

**Newtons Beugungsexperimente**  
**und ihre historischen und philosophischen**  
**Folgerungen**

Helmut Nieke

- I. Historische Folgerungen aus Newtons Beugungsexperimenten
- II. Philosophische Folgerungen aus Newtons Beugungsexperimenten
- III. Bremsklötze für den Fortschritt der Physik
- IV. Wirbelhypothesen zum Aufbau der Materie



Halle 1997

Comp. Print 2: Dr. rer. nat. habil. H. Nieke, Ulmenweg 3, D-06120 Halle (Saale)

## Inhaltsverzeichnis

Seite

### I. Historische Folgerungen aus Newtons Beugungsexperimenten

1. Übersicht in historischen Abschnitten
2. Grimaldis leuchtende Kante
3. Beugung an Spalt und Halbebene
4. Beugung und Kohärenz
5. Weitere Experimente zur Beugung
6. Deutung der Experimente: Das Photon mit Struktur und Feld
7. Einstein und die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie  
Literatur I.

### II. Philosophische Folgerungen aus Newtons Beugungsexperimenten

1. Der Dualismus von Welle und Korpuskel bei der Beugung
2. Determinismus bei der Beugung
3. Rückkehr zu klassischem Denken
4. Zur Philosophie Einsteins  
Literatur II,

### Anhang

#### III. Bremsklötze für den Fortschritt der Physik

1. Beruhigungsphilosophien
2. Pseudohelfer der Physik
3. Unterdrückung von Experimenten, die der Theorie widersprechen
4. Formale mathematische Darstellungen und Modelle
5. Voreingenommenheiten
6. Voreingenommenheiten
7. Eingefahrene Denkstrukturen
8. Mangelhafte Einführung neuer Erkenntnisse
9. Folgerungen  
Literatur III.

#### IV. Wirbelhypothesen zum Aufbau der Materie

1. Einleitung
2. Wirbelhypothesen aus der Zeit vor dem 20. Jahrhundert
3. Wirbelhypothesen in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts
4. Vermeidung der Wirbel in der Heisenberg-Bohrschen Quantentheorie
5. Wirbelhypothesen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts in bisheriger Form
6. Wirbelhypothese in Anlehnung an die Quantentheorie
7. Aus Beugungsexperimenten gefolgerte Wirbelhypothese
8. Wirbelhypothesen im Rahmen der Quantentheorie
9. Wirbelhypothesen zur Ergänzung der Quantentheorie  
Literatur IV.

## **Inhaltsübersicht**

Im Computer Print 1: H. Nieke, Newtons Beugungsexperimente und ihre Weiterführung. Halle 1997, wurde gezeigt, daß Fresnels angeblicher Beweis für Licht als Welle, auf einer unzulässigen und falschen Extrapolation der Formel für die Beugung am Spalt auf die Entfernung Null. Das wurde damals nur akzeptiert, weil Newton mit punktförmigen Lichtteilchen mit seiner Mechanik eine Beugung nicht begründen konnte. So wurde ab etwa 1850 die Beugung nach Fresnel mit Wellen in Lehrbüchern als einzige Möglichkeit dargestellt. Newtons Beugungsexperimente wurden unterschlagen und so eine simplifizierte und irreführende Theorie eingeführt. Auch nach Entdeckung des lichtelektrischen Effektes am Anfang dieses Jahrhunderts, hatte sich daran nichts geändert, und es wurde der Dualismus von Welle und Korpuskel gefolgert.

Bohr baute seine Quantentheorie mit der Kopenhagener Deutung auf dem Dualismus von Welle und Korpuskel auf, die er mit dem Indeterminismus bei Quantentheorie verband, aus dem die Unanschaulichkeit bei Quantenprozessen gefolgert wurde. Einstein legte dagegen Widerspruch ein, aber da er die Newtonschen Beugungsexperimente nicht berücksichtigte, konnte er seine Anschauung nicht begründen. Aber auch wenn er sie berücksichtigt hätte, hätte er keine Alternative bieten können.

Eine Alternative war erst nach 1960 möglich, als die Struktur der Elementarteilchen entdeckt wurde, aber sie erfolgte zu dieser Zeit nicht, da sich die Heisenberg-Bohrsche Quantentheorie zu dieser Zeit durchgesetzt hatte.

In dieser Arbeit werden im Teil I die historischen Folgerungen betrachtet, die durch die Nichtbeachtung der Newtonschen Beugungsexperimente entstanden. Im Teil II werden die philosophischen Argumente betrachtet, die auf der gleichen Ursache beruhen.

