

Photonen in der Schulphysik

Oliver Passon

Die Entwicklungen der modernen Physik in unserem Jahrhundert stellen die Physikdidaktik vor große Herausforderungen. Es gilt, die physikalischen Konzepte aus dem aufwendigen mathematischen Apparat von Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie (QFT) herauszuarbeiten.

Die Optik als klassisches Gebiet der Schulphysik bietet natürliche Anknüpfungspunkte an Konzepte der Quantentheorie (Wahrscheinlichkeitsdeutung, Austauschteilchen). Eine elementare Darstellung der Quantenfeldtheorie des Elektromagnetismus bietet das kleine Bändchen „QED The Strange Theory of Light and Matter“ von *Feynman*. /1/ Der dort entwickelte Zeigerformalismus bietet die Möglichkeit einer Diskussion zahlreicher optischer Phänomene mit Hilfe eines Regelwerkes aus gewichteter Summation von Wahrscheinlichkeitsamplituden für verschiedene Lichtwege. Die eigentliche Stärke von *Feynmans* Darstellung liegt in ihrer Konsistenz: Der Wechsel zwischen verschiedenen Erklärungsmodellen wird vermieden. Es wird jedoch auch deutlich welchen Preis die Physik dafür zahlen mußte, denn die Anschaulichkeit der Deutung wurde vollends eingebüßt. Nicht ganz zu Unrecht zieht die moderne Physik deshalb die Kritik auf sich, zu einem Formalismus der Beschreibung und Berechnung geworden zu sein, der die betrachteten Phänomene nicht intellegibel macht. Es sind zahlreiche Dokumente der Begründer der Quantenmechanik überliefert, die ausdrücken wie schmerzhaft dies erfahren wurde. /2/

An dieser Stelle kommt der Frage der Motivation dieser abstrakten Konzepte entscheidende Bedeutung zu,

denn offensichtlich ist niemand bereit die Anschaulichkeit und Plausibilität einer Welterklärung leichtfertig zu opfern. Im Falle der QED ist dies vor allem die Frage nach der Einführung des Photonen Konzeptes. *Feynmans* Darstellung beginnt mit dem Hinweis, daß die diskreten Signale eines Photomultipliers unter dem Einfall immer schwächeren Lichts dessen Teilchennatur offenbart.

Von vergleichbarer Qualität ist der Hinweis auf die körnige Struktur eines belichteten schwarz-weiß Negativs /3/ oder ganz allgemein auf den Photoeffekt, also das Herauslösen von Elektronen aus einem Festkörper unter Lichteinfall. Dieser Effekt wird in fast allen Darstellungen der Quantenmechanik (zusammen mit dem *Compton*-Effekt) in den Rang eines Schlüsselexperiments für die Teilchennatur des Lichts erhoben.

Photoeffekt ohne Photonen

Dabei fehlt in der Regel der Hinweis, daß der Photoeffekt auch ohne Photonen erklärt werden kann, nämlich in der halbklassischen Näherung (siehe etwas /4/ oder /5/). Ähnlich wie bei der Diskussion des Wasserstoffs in der nicht-relativistischen Quantenmechanik finden hier die klassischen Feldgrößen Eingang in den Potentialterm der *Schrödingergleichung*. Eine Quantisierung des Strahlungsfeldes ist an dieser Stelle also nicht zwingend, vielmehr ergeben sich bei der Deutung des Lichtelektrischen Effekts mit Photonen Probleme bei der Erklärung der beobachtbaren Winkelverteilung. /5/ Vor allem verleitet diese Erklärung jedoch zu einer Fehlvorstel-

lung von Photonen als Korpuskeln. Dies steht in eklatantem Widerspruch zur QED, denn tatsächlich sind die Feldquanten noch nicht einmal unscharf lokalisiert. Bei Wechselwirkung mit Materie verringert das Feld zwar seine Energie um einen diskreten Betrag, diese Energie war vorher jedoch nicht einem bestimmten Raumbereich zugeordnet. Photonen sind als Anregungszustände des Feldes vollkommen unlokalisiert, und ihre Energie und Impuls gehören dem gesamten Raumbereich an, den das Strahlungsfeld einnimmt.

