



Die unscharfen Grenzen zwischen Licht und Materie

Die langfristige Geschichte der optischen Dispersion, von der klassischen bis zur Quantenphysik

Von Marta Jordi Taltavull

Optische Dispersion, die Brechung des Lichts, ist das Phänomen, das wir im Regenbogen beobachten und in den Spektren, die von Prismen erzeugt werden. Sie ist leicht zu beobachten, doch hat sie sich seit Newtons ersten Deutungsversuchen als ein sehr schwer zu modellierendes Phänomen erwiesen, weil es an der Grenze von Licht- und Materietheorien angesiedelt ist.

Zwischen dem Ende des 19. und dem Beginn des 20. Jahrhunderts spielten die verschiedenen Interpretationen der optischen Dispersion eine zentrale Rolle in zwei ganz verschiedenen wissenschaftlichen Revolutionen: der Entstehung der Mikrophysik um 1900 und der Geburt der Quantenmechanik im Jahre 1925. Das Ziel dieses Forschungsvorhabens, als Teil des Projekts über "Geschichte und Grundlagen der Quantenmechanik" der Abteilung I, ist es, die Merkmale herauszuarbeiten, die die Lichtbrechung während dieser Periode zum blei-

benden Problem machten, und so weiter zu klären, wie sich die Quantenphysik aus der klassischen Physik entwickelte.

Seit den 1870er Jahren stützten sich alle Theorien der optischen Dispersion auf dasselbe grundlegende Modell der Wechselwirkung von Licht und Materie, die sogenannten Mitschwingungen. Dieses Modell bot den Physikern ein leistungsfähiges begriffliches Werkzeug, um die Wechselwirkung von Licht und Materie zu beschreiben, von der klassischen Theorie bis hin zur Quantentheorie. Über die Zeit wurde

das Modell in unterschiedliche Begriffsrahmen und Ontologien eingebettet, dabei aber seine Grundstruktur immer beibehielt. Das Forschungsvorhaben richtet sich auf die langfristige Geschichte der optischen Dispersion und versucht dabei zu verstehen, wie das Modell der Mitschwingungen gerade durch diese Kombination von Flexibilität und Stabilität das Wissen von Licht und Materie über die Schwelle zur Quantentheorie hinwegtrug.

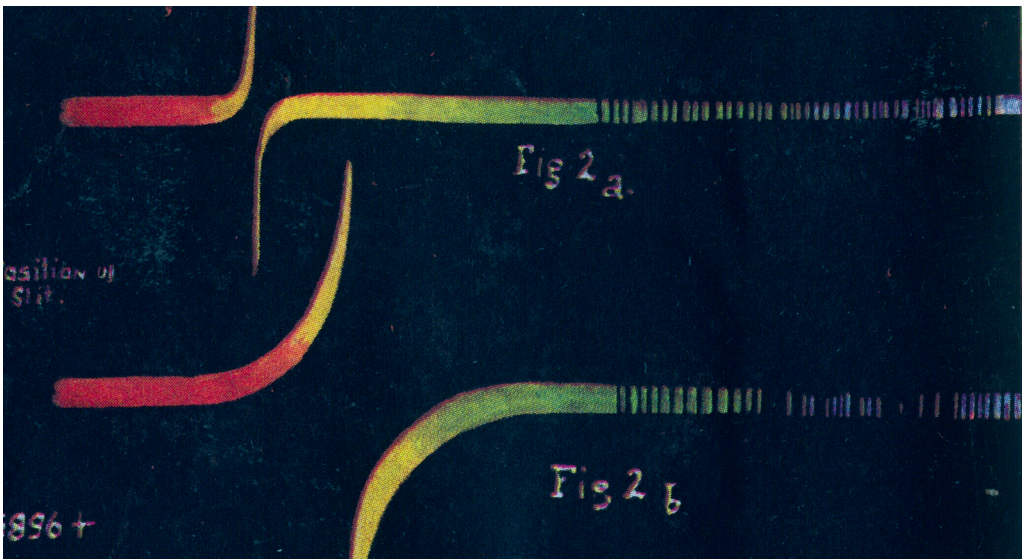
Vor der Einführung der Mitschwingungen war es üblich, das Licht als periodische Anregung einer unsichtbaren Substanz aufzufassen, die alles ausfüllte: des Äthers. Einen Versuch, die Bewegung von Materiepartikeln zur Erklärung optischer Phänomene heranzuziehen, gab es nicht. Außerdem glaubte man, das Spektrum gebrochenen Lichts präsentiere sich als unveränderliche Abfolge von Farben in der Reihenfolge violett, blau, grün, gelb, orange und rot.

Doch 1871-72 brachte eine überraschende Beobachtung diese eben genannten Annahmen ins Wanken: Christian Christiansen (1843-1917) und August Kundt (1839-1894) stellten unabhängig voneinander fest, daß unter bestimmten Umständen das Spektrum sich umzukehren schien. Um sowohl das "normale" wie diese "anormalen" Muster der Lichtbrechung zu erklären, wurde es nötig, der Optik Annahmen über molekulares Verhalten hinzuzufügen. Daraus entwickelte Wolfgang Sellmeier das neue begriffliche Werkzeug, das bis zur Quantenmechanik die Grundlage für alle weiteren theoretischen Bilder der Wechselwirkung von Licht und Materie bilden sollte: die Mitschwingungen. Die Idee lief auf die Hypothese hinaus, daß die Brechung von einer Wechselwirkung zwischen Licht und Materiepartikeln herrührte, wobei diese Partikel bei bestimmten

Frequenzen vibrierten, den Resonanzfrequenzen des jeweiligen Systems.

Gerade wegen ihrer dualen Natur wurde die Lichtbrechung ein heiß diskutiertes Thema in der Optik. Nach Sellmaier befaßten sich viele prominente deutsche Theoretiker mit der Frage der Lichtbrechung, wobei sie sich auf das Mitschwingungsmodell stützten; darunter Hermann von Helmholtz (1821-1894), Woldemar Voigt (1850-1919), Paul Drude (1863-1906) und Eduard Ketteler (1836-1900).

Im letzten Jahrzehnt des Jahrhunderts wurden die Mitschwingungen in eine neue physikalische Theorie eingebettet, die sich damals in Deutschland verbreitete: der Elektromagnetismus, der es erlaubte, optische, elektrische und magnetische Phänomene zu vereinheitlichen. In diesem neuen Kontext konnten Mitschwingungen leicht als Wechselwirkung zwischen vibrierenden geladenen Partikeln und elektromagnetischen Lichtwellen reinterpretiert werden, wobei die grundlegende mathematische Struktur unverändert blieb. Im Jahre 1897 führte die Entdeckung der kleinsten elektrischen Ladung, des sogenannten "Elektrons", einen weiteren bedeutsamen Aspekt ein. Die experimentelle Bestimmung der mikrophysikalischen Eigenschaften des Elektrons brachten Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) und Drude dazu, die experimentellen Ergebnisse über optische Dispersion, die auf der Grundlage des Mitschwingungsmodells ausgewertet wurden, mit bestimmten physikalischen und chemischen Merkmalen der Materiestruktur zu verknüpfen, vor allem mit der Valenz. Auf diese Weise konnten optische Phänomene als Werkzeug dienen, um die Mikrostruktur der Materie zu erforschen. Neben diesen Einsichten war die Entwicklung zuverlässigerer Expe-



Darstellung von anomaler Dispersion von Natriumdampf. In: Robert Wood, *Physical Optics*, New York: The Macmillan Company, 1911.

perimente wesentlich für die mikrophysikalische Wende in der Optik. Insbesondere bei Messung der optischen Dispersion war die Kombination von Interferometer und Refraktometer entscheidend.

Vor dem Hintergrund einer so engen Verknüpfung mit bestimmten Merkmalen der Mikrostruktur der Materie geriet im Jahre 1913 das Modell der Mitschwingungen in Konflikt mit einer weiteren neuen physikalischen Theorie: der Quantentheorie. In diesem Jahr präsentierte Niels Bohr (1885-1962) das erste Quantenmodell der Materie, das von der Gemeinschaft der Physiker schnell allgemein akzeptiert wurde. Nach diesem Modell kreiste ein Elektron um den atomaren Kern auf "Quantenbahnen" und die Absorption oder Emission von Licht entsprach einem diskreten Sprung eines Elektrons zu einer höheren bzw. niedrigeren Bahn. Dieses Modell schien mit dem Konzept der Mitschwingungen unvereinbar, und zwar aus

zwei Gründen: Erstens erforderten die Mitschwingungen ein Materiemodell, in dem die Elektronen auf kontinuierliche Weise Energie mit der Lichtwelle austauschten, im Gegensatz zu Bohrs Modell. Zweitens war im Modell der Mitschwingungen die Farbe des emittierten oder absorbierten Lichts allein und eindeutig durch die mechanische Schwingung des Elektrons im Atom bestimmt, wogegen in Bohrs Modell die Farbe des Lichts vom Sprung des Elektrons abhing.

Gleichwohl waren die Mitschwingungen immer noch das befriedigendste Modell, um die experimentellen Daten über optische Dispersion zu beschreiben. Es mußte daher in den nachfolgenden Jahren eine Lösung für den Konflikt mit dem Bohrschen Modell gefunden werden. Dieser Prozeß führte zu zwei verschiedenen Resultaten, die beide die Lichtbrechung als Mitschwingungen modellierten, aber den oszillierenden Entitäten, die mit elektromagne-

tischem Licht wechselwirkten, eine jeweils verschiedene physikalische Natur zuschrieben. Auf der einen Seite versuchten Arnold Sommerfeld (1868-1851) und Peter Debye (1884-1966) die beiden Alternativen miteinander zu versöhnen. Sie fassten das Mitschwingungenmodell als eine Wechselwirkung zwischen dem elektromagnetischen Licht und "vibrierenden Bohrs Umlaufbahnen" anstelle vibrierender Elektronen auf. Diese Theorie funktionierte sehr gut für einige wenige Typen einfacher Moleküle, aber es erwies sich als sehr schwierig, sie auf Moleküle mit komplizierterer Struktur auszudehnen.

Auf der anderen Seite schlug Rudolf Ladenburg (1882-1952) in den frühen 1920er Jahren eine radikale Reinterpretation des Modells vor. Indem er das Potential des Modells von Mitschwingungen als Analogie im Rahmen des Quantenformalismus ausnutzte, interpretierte Ladenburg die Wechselwirkung von Licht und Materie mit Hilfe eines neuen Konzepts, den "Ersatzoszillatoren", später "virtuelle Oszillatoren" genannt. Die Besonderheit dieser Oszillatoren war, daß sie nicht physikalischen Entitäten entsprachen, wie etwa Elektronen oder Umlaufbahnen, sondern den Bohrschen Sprüngen selbst. Ladenburgs Modell verzichtete gänzlich auf die Beschreibung von Elektronenbahnen, und das neue Modell der "virtuellen Oszillatoren" führte zu einer Neuausrichtung der Quantentheorie insgesamt: Die Bohrschen Quantensprünge nahmen den Platz der mecha-

nischen Umlaufbahnen ein. Diese Neuausrichtung legte denn auch begrifflich den Grund für die Quantenmechanik. Im Jahre 1925 bezeichnete Werner Heisenberg (1901-1976), eine der führenden Figuren der Quantenrevolution, die optische Dispersion als einen der "wichtigsten Schritte hin zur quantentheoretischen Mechanik".

So wurden die Mitschwingungen, nachdem sie durch zwei wissenschaftliche Revolutionen hindurch tradiert und in ganz gegensätzliche Begriffsrahmen eingepaßt worden waren (Äthertheorie, elektromagnetische Theorie, Quantentheorie), schließlich zu einem der Stützfeiler der neuen Quantenmechanik. Einerseits lieferte das Modell eine grundlegende und leicht verständliche Struktur, die zu befriedigenden Ergebnissen führte. Andererseits war es flexibel genug, daß seine konstitutiven Elemente (Wellen und Oszillatoren) in verschiedene physikalische Begriffssysteme übersetzt werden konnten. Tatsächlich war es gerade das Fortdauern des Modells über wechselnde Ontologien hinweg, das es für die Einführung als "virtuelle" Analogie in der Quantentheorie prädisponierte. Die Geschichte der optischen Dispersion zeigt, wie tief die Quantenphysik in der klassischen Physik verwurzelt ist.

Marta Jordi Taltavull war von 2009 bis 2012 Doktorandin in Abteilung I (*Strukturwandel von Wissenssystemen*) am MPIWG (mjordi@mpiwg-berlin.mpg.de).

Eine vollständige Version ist mit weiteren Forschungsthemen auf der Institutswebsite zugänglich („Aktuelles/Aktuelle Themen“).