach der Zeit und nicht die zweite.)

Zum Aufbau des Photons nach Nieke [2] wird in jeder Halbperiode der Lebensdauer ein elektromagnetischer Wirbel induziert, die so lange summiert werden und am Atom verbleiben, bis deren Energie gemäß der bekannten Einstein-Gleichung

$$E = h f$$

erreicht ist. Dann wird das Photon mit der Frequenz f emittiert.

Es gibt also keinen Quantensprung, Schrödinger [9] hatte daher recht, wobei aber seine Welle als Eigenfrequenz zu deuten ist. Allerdings werden in der Wirbeldynamik die Wirbel als unendlich lange Wirbelfäden betrachtet, in dieser Richtung muß die Wirbeldynamik noch ergänzt werden.

2. Eigenschaften des Photons mit Struktur und Feld

Brogie [10] forderte für Licht den Dualismus von Welle und Korpuskel. Bereits Born [11] korrigierte Welle in Feld. Mach [11] zeigte, daß bei Beugung und Interferenz nur die Periodizität des Lichtes und nicht die Welle bewiesen wird, was man leicht bestätigen kann. Dann hat Nieke [13] gezeigt, daß gebeugtes Licht sich bei einer folgenden Beugung anders verhält als unbeeinflusstes Licht, falls dieses Licht von der Beugung an einer Halbebene oder inneren Beugungsstreifen am Spalt stammt. Dazu hatte bereits Fresnel [14] experimentell gezeigt, daß deren Streifenabstände nicht linear mit der Entfernung wachsen wie äußere Beugungsstreifen am Spalt, sondern schwächer, bei parallelem Lichteinfall mit der Wurzel aus der Entfernung. Die Photonen können also nicht geradlinig laufen und Newton [5] folgerte aus der Umwandlung von inneren zu äußeren Beugungsstreifen des Spaltes bereits, daß Lichtteilchen aalartig laufen müßten. In der gleichen Arbeit zeigte Nieke [13], daß bei abgedecktem Spaltbild eines Doppelspaltes trotzdem die Beugungsfigur des Doppelspaltes entsteht (nicht aber der Anteil des abgedeckten Einzelspaltbildes an der Beugungsfigur), wenn vor der Abbildungsoptik ein Weg von etwa Dezimeter lag. Dies wurde so gewertet, daß dann zum Photon bereits so viel Feld des anderen Spaltes zurück gekehrt ist, daß es die Information des anderen Spaltes erhalten und die zugehörigen Richtungsänderungen ausgeführt hat. Dazu sendet das Photon nach Nieke [2], wie nach dem Huygensschen Prinzip, laufend ein elektromagnetisches Feld aus, das aber nicht wie beim Huygensschen Prinzip kugelförmig wegläuft, sondern normalerweise zum Photon zurückkehrt (Wirbelfeld). Ist das Feld des Photons unsymmetrisch behindert, so hat das Photon mit der Struktur eines Wirbelpaares nicht mehr genau die Struktur eines Wirbelpaares, es ist etwas unsymmetrisch und ein solches Wirbelaggregat führt, etwa nach Sommerfeld [7], eine Schwenkung aus, d. h. das Photon erfährt eine Richtungsänderung. So beschrieb Nieke [2] die Beugung am Dreieckspalt: In kurzen Entfernungen kehrt zu dem in Kantennähe passierenden Photon nur jenes Feld zurück, das auch in Kantennähe passierte (das von der Kante abgedeckte Feld fehlt), das Photon erfährt Schwenkungen und zeigt die Beugungsfigur der Halbebene bzw. der inneren Streifen der Beugungsfigur des Spaltes. Hat das Photon einen weiteren Weg zurückgelegt und es kehrt auch Feld zurück, das den gesamten Spalt passierte, so erhält das Photon die Information des gesamten Spaltes und führt die Richtungsänderungen zur Beugungsfigur der äußeren Beugungsstreifen aus. Diese Deutung wird unterstützt, da Nieke [15] nachwies, daß gebeugtes Licht eine niedrigere Frequenz hat, was bereits Smekal [16] vorausgesagt hatte.

Die Beugungsfigur entsteht danach durch Wechselwirkung des Photons mit Struktur mit seinem Feld, wenn dieses Feld unsymmetrisch behindert sein Photon erreicht. Die Eigenschaft der Periodizität von Photon und Feld infolge der Wirbelstruktur bedingt die Streifenbildung.