Die herkömmliche Deutung des Effekts scheint sich auf *Einstein* zu beziehen, man beachte aber an dieser Stelle den vorsichtigen Titel seiner Arbeit von 1905 „Über einen die [...] Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“. *G. Simonsohn* erwähnt hierzu: /6/

„[...] ja, wenn es dabei geblieben wäre, bis die moderne Physik den ‚heuristischen Gesichtspunkt‘ in eine umfassende Theorie einordnen konnte! Aber es blieb nicht dabei [...]. Der ‚heuristische Gesichtspunkt‘ für die ‚Verwandlung‘ wurde auf die Ausbreitung des Lichts, auf das Strahlungsfeld selbst, ausgedehnt. Zu einer Zeit aber, als Quantenmechanik oder gar Quantenelektrodynamik noch nicht in Sicht waren, mußte die Vorstellung von Lichtquanten im Strahlungsfeld zumindest in die Nähe von *Newtons* klassischen Lichtteilchen führen, wodurch dann ein Widerstreit klassischer Bilder entstand, der heute unter dem Namen ‚Dualismus‘ einen so breiten Raum im elementaren Unterricht einnimmt.“

Der klassische Teilchenbegriff kann hier also in keinen Widerstreit mit dem Wellenbild treten, da er zur Beschrei-

bung des Lichtes vollkommen ungeeignet ist.

Simonsohn führt weiter aus, daß die Schulphysik den semiklassischen Standpunkt der Beschreibung einnehmen sollte. Konsequenterweise sollten demnach Photonen wie alle anderen Konzepte der Quantenfeldtheorie übergangen werden.

Sollen hingegen Photonen eingeführt werden, so muß der Rahmen der klassischen oder semiklassischen Theorie verlassen werden. Sie gewinnen erst in der Quantenfeldtheorie des Elektromagnetismus (QED) eine Bedeutung. Genuine QED Effekte sind jedoch sehr klein (Lambshift, Casimireffekt) und die entsprechenden Experimente aufwendig. Diese experimentellen Befunde können mithin nur zitiert werden, um im folgenden etwa mit dem Feynman'schen Zeigerformalismus einen Geschmack der abstrakten Höhen modernen Physik zu vermitteln.

QFT und Elementarteilchenphysik

Für eine elementare Einführung in Konzepte der Quantenfeldtheorie spricht die Bedeutung dieser Disziplin in anderen Gebieten der Physik. Etwa ist das heutige Wissen der Elementarteilchenphysik („Standardmodell“) in der Sprache der QFT formuliert. Danach werden die Eigenschaften von Materie durch die Annahme punktförmiger Konstituenten erklärt (je sechs Quarks und Leptonen). Ebenso werden die Kraftwirkungen durch den ‚Austausch‘ von Feldquanten gedeutet (Photon, W^+ , W^- , Z_0 und acht Gluonen).

Viele populäre Darstellungen erwecken dabei den Eindruck, daß wiederum naive ‚Teilchen‘ die fundamentalen Entitäten sind, und nicht zuletzt die suggestive Notation der Feynmangraphen kann zu einer unangemessenen Bildhaftigkeit der Vorstellung (auch bei Physikern!) verleiten.

Technisch gesprochen handelt es sich sowohl bei den Konstituenten der Materie als auch bei den Austauschteilchen der Wechselwirkung um ‚Quantenfelder‘. Diese Objekte verbinden die Eigenschaften der Felder klassischer Feldtheorien mit den Wahrscheinlichkeitsfeldern der nicht-relativistischen Quantenmechanik. Ihre Anregungszustände sind diskret, und können im Falle des quantisierten

Diracfeldes mit den elementaren Fermionen identifiziert werden. Im Falle der quantisierten Kraftfelder wird man auf die Austauschbosonen geführt.

Eine skizzenhafte Darstellung dieses Modells im Rahmen der Schulphysik kann von einem sorgfältig entwickelten Konzept des Photons als Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung enorm profitieren.

Zusammenfassung

Man begegnet also zwei sehr verschiedenen Tendenzen in der Rezeption quantentheoretischer Konzepte für ‚Nicht-Experten‘. Auf der einen Seite einer Mystifizierung mit dem Stichwort ‚Welle-Teilchen Dualismus‘. Einige Autoren vergleichen die daraus abgeleiteten ‚Paradoxien‘ der Quantenmechanik mit den Koans des Zen Buddhismus. /7/ Auf der anderen Seite eine Interpretation des Standardmodells die nicht selten eine Entwicklungslinie von Demokrits ‚Atomhypothese‘ bis zur aktuellen Hochenergiephysik zieht, und dabei alle konzeptionellen Umwälzungen und erkenntnistheoretischen Implikationen der modernen Physik mißachtet.

Überflüssig darauf hinzuweisen, daß beide Richtungen der Sache nicht dienen. Zum einen ist die moderne Physik reich genug, um sich bei ihrer Interpretation nicht voreilig Spekulationen hinzugeben die ihren Rahmen verlassen. Dieser Herausforderung wird man jedoch noch weniger gerecht, wenn man die Augen vor den Umwälzungen verschließt, die der Bruch mit der klassischen Physik bedeutet.

Literatur

- /1/ Feynman, R.P.: QED The Strange Theory of Light and Matter. – Princeton University Press. – 1988
- /2/ Selleri, F.: Die Debatte um die Quantentheorie. – Vieweg. – 1990
- /3/ Bödeker, A.: Optik in der Sek. II – Ein erprobter Unterrichtsgang. – In: Physik in der Schule 35 (1997) 4. – S. 129
- /4/ Sakurai, J.J.: Modern Quantum Mechanics. – Addison-Wesley. – 1985
- /5/ Kuhn, W.; Strnad, J.: Quantenfeldtheorie. – Vieweg. – 1995
- /6/ Zitiert nach /5/ S. 233
- /7/ Capra, F.: Das Tao der Physik. – Scherz Verlag. – 1992

Oliver Passon
Schloßstr. 17, 42285 Wuppertal

BEZUGSQUELLEN- VERZEICHNIS

EXPERIMENTIERGERÄTE

MEKRUPHY GMBH

Naturwissenschaftliche
Experimentiergeräte
Schlehenhag 19
D-85276 Pfaffenhofen a. d. Ilm
Tel.: (0 84 41) 844 49
Fax: (0 84 41) 714 94
Experimentiersätze für Schülerübungen
Physik, Netzgeräte, Meßgeräte

MESSGERÄTE

MEKRUPHY GMBH

Naturwissenschaftliche
Experimentiergeräte
Schlehenhag 19
D-85276 Pfaffenhofen a. d. Ilm
Tel.: (0 84 41) 844 49
Fax: (0 84 41) 714 94
Experimentiersätze für Schülerübungen
Physik, Netzgeräte, Meßgeräte

NETZGERÄTE

MEKRUPHY GMBH

Naturwissenschaftliche
Experimentiergeräte
Schlehenhag 19
D-85276 Pfaffenhofen a. d. Ilm
Tel.: (0 84 41) 844 49
Fax: (0 84 41) 714 94
Experimentiersätze für Schülerübungen
Physik, Netzgeräte, Meßgeräte

PHYSIKSAMMLUNGEN KOMPLETT

LEYBOLD DIDACTIC GMBH
Leyboldstr. 1
50354 Hürth
Tel.: 02233-604-0
Fax: 02233-604-222

SPEKTROSKOPE

ARRÜSE
KROSS OPTRONIC

Werkstätten für Optik
Feinmechanik und Elektronik
Alsterdorfer Str. 220
22297 Hamburg 60
Tel.: 040-51 80 08
Fax: 040-51 25 22