Heisenberg folgerte aber für die Struktur des Photons den formalen Ansatz: nebeneinander liegend Fermion und Antifermion mit Spin und Antispin. Er betrachtete also das Photon mit Struktur und den Spin nicht als formale Spinquantenzahl, sondern als Spin- Rotations- oder anschaulich als Wirbelaggregat.

Hier wurde als Struktur des Photons, analog zu Heisenberg, die des elektromagnetischen Wirbelpaares angenommen, wobei die Beugung durch Wechselwirkung des Photons mit seinem Feld gemäß der Wirbeldynamik begründet wird.

Als Anhang werden Bremsklötze der Physik zusammengestellt und Ansätze der Wirbelhypothese zum Aufbau der Materie betrachtet.

# **1. Historische Folgerungen aus Newtons Beugungsexperimenten**

## **Inhaltsverzeichnis**

Seite

### 1. Übersicht in historischen Abschnitten

- 1.1. Sammeln von Fakten - Von Newton bis Young - 1600 bis 1800
- 1.2. Berechnungen mit Wellen - Fresnel - 1800 bis 1900
- 1.3. Dualismus Welle und Korpuskel - Einstein/Bohr - 1900-1939
- 1.4. Dominanz der Heisenberg-Bohrschen Quantentheorie - 1945-..
- 1.5. Verschmelzung statt Dualismus - ab ...

### 2. Grimaldis leuchtende Kante

- 2.1. Die leuchtende Kante von Grimaldi bis Fresnel
- 2.2. Weitere Arbeiten über die leuchtende Kante
- 2.3. Neue Experimente

### 3. Beugung an Spalt und Halbebene

- 3.1. Die Beugung am Dreieckspalt nach Newton
- 3.2. Der Ursprung der Wellendeutung ab Fresnel
- 3.3. Die Beugung an der Halbebene
- 3.4. Spätere theoretische Arbeiten
- 3.5. Kritische Betrachtungen

### 4. Beugung und Kohärenz

- 4.1. Die Kohärenzbedingung als Interferenz-Winkelbedingung
- 4.2. Die zeitliche Kohärenz als Interferenzlänge
- 4.3. Beschreibung als Teilkohärenz
- 4.4. Kohärenz als Zusammenhang der Strahlung

### 5. Weitere Experimente zur Beugung

- 5.1. Beugung an Spalt und Hindernis
- 5.2. Beugungen hintereinander folgend
- 5.3. Beugung am Doppelspalt
- 5.4. Frequenzminderung nach der Beugung
- 5.5. Die Machschen Streifen
- 5.6. Experimente in der Schlierenapparatur

### 6. Deutung der Experimente: Das Photon mit Struktur und Feld

### 7. Einstein und die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie

- 7.1. Einstein und die Newtonschen Beugungsexperimente
- 7.2. Einsteins Arbeiten
- 7.3. Dualismus von Welle und Korpuskel oder Komplementarität
- 7.4. Ausschließliche Wahrscheinlichkeit und statistische Deutung
- 7.5. Diskontinuität - Individualität - Quantenspringerei

- 7.6. Stimmen der Kritik nach Einstein
- 7.7. Zusätzliche Betrachtungen

Literatur I

## **1. Übersicht in historischen Abschnitten**

### **1.1. Sammeln von Fakten - Von Newton bis Young - 1600 bis 1800**

Newton legte umfangreiche Beugungsexperimente vor, die mit unseren heutigen Kenntnissen die Wellenstruktur des Lichtes ausschließen, aber mit punktförmigen Lichtteilchen konnte man die Beugung nicht begründen.

### **1.2. Berechnungen mit Wellen - Fresnel - 1800 bis 1900**

Fresnel konnte mit dem von seinem Landsmann Fourier stammende Theorem Grenzfälle der Beugung berechnen. Seine Meßergebnisse teilte er nur mit, wenn sie mit seiner Theorie hinreichend übereinstimmten. War das nicht mehr der Fall, so brach er die Mitteilung ab, ohne die Diskrepanzen anzumerken. Die Newtonschen Beugungsexperimente zeigten, was außerhalb der Fresnelschen Theorie die Beugung noch kennzeichnete, aber dies paßte nicht zu Fresnels Vorstellungen. Daher ließen die Lehrbuchautoren Newtons Beugungsexperiment einfach weg, sie wurden unterschlagen und blieben unberücksichtigt; man extrapolierte so über dieses Gebiet unzulässig und falsch hinweg. So wurde eine unvollständige und damit irreführende Theorie der Beugung propagiert.