3. Die Interferenz-Winkelbedingung als Problem der Synergetik

Berge [17] erweiterte die Untersuchung der sog. Kohärenzbedingung auch auf die Seite hinter dem Spalt, d.h. er berücksichtigte wirklich die Beugung, versuchte allerdings, dies mit Wellen zu interpretieren. Nieke [18] formulierte das Ergebnis, daß die Divergenz des Lichtes vor der Beugung (Winkel vom Beugungsspalt aus zu den Grenzen der Lichtquelle oder des Beleuchtungsspalt) voll auf die Seite der Beugungsfigur übertragen wird als Unschärfe. Eine Beugungsfigur sieht mit konventionellen- oder Laser-Lichtquellen gleich aus, wenn die beteiligten Frequenzen berücksichtigt werden. Es ergibt sich also hieraus kein Hinweis auf Ordnungszustände, worauf die Bezeichnung Kohärenz als Zusammenhang hinweist. Deshalb schlug Nieke [18] die Bezeichnung Interferenz-Winkelbedingung vor.

Die Beugungsfiguren zeigen periodische Verteilung der Photonen. Wird die Interferenz-Winkelbedingung nicht erfüllt d. h. der Winkel zum Beleuchtungsspalt ist größer als der Winkel zum Abstand benachbarter Beugungsstreifen, so wird die Beugungsfigur unscharf oder verwaschen und ist nicht mehr auswertbar. Im Sinn der Synergetik wäre dies der Zustand der Unordnung oder des Chaos. Will man dieses Chaos ergründen, so muß man die Interferenz-Winkelbedingung erfüllen, das heißt, der Winkel aus dem das Licht kommt, muß eng begrenzt werden, d. h. es ist ein deterministisches Chaos.

4. Die Beugung als Problem der Synergetik

Newton [5] konnte mit Lichtteilchen die Beugung nicht begründen, denn seine Mechanik kennt keine Kraft, die eine Ablenkung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung bewirkt. Nach Young [19] ging das gebeugte Licht nur von jeder Kante aus, das war ein Rückschritt gegenüber Newton, denn das gebeugte Licht kommt in der Tat aus der Umgebung der Kante ($< 0,1$ mm je nach Apertur). Die Annahme der Interferenz dieser Randstrahlen führte beim Doppelspalt und Gitter in großen Entfernungen zur Übereinstimmung mit den Experimenten. Beim Spalt jedoch konnte Fresnel damit keine Übereinstimmung erzielen, wie man leicht nachprüft. Eine Übereinstimmung versuchte Fresnel [14] mit dem Huygensschen Prinzip zu erreichen, aber das war wie im Abschnitt 1 beschrieben, nur mit einer unzulässigen und falschen Extrapolation möglich mit dem Satz: 'Der Spalt begrenzt eine Wellenfront und jeder Punkt dieser Wellenfront wird zum Ausgangspunkt einer neuen Kugelwelle'. Fresnel [14] hatte ausdrücklich bestätigt, daß er sich überzeugt habe, daß gebeugtes Licht nur von der Kante kommt. Er hatte aber bemerkt, daß das Gebiet zwischen den Bereichen, aus denen gebeugtes Licht kommt, nicht abgedeckt werden darf, denn dann entsteht die Beugungsfigur des Doppelspalt. Nach der hier vertretenen Deutung darf das Feld der gebeugten Photonen nicht abgedeckt werden.

Nach Nieke [2] erfolgt die Richtungsänderung bei der Beugung durch Wechselwirkung des Photons mit Struktur mit seinem Feld, wenn dieses unsymmetrisch behindert ist nach Gesetzen der Wirbeldynamik. Es besteht also ein deterministischer Vorgang, wozu man aber den Ort, d. h. die Entfernung zur Kante kennen müßte, in dem Photon und Feld die Spaltebene passierte. In der Schlierenapparatur entsteht als Spaltbild jeder Kante je ein Doppelstreifen mit schmalen dunklen Zwischenraum (insgesamt $< 0,1$ mm) am Ort jedes Kantenbildes. Nieke [4] konnte einen Zusammenhang zwischen dem Ort im Spaltbild in einer Schlierenapparatur und der Ordnung der Beugungsfigur, durch Abdeckversuche in der Ebene der Abbildungsoptik, nachweisen. In der Schlierenapparatur nach Abbe entsteht als Bild jeder Kante ein Doppelstreifen mit einem schmalen dunklen Streifen am Ort des Kantenbildes. Er wies aber ausdrücklich darauf hin, daß damit nicht der Ort bestimmt ist, in dem das Photon die Spaltebene passierte. Das schattenseitig gebeugte Licht ist nämlich nach Nieke [3], [4] und [20] schattenseitig versetzt, es scheint von der Spaltbacke zu kommen. Es ist anzunehmen, daß der schmale dunkle Streifen am Ort des Kantenbildes in der Schlierenapparatur die Spur dieses Lichtes ist. Einen Ort innerhalb der Ordnung zu bestimmen, gelang nicht, denn an der Abdeckebene entsteht merkliche Beugung, wenn nicht im Minimum der Beugungsfigur abgedeckt wird. Nieke [4] und [21] wies nach, daß Licht, das

den mittleren Teil des Spaltes passierte, (nach der hier vertretenen Anschauung deren Photonen und Feld,) die nullte Ordnung der Beugungsfigur bilden.

Dirac [22] folgerte aus der Tatsache, daß bei Beugung und Interferenz die gleiche Figur erscheint, wenn jeweils nur ein Photon in der Apparatur sein konnte, daß jedes Photon nur mit sich selbst interferiert.

Eine Beugung des Photons tritt danach auf, wenn das Feld dieses Photons unsymmetrisch behindert zum Photon zurückläuft, wobei jedes Photon nur mit seinem Feld wechselwirkt. Der Ort, an dem das Photon den Spalt durchläuft, und die Art in der das rücklaufende Feld begrenzt wird, entscheidet den Ort in der Beugungsfigur. Nach vorliegenden Ergebnissen besteht kein Einfluß der Phase des Photons, etwa in der Spaltebene. Der Vorgang ist also deterministisch, die Wechselwirkung des Photons mit Struktur mit seinem Feld ist also der synergetische Vorgang. Sichtbar ist die periodische Struktur der Beugungsfigur nur bei Erfüllung der Interferenz-Winkelbedingung.

Die Periodizität der Photonen, d. h. deren Frequenz, bedingt durch phasenbestimmte Wechselwirkung mit dem Feld eine periodische oder synergetische Beugungsfigur durch Richtungsänderung der Photonen.

5. Die Interferenz als Problem der Synergetik

Es soll hier nur die Interferenz von Licht aus konventionellen Lichtquellen oder Laserlicht betrachtet werden, das nach einem Strahlungsteiler interferierte. Nach der hier vertretenen Anschauung teilt der Strahlungsteiler (Reflexion-Brechung, halbdurchlässiger Spiegel, Doppelabbildung, Teilabdeckung, Streuung) das Photon von einem Teil seines Feldes.

Newton [23] begründete seine Interferenzringe am Plattenpaar, daß die Lichtteilchen 'fits' (= Passungen und nicht Anwandlungen) haben als periodische Dispositionen zu Brechung oder Reflexion. Dies scheint in der Tat die einzige Möglichkeit einer Deutung, denn alle Anordnungen der Interferenzen gleicher Dicke zeigen nach Nieke [24] in einer Schlierenapparatur keine Aufhellung, es tritt also keine Richtungsänderung auf, und es bleibt nur die Änderung der Anteile von Reflexion und Brechung. Eine Auslöschung scheidet aus, denn die beiden Ausgänge von Newtonschen Plattenpaar und Mach-Zehender Interferometer verhalten sich wie Positiv und Negativ, es wird also nur zwischen Brechung und Reflexion variiert. Es bleibt also nur die Möglichkeit der Newtonschen Deutung, die nach dem hier vertretenen Modell gedeutet wird als Wechselwirkung von Photon mit Struktur und seinem Feld, was je nach Phasendifferenz die Anteile von Reflexion und Brechung steuert.

Bei Interferenzen gleicher Neigung (z. B. Lummer-Gehrcke Platte) tritt in der Schlierenapparatur eine Aufhellung ein, hier ist eine Richtungsänderung des Lichtes anzunehmen, und die Interferenzfigur ist wie bei der Beugung zu deuten, etwa wie am Gitter.

Bei der Betrachtung der Interferenz kommt also als Erscheinung der Synergetik hinzu, daß mit der Wechselwirkung von Photon mit seinem Feld auch der Anteil von Brechung und Reflexion entsprechend der Phasendifferenz geändert werden kann.

6. Die induzierte Emission als Problem der Synergetik im Laser

Haken [25], [26] und [27] behandelte das Licht im Laser als Welle. Die vorhergehenden Abschnitte haben aber gezeigt, daß es jetzt an der Zeit ist, die Erklärung mit Licht bestehend aus Lichtquanten zu versuchen.

Bei der stimulierten Emission soll ein fast fertiges Photon durch ein anderes Photon ausgelöst werden, und beide setzen dann den Weg mit gleicher Frequenz und Phase gemeinsam hintereinander fort. Kapitza u. Dirac [28] schlugen vor, mit Elektronenstrahlen senkrecht zum Laser dies zu untersuchen, was Schwarz [29] ausführte. Es wurde der Laserstrahl als ein 'Lichtkristall' bezeichnet, die Photonen haben also den Abstand der Wellenlänge (besser als Identitätsabstand bezeichnet) oder ein Vielfaches davon.

Nach spontaner Anregung durch Licht oder Elektronenstoß wird durch die beiden Spiegel am Ende der Röhre oder des Laserkristalls, wie bei Haken erläutert, eine (oder mehrere) Frequenz und Mode ausgewählt, die sich mit passenden Phasenbedingungen durchgesetzt hat. Dabei muß, wie bekannt, die Laserschwelle überschritten werden. Es muß bei dem Aufbau des Photons entsprechend dem ersten Abschnitt und nach Nieke [30] erwartet werden, daß ein Photon im 'status nascendi' vom dominanten Feld beeinflusst werden kann, was Haken als 'versklavt' bezeichnete. Hinweise hierzu ergaben Experimente mit dem Einatomlaser, worüber Remppe [31] berichtete. Danach wird die natürliche Lebensdauer von der Umgebung 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.

Dirac [22] begründete die Interferenz des Photons nur mit sich selbst, also nach der hier vertretenen Anschauung der Wechselwirkung des Photons mit seinem Feld. Dagegen folgerten Richter, Brunner u. Paul [32], daß im Laserlicht ein Photon auch mit einem Photon interferieren kann, wenn dieses die gleiche Frequenz und Mode hat. Dazu hatte Magyar u. Mandel [33] Interferenzen ohne Strahlungsteiler beobachtet, wenn die beiden Laser hinreichend moden- und phasenstabilisiert waren. Die Photonen im 'status nascendi' sind, von der Wärmebewegung der Atome abgesehen, ortsfest, das fertige Photon mit vorgegebener Phase läuft hingegen mit Lichtgeschwindigkeit vorzugsweise in Richtung der Laserachse.

Nieke [34] vermutete nach Ergebnissen von Hanbury-Brown u. Twiss [35] auch bei thermischen Lichtquellen einen (kleinen) Anteil an stimulierter Emission.

7. Ergebnisse

Die spontane Emission erlaubt nur die Wechselwirkung jedes Photons mit seinem Feld, was auch als Selbstwechselwirkung bezeichnet wird. Dies wäre eine deterministische Wechselwirkung, bedingt durch die phasenabhängige Rückkehr des Feldes zum Photon als Richtungsänderung oder Beeinflussung zu Reflexion oder Refraktion.

Die induzierte Emission bewirkt einen Ordnungszustand der Photonen, und daß das Feld mit jedem Photon der gleichen Frequenz und Mode wechselwirkt, auch mit dem Photon im 'status nascendi'. Dies könnte man als synergetische Wechselwirkung bezeichnen. Als Quelle der Synergetik ist hier die Synchronisierung der Photonen im 'status nascendi' durch das dominante Feld, so kann ein 'Lichtkristall' entstehen.

In der nichtlinearen Optik, bei sehr hoher Photonendichte, ist eine Wechselwirkung der Photonen miteinander anzunehmen. Das entspricht der allgemeinen Wechselwirkung, mit vielen neuen und auch synergetischen Effekten.

Man könnte sagen das ist nichts Neues: Mit Ordnung der Beugungsstreifen, Phasendifferenz und Ordnung der Strahlung konnte man dies formal auch erklären. Das ist richtig, aber jetzt kann man das begründen. 1. Mit der Richtungsänderung der Photonen, 2. Mit periodisch beeinflussten Anteil zur Reflexion und Refraktion und 3. im Laser durch Synchronisierung der Photonen im 'status nascendi'.

Literaturverzeichnis

- [1] N. Bohr, A. W. Kramers u. I. C. Slater, Z. Phys. **24** (1924) 69; Phil. Mag. **47** (1924) 785.
- [2] H. Nieke, Newtons Beugungsexperimente und ihre Weiterführung. Arbeit 12.
- [3] Wie [2], Arbeit 1.
- [4] Wie [2], 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; Bourgois, Paris 1989.
- [6] 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.
- [7] A. Sommerfeld, Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. II, Mechanik der deformierbaren Medien. Akad. Verlagsges., Leipzig 1945, S. 153-156.
- [8] A. Sommerfeld, Atombau und Spektrallinien. Bd. II. Vieweg, Braunschweig 1960. {vgl. Gl. (I.1.5) und (I.6.9a)};
Atomic Structure and Spectrallines. Transl. L. Brose, Methuse, London 1923, 1930, 1934.
- [9] E. Schrödinger, Abhandlungen zur Wellenmechanik Barth, Leipzig 1927;
Collected Papers of Wave Mechanics. Blacki, London, Glasgow 1928.
- [10] L. de Broglie, La Physique quantique restera-t-elle indéterministe? Cauthier-Villars, Paris 1953; Phys. Bl. **9** (1953) 486, 541.
- [11] M. Born, Physics in my Generation. Pergamon, London New York 1956;
Physik im Wandel meiner Zeit. Vieweg, Braunschweig u. Akademie-Verlag Berlin 1958. S. 35.
- [12] E. Mach, Die Prinzipien der physikalischen Optik. Barth, Leipzig 1921, S. 185-226.
- [13] Wie [2], Arbeit 5.
- [14] A. J. Fresnel, Oeuvre Complètes I. Paris 1866;
Abhandlungen über die Beugung des Lichtes. Ostwalds Klassiker Nr. 215, Engelmann, Leipzig 1926.
- [15] Wie [2], Arbeit 6.
- [16] A. Smekal, Naturwiss. **11** (1923) 973.
- [17] E. Berge, Math. naturwiss. Unterricht **27** (1974) 326.
- [18] Wie [2], Arbeit 4.
- [19] T. Young, A course of lectures on natural philosophy and mechanical arts. London 1807.
- [20] Wie [2], Arbeit 3.
- [21] Wie [2], Arbeit 11.
- [22] P. M. A. Dirac, Die Prinzipien der Quantenmechanik. Hirzel, Leipzig 1930;
The Principles of Quantum Mechanics. Clarendon, Oxford 1935, 1947.
- [23] Wie [5], aber nicht Buch III, sondern Buch II.
- [24] Wie [2], Arbeit 8.
- [25] H. Haken, Erfolgsgeheimnisse der Natur. Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken. 1. Aufl. Nr. 34220, 1981, 2. Aufl. Ulstein Sachbuch Nr. 34725 Frankfurt/Berlin 1991. Kap. 5.

- Synergetics - In Introduction. Berlin / Heidelberg 1978.
- [26] H. Haken u. A. Wunderlin, Die Selbstwechselwirkung der Materie. Vieweg Braunschweig 1991. Kap. 4.
 - [27] H. Haken, Licht und Materie. Mannheim 1981.
 - [28] P. L. Kapitza a. P. A. M. Dirac, Proc. Cambridge Phil. Soc. **28** (1933) 287
 - [29] H. Schwarz, Z. Phys. **204** (1967) 276; Phys. Bl. **26** (1970) 436.
 - [30] Wie [2], Arbeit 13.
 - [31] G. Rempe, Phys. Bl. **51** (1995) 383; Phys. Rev. Lett. **58** (1987) 353; **64** (1990) 2783.
 - [32] G. Richter, W. Brunner u. H. Paul, Ann. Physik (7) **14** (1964) 339.
 - [33] G. Magyar a. Mandel, Nature **198** (1963) 255.
 - [34] Wie [2], Arbeit 15.
 - [35] B. Hanbury-Brown a. R. Q. Twiss, Proc. Roy. Soc. London **242** (1957) 300; **243** (1958) 291.