Erläuterungen zur Problematik Dualität Korpuskel - Welle

Dr. W. Tenten September 2006

Die Antworten auf meinen Beitrag “Warum ist c endlich und durcheilt den freien Raum” zeigten doch, dass es notwendig ist einige Sachverhalte noch etwas deutlicher zu erklären.

Die erste Antwort “Quantentheorie des freien EM Feldes” sollte zeigen, dass seitens der theoretischen Darstellung oder Herleitung die Welle als ein Ergebnis der Feldbetrachtungen herauskommt. Andererseits, wie unten dann erläutert wird sind auch die Impulsbetrachtungen relevant. Ein Impuls ist eine Masse-bedingte Erklärung. Damit baut sich ein Konfliktpotential auf, daß gerade in der Lehre eine sehr hohe Verständnishürde darstellt. Diese Dualität zwischen Welle und Korpuskel ist es, welche die Physik im Quantenraum so schwer zu verstehen läßt.

Dieses Nebeneinander dieser beiden Erscheinungsfomen macht auch den Physikern Probleme, denn einerseits sind Messungen von Nöten, um Theorien zu beweisen, andererseits sind Beobachtungen vorhanden, welche mit den bekannten Theorien in Einklang zu bringen sind. Immer wieder liest man: die Physik muß umgeschrieben werden, wenn mal wieder ein Kollegenteam etwas ganz außergewöhnliches „ausgebuddelt“ oder „ausklamüsert“ hat. Dann kann es passieren, daß, wie ich es gerne ausdrücke „nix zu gar nix passt“. Soll heißen:

1. Die Theorien sind nicht tauglich diesen Effekt zu beschreiben
2. Die Effekte sind durch völlig neuartige Ansätze beschreibbar, jedoch diese sind nicht im Einklang mit der Theorie
3. Die Theorie ist nicht vollständig und es bedarf einer Ergänzung, damit diese Effekte beschreibbar werden. Jedoch zeigt sich, daß diese Ergänzung wiederum einige bereits bekannte Dinge in einem neuartigen oder andersartigem Licht erscheinen läßt.

Diese Dinge sind allen hinreichend aus der Presse bekannt.

Ich versuche jetzt mal, diese Dualität zu erklären ...möglichst ohne viel Theorie und werde auch ein paar wenige Beispiele als MAPLE files beilegen.

1. Der oder das Lichtquant oder die Korpuskelsicht

Der name Korpuskel kommt aus dem Latein: corpus, corpus (langes u) m, der Körper.
Newton entwickelte die Korpuskeltheorie, Huygens die Wellentheorie. Beides wurde bereits im 17. Jahrhundert geschrieben.
Die geradlinige Ausbreitung und die Reflexion läßt sich mit beiden Theorien beschreiben. Die Brechung des Lichts läßt sich dagegen nur mit der Wellentheorie darstellen.
Im 19. Jahrhundert kam die Elektrodynamik durch James Clark Maxwell ins Spiel. Das Licht wurde als elektromagnetische Welle gedeutet. Das schien die Wellentheorie offenbar zu bestätigen.
Heinrich Hertz 1887 leitete eine Entwicklung ein, welche verdeutlichte, daß das Licht in Abhängigkeit der Fragestellung als Teilchen oder als Welle beschrieben werden muß.
Die Teilchen des Lichts wurden ab dieser Zeit Lichtquanten oder Photonen genannt. Das nebeneinander Existieren wurde als Dualismus des Lichts bezeichnet.

Beschreibung nur mit Lichtquanten möglich

- Photoelektrischer Effekt

Licht “löst” Ladungsträger (Elektronen) aus einer Oberfläche, deren Energie durch die Frequenz des eingestrahlten Lichte gegeben ist. Erhöhung der Lichtintensität: mehr Elektronen werden emittiert, die Energie bleibt konstant.

- Der Compton Effekt
  Streuung von Röntgenstrahlen an Elektronen macht sich durch eine Frequenzverschiebung bemerkbar, deren Größe durch den Streuwinkel gegeben ist. Dies wurde 1923 von Compton entdeckt und gleichzeitig von ihm und Debije auf Basis der Photonenvorstellung erklärt.
- Ritz'sches Kombinationsprinzip
  Wird von Atomen emittierte Strahlung untersucht, so zeigt sich, daß es im Atom Übergänge (..der Elektronen) gibt zwischen denen sich diskrete Energiezustände finden. Mit der Frequenzbedingung h/(2 π) omega ergibt sich die Erklärung für dieses Ritz'sche Kombinationsprinzip. Es werden Serien festgestellt: Lyman, Paschen, Balmer Serie genannt, die Übergänge von verschieden hohen Energieniveaus zu einem gemeinsamen Grundzustand aufweisen.
- Franck-Hertz Versuch
  Das Experiment besteht aus einer Elektronenröhre mit Quecksilberdampf gefüllt. Der durchgehende Strom wird als Funktion der anliegenden Spannung gemessen. Es zeigt sich eine wellenartige Zunahme dieser Strom-Spannungs Charakteristik. Die Maxima liegen immer im Vielfachen von 4.9 eV.
- Stern-Gerlach Versuch
  1921 wurde dieses Experiment durchgeführt. Es zeigt die Aufspaltung eines Atomstrahls innerhalb eines inhomogenen magnetischen Feldes. Besitzt ein Atom ein magnetisches Moment, so wird in einem inhomogenen magnetischen Feld nicht nur ein Drehmoment, sondern auch eine Kraft ausgeübt. Im Originalversuch wurde ein Strahl neutraler Silberatome durch ein inhomogenes Magnetfeld geschickt und die Verteilung der Atome nach dem Felddurchgang gemessen. Ohne Feld zeigte sich eine Gauss'sche Verteilung, mit dem Feld zeigte sich eine Aufspaltung mit 2 Maxima, symmetrisch zum Maximum der Gausskurve und einem Minimum exakt dort, wo die Gaußkurve ihr Maximum hatte. Die her auftretende Quantelung wird als Richtungsquantelung bezeichnet. In Wahrheit stellt sie eine Quantelung des Drehimpulses dar, was jedoch erst später festgestellt wurde.
- Strahlungsgesetze
  Planck gelang es 1900 durch Einführung einer neuen Konstante h genannt eine Interpolation er gesetze von Wien sowie Rayleigh-Jeans zu finden. Sein Strahlungsgesetz überdeckte den gesamten Frequenzbereich und enthielt die beiden anderen gesetze als Grenzfälle. Zunächst hatte Planck dies als reine Interpolationsformel aufgefasst und erst viel später erkannte er, daß es sich hier um einen diskontinuierlichen Energieaustausch zwischen der Strahlung und einem schwarzen Körper handelte.

1. Eine sehr schöne Internetseite dazu ist:

http://www.lexikon-definition.de/Plancksches_Strahlungsgesetz

Werner Heisenberg schreibt in seinem Werk „Physikalische Prinzipien der Quantentheorie“, erschienen unter ISBN 3-411-00001-5 des S.Hirzel Verlags in Stuttgart 2 große Kapitel: „Kritik der physikalischen Begriffe des Partikelbildes“ und „Kritik des physikalischen Begriffes des Wellenbildes“ dass für beide im Wesentlichen die Unschärferelation Hesienbergs verantwortlich ist. Diese Unschärfe beschreibt nicht nur eine Unschärfe in Koordinaten, mit anderen Worten: eine Unschärfe des Aufenthaltsortes, sondern auch eine Unschärfe in der Darstellung des Geschehens an sich: mechanische Vorstellung (Ort, Geschwindigkeit, Energie) oder Wellenvorstellung (Amplitude, Phase, Frequenz). Letztere unterscheidet sich dann noch in Maxwell'sche oder de Broglie'sche Darstellung. Hier wird die Energie bzw. der Impuls im Sinne der Feldstärkenbeziehungen gesehen.

Beschreibung nur mit Wellen möglich

De Broglie Welle

Indem de Broglie den Lichtteilchen neben der Korpuskel-Eigenschaft die Welleneigenschaft zusprach, zeigte er, dass Beugungserscheinungen erklärbar werden. Einem Teilchen der Masse m welches sich im feldfreien Raum gleichförmig mit der Geschwindigkeit v bewegt, wird eine Korpuskel-Eigenschaft eines Impulses p und einer Energie E zugesprochen. Im Wellenbild wird dieser Masse eine Frequenz ν (E-Techniker sagen f) sowie einem Wellenvektor k zugesprochen. Wenn es dabei um 2 verschiedene Anschauungen desgleichen Objekts handelt, müssen die charakterisierenden Größen die Beziehungen
$E = h/(2\pi)\ \nu = h/(2\pi)\omega$ sowie $p = h/(2\pi)\ k = h(l\ k/abs(k)$
besitzen. Dann wird jedem Teilchen eine, bis auf den Amplitudenfaktor zugeordnete ebene Welle zugewiesen. Nach de Broglie ist diese Zuordnung:
$\lambda = h/p = h/(mv)$
wobei die zweite Beziehung nur für Teilchen mit einer Ruhemasse > 0 gilt.

Schrödinger Gleichung

Die Entwicklung der Schrödinger'schen Gleichung ist hier ebenfalls zu nennen. Hier wird die Energie über die 3 Raumkoordinaten als Beschleunigung aufgefasst sowie über die zweite Ableitung der Wellenfunktion zur Zeit aufgefasst. Da aber beide Energien gleich sind, werden beide Seite gleichgesetzt und führen damit zur Anschrift der bekannten Schrödinger-Gleichung.

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2}=\Delta \Psi=\frac{1}{c^2}\cdot\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$$

Dies ist die „einfache“ Form der Anschrift. Die Schrödinger Gleichung wird oft auch als Exponentialfunktion geschrieben:

$$\hat{H}\,\Psi(\vec{r},t)=i\,h\frac{\partial \Psi(\vec{r},t)}{\partial t}$$

$$mit:\ \ \Psi(\vec{r},t)=A\,e^{\frac{-i}{h}(E\,t-\vec{p}\,\vec{r})}$$

Die hier dargestellte Wellenfunktion Ψ ist die Darstellung der deBroglie Welle.Die Schrödingergleichung ist übrigens keine relativistische Gleichung.

De Broglie und auch Schrödinger beschreiben die Welle als zeitlich fortschreitenden Verlauf einer zeitlichen Elongation (Auslenkung) eines Vektors mit Phase und Frequenz. Das entspriche der vorstellung ebener Wellen wie Wasserwellen oder Luftwellen.

Maxwell Welle

Maxwell zeigte die gegenseitig zeitliche Abhängigkeit des elektrischen Feldes vom magnetischen Fels und umgekehrt. Aus diesen Abhängigkeiten hat er die Vorstellung einer ***elektromagnetischen Welle*** gewonnen. Maxwell im Gegensatz zu de Broglie bzw. Schrödinger beschreibt damit eine auf physikalischen Grundlagen beruhenden Erscheinung, welche sich „eben“ wellenförmig ausbreitet. Diese Wellen Ausbreitung wurde von Poynting verfeinert und führte damit zum Verständnis des heutigen elektromagnetischen Spektrums, zu dem unter anderem Licht-, Radar-, Radio-, Fernseh-Wellen gehören.
Die Welle zeichnet sich in diesem Bild dadurch aus, daß sie aus der mathematischen Eigenschaft der imaginären Exponentialfunktion hervorgeht, denn diese läßt sich mit Hilfe der Euler Relation in einen sinus sowie cosinus Anteil (letzterer ist imaginär) zerlegen.

2. Teilchen (Masse) – Welle Dualität

Mit diesen Erkenntnissen konnten die Physiker diese Dualität Teichen-Welle langsam, aber unaufhaltlich akzeptieren und damit arbeiten. Viele Erkenntnisse, wie Beugung von Materiewellen, statistische Deutung von Materiewellen bis zur Quantenmechanik konnten gewonnen werden. In der Quantenmechanik zu nennen sind die Erkenntnisse:
Mittelwerte in der Quantenmechanik, das Superpositions-Prinzip der Quantenmechanik, die Heisenberg'sche Unschärferelation sowie die mathematischen Verfeinerungen der Quantenmechanik auszugsweise zu nennen. Die Quantenmechanik bedient sich damit beider Vorstellung, je nach Fragestellung. Andererseits ist auch das Unschärfeprinzip wirksam, welches wiederum keine eindeutige Lösungen zuläßt, sondern nur statistische Lösungen.

Diese Dualität macht vielen, welche sich mit dem Thema Quantenmechanik beschäftigen zu schaffen. Man muss sich in der Tat sehr daran gewöhnen das eigene Verständnis, die Anschaulichkeit und auch die Übersichtlichkeit, welche man aus der klassischen Physik gewohnt ist zu vergessen. Die Welt hat durch diesen Dualismus ein völlig neuartiges, ja teilweise nur sehr schwer vermittelbares Angesicht erhalten.

MacLane fragte:

Einmal heisst es, elektromagnetische Strahlung gibts nur, wenn Elektronen durch ein "Medium" fliegen.
Dann heisst es, elektromagnetische Strahlung gibts, wenn ein Elektron seinen Quantensprung macht.
Dann heisst es, elektromagnetische Strahlung gibts nur, wenn Elektronen beschleunigt werden

Ja wie denn, was denn nun?
Dass bei der Impulsweitergabe, von der Wilfried sprach, auch Beschleunigungskärfte wirken, seh ich ja noch ein.
Aber doch nicht, wenn das Elektron von einer Bahn auf die andere "hüpft", oder doch?

Die Antwort darauf ist folgende:

Lassen wir in dieser Fragestellung den Zusatz: “gibts nur” weg. Die verschiedenen Effekte, über die ich erzählte sind unter gewissen Fragestellungen so erklärbar. Damit reflektiere ich auf die oben erwähnten Unschärfen.

“Fliegen” Elektronen durch ein Medium werden diese abgebremst, wenn sie in das Medium “hineinfliegen” oder “aufprallen”. Stichwort: Röntgenbremsstrahlung

Wenn ein elektron einen Quantensprung macht, gibt es Strahlung. Stichwort: Lyman, Balmer, Paschen Serie, Laser, Maser

Wenn Elektronen beschleunigt werden gibt es Strahlung. Stichwort: Radiosender jeder Art (energetisch bedingte hochfrequente Ladungsträger verursachen eine Wellenablösung an der Antenne; Klystrone, Magnetrone, Teilchenbeschleuniger, Sender für Radio, Fernsehen etc.
Auch Dinge wie Wirbelströme gehören hier genannt. Viele der Effekte im Weltall, wo sehr große Energien Gase aufheizen oder wo Sterne beginnen Stern zu werden sind mit dem Thema Wirbelstrom behaftet. Starke magnetische Felder bewirken eine Strominduktion in plasmatische Zustände von Materie. Unter Plasma versteht man ein geladenes Gas, Ionen beispielsweise oder in Radioröhren sieht man bei Verstärkerröhren ein bläuliches Leuchten: Elektronenplasma. Dieses Leuchten rührt von der Wärmeeinfuhr durch Ursache des Wirbelstromsher. Diese Wärmeeinfuhr

bedingt, daßss Elektronen angeregt werden zu einem höherenergetischen Energieniveau hin und von diesem wiederum durch Aussendung von Licht (Restenergie) auf ihr Normalniveau zurückfallen. Das Leuchten von interstellaren Gaswolken ist häufig auf Wirbelstromeinträge zurückzuführen.

„breaker“ hat die maxwellgleichungen gesucht, gefunden und hier aufgeschrieben. Aber er sagt, daß er den Zusammenhang nicht richtig versteht, den Zusammenhang, welcher mit den vektoriellen Kreuzprodukten zu tun hat (so verstehe ich seine Unsicherheit).

Antwort: Hier zeigt sich diese Dualität von der Wellenseite und darin von der Maxwell Darstellung. Wie oben beschrieben ergibt sich eben diese zeitliche Bedingung der elektrischen zur magnetischen Komponente. Die Lösung solcher Differentialgleichungen sind komplexe Exponentialfunktionen, welche sich in sinus- und imaginäre cosinus Anteile zerlegen. Hier ist auch die Fourierzerlegung angesprochen. Ist die zeitliche Variation kurz genug erfolgt eine Ablösung dieser Wellen vom leitenden Medium (Draht in der Regel) in den Raum hinein. Das nennt man Abstrahlbedingung und bildet ein großes Kapitel in der Elektrodynamik.

AlTheKingBundy bemerkte in einer Antwort, nachdem er das Viererpotential, die magentische Feldstärkedichte sowie das elektrische feld erwähnte: „*Man benötigt im Vakuum also keinerlei Ladung zur Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle auch keine Quantenmechanik oder ein brodelndes Vakuum*“.

Antwort: Das ist ein mutiger Satz, denn er setzt die Maxwell'schen Beziehungen außer Kraft. Hier ist eine deutliche Positionierung von ihm auf ein fixes Weltbild passiert. Al bezieht sich auf das Kospuskelbild: ***es muß ETWAS (ladungen) da sein, damit ETWAS (EM Welle) passiert, nir im vakuum passiert das nicht.*** Mit seinem Attribut „also“ stellt er dieses in Frage, was auch richtig ist. Auch hier sei wieder an das erinnert, was ich oben erklärte. Die Quantentheorie bedient sich der Unschärfe und verlangt vom Nutznießer dieser Theorie eine reaktion nach dem Motto: „Fähnchen in den Wind“. Ja, das ist so, hier muß die Fragestellung die Positionierung bedingen. Das ist eben die Schwierigkeit in dieser Quantenwelt. Al sagt das ja auch etwas in einerm etwas späteren Beitrag.

Fazit aus Euren Antworten:

Ihr habt einen sehr interessanten Kanon mit vielen Möglichkeiten der Interpretation genannt und ihr habt in sehr vielen Punkten auch recht. Das fand ich eine ganz beachtliche Leistung, sich so in dieses sehr schwere Feld reinzuhängen. Zeigt, daß ich ja eine Menge versteht. Abschließend habe ich noch 2 Beispiele zu Korpuskel Bild sowie Wellen Bild als Maple files beigelegt.

3. Zwei Beispiele zu Korpuskel und Welle

Ich lege zwei MAPLE files bei, die Euch zeigen sollen, wo eigentlich die Unterschiede sind und vor allem wie sich diese Wellen ausbreiten. Für alle diejenigen, welche kein MAPLE haben werde ich die Bilder in diesem Beitrag kopieren. Der kurze Text verweist auf diese Ausarbeitung.

1. file: bio_savart.mws Eine Spule und ihre elektrischen und magnetischen Feldlinien. Das ist ein Beispiel für die Wellengleichung
2. file: welle3d.mws Eine Welle wird an einem Spalt gebrochen (mit Animation). Das ist ein Beispiel für die Korpuskeldarstellung