### **1.3. Dualismus Welle und Korpuskel - Einstein und Bohr - 1900 bis 1939**

Die Entdeckung der lichtelektrischen Effekte nach 1900 forderte Licht als Korpuskel. Da auch weiterhin mit punktförmigen Lichtquanten oder Photonen die Beugung des Lichtes nicht zu begründen war, kam es zu einer philosophischen Lösung, dem Dualismus von Welle und Korpuskel. Auf diesen Dualismus und der Annahme eines Indeterminismus bei Quantenprozessen baute Bohr seine Quantentheorie auf. Einstein kämpfte dagegen an, da er aber die Newtonschen Beugungsexperimente nicht beachtete, konnte er seine Ablehnung nicht begründen. Einzelheiten dazu findet man im zweiten Teil dieser Arbeit.

### **1.4. Dominanz der Heisenberg-Bohrschen Quantentheorie - 1945 bis ...**

Die Diskussion Bohr - Einstein hielt man jetzt für erledigt und pries die Kopenhagener Deutung als moderne Physik. Nur sehr wenige traten noch dagegen auf.

### **1.5. Verschmelzung statt Dualismus**

Einstein forderte eine Verschmelzung von Welle und Korpuskel statt des Dualismus von Welle und Korpuskel. Dies war erst denkbar, als Elementarteilchen mit Struktur ab etwa 1960 diskutiert wurden. Das Photon mit Struktur und Feld könnte auch die Welleneigenschaften des Lichtes erklären, womit Dualismus und Indeterminismus überflüssig wären.

In den weiteren Abschnitten wird sachlich in Teilgebiete geordnet die historische Entwicklung der Beugung verfolgt.

## **2. Grimaldis leuchtende Kante**

### **2.1. Die leuchtende Kante von Grimaldi bis Fresnel**

Grimaldi [1] berichtete als erster 1665 über die Beugung und dabei auch über die leuchtende Kante, die man sieht, wenn eine Lichtquelle durch eine Halbebene verdeckt ist. Die Abhandlung von Huygens [2] erschien nach Grimaldi, aber noch vor Newton [3]. Huygens schrieb über die Beugung: „... ich nenne sie nämlich Wellen wegen der Ähnlichkeit mit jenem, welche man in Wasser beim Hineinwerfen eines Steins sich bilden sieht, weil diese eine ebensolche Ausbreitung in die Runde wahrnehmen lassen,

obschon sie einer anderen Ursache entspringen und nur in einer Fläche sich bilden". Sonst nimmt er die Ausbreitung sich stoßender Ätherteilchen an, wobei ihm die Erklärung der Durchsichtigkeit leichter fällt als die der Undurchsichtigkeit, da der Äther überall vorhanden sein soll. Nach Descartes und Fermat hält er die Geschwindigkeit des Lichtes im stärker brechenden Medium für geringer als in Luft.

Newton [3] III (1704) betrachtete diese Erscheinung der leuchtenden Kante in der Beobachtung 5 genauer und stellte fest, daß die feine Lichtlinie um so schmaler wird, je weiter seitlich er beobachtete. Die Breite dieser Linie gab er zu etwa 0,03 mm an.

Young [4] beobachtete einen Spalt von der Seite und fand außer der schattenseitigen (wie schon Grimaldi und Newton) auch die lichtseitige leuchtende Kante. Sicher hat auch Newton das zuletzt beschriebene Phänomen beobachtet, da er jedoch die Möglichkeit einer Reflexion nicht ausschließen konnte, hat er wahrscheinlich darüber nicht berichtet. Young bot gegenüber Newton jedoch insofern einen Rückschritt, da er statt auf die Umgebung der Kante die Erscheinung der leuchtenden Kante auf die Kante allein beschränkte. Er nahm als erster an, daß sich von den Kanten Wellen ausbreiten. Dabei sprach er von einer Art Reflexion, wobei er wahrscheinlich an eine Anregung der Kante dachte, die, wie wir heute wissen, mit sichtbarem Licht nicht möglich ist. Mit seinem Interferenzprinzip konnte er die Beugung am Doppelspalt und Gitter erklären, wobei die Beugung am Doppelspalt besonders dazu diente, die Wellenhypothese des Lichtes zu begründen.

Fresnel [5] bestätigte in seiner ersten Arbeit über die Beugung ausdrücklich, daß er sich überzeugt habe, daß gebeugtes Licht ausschließlich von den Kanten kommt, was er später nie berücksichtigte. Die Existenz einer leuchtenden Kante als physikalisches Phänomen, war also zu dieser Zeit allgemein anerkannt. Die Folgerung, daß gebeugtes Licht nicht vom gesamten Spalt kommt, war selbstverständlich, sie brauchte nicht besonders betont zu werden.

## 2.2. Weitere Arbeiten über die leuchtende Kante

Was noch bis zur Zeit Fresnels selbstverständlich war, aber ab Fresnel nicht mehr beachtet wurde, daß gebeugtes Licht ausschließlich h aus der Umgebung der Kante kommt, wurde seit etwa 1850 nicht mehr beschrieben und nicht mehr darüber berichtet, sondern so getan, als käme es vom gesamten Spalt. Newtons Beugungsexperimente wurden verschwiegen, so wurde diese Tatsache später wieder neu entdeckt, aber nicht beachtet.

Kalaschnikow [6] berichtete über den Schattenwurf von Nadeln im Bereich des gebeugten Lichtes. Dort wurde eindeutig gezeigt, daß dieses Licht von der Kante kam, die Ausdehnung des Gebietes, aus denen gebeugtes Licht kam, konnte mit dieser Methode nicht ermittelt werden.

Rubinowicz [7] begann seinen Übersichtsartikel über die Miyamoto-Wolfsche Beugungswelle mit dem Satz (übersetzt): „Wir wissen sehr wohl aus unserer täglichen Erfahrung, daß die Kanten beleuchteter Objekte leuchten, wenn man von ihrem Schatten aus beobachtet.“ Er wies dabei auf Newton [3].

Shoucri [8] schrieb: „Es scheint, daß Fresnel ... diese Interpretation der Randwelle nicht bemerkt hat, die ihm sicher zu einer Erklärung der Youngschen Vorstellungen in Übereinstimmung mit seiner eigenen Theorie geführt hätte, ...“. Das ist nicht richtig, denn das hat Fresnel ernsthaft geprüft und erhielt für die Beugung am Spalt ein unrichtiges Ergebnis. Shoucri konnte durch passende Subtraktion aus der Fresnelschen Zonenkonstruktion eine Übereinstimmung erreichen. Das ist aber nicht den Vorstellungen von Young gemäß, sondern ein formal-mathematischer Kunstgriff. So schrieb er auch: „Der Phasensprung um  $\pi$  wird hier ohne weitere Annahme durch die Subtraktion der Randwelle eingeführt.“ Es ist ein oft verwendetes Verfahren, wenn die Rechnung bei Beugung oder Interferenz nicht die Experimente wiedergibt, einen passenden Phasensprung zu postulieren. So stimmt die Theorie immer, aber es ist nur das Fourier Theorem angewandt, womit jedes experimentelle Ergebnis darstellbar ist.

Die Nichtbeachtung von Newtons Beobachtung der Ausdehnung von Grimaldis leuchtender Kante schon durch Young ermöglichte die irreführende Bezeichnungen als kantengebeugte- oder Randwelle und dem untauglichen Versuch, diese als Linienintegral darzustellen

An historischen Betrachtungen über Newtons Beugungsexperimente liegen einige Arbeiten vor. Rosenberger [9] meinte zu Newtons Beugungsexperimenten, daß sie nicht viel über Grimaldis schon gemachte Entdeckungen hinaus kommen. Laue [10] erwähnt Newtons Beugungsexperimente gar nicht, genauso wie in seinem Handbuchartikel. Hall [11] gab eine Einführung zu Newtons Optik. Er bestätigte, daß Newton in der Beugung sehr sorgfältig gearbeitet habe, stellte aber das III. Buch nicht besonders heraus.

### 2.3. Neue Experimente

Nieke [12] belegte die Existenz der leuchtenden Kante, deren Lage und ihre Breite ( $< 0,1$  mm, abhängig von der Apertur der Abbildungsoptik). Er ersetzte das Auge durch eine photographische Kamera, die er so weit seitlich stellte, daß kein direktes Licht in das Objektiv der Kamera fiel. Die Scharfeinstellung auf den Spalt erfolgte im Auflicht und dabei wurde die Lage der Kanten markiert. Nach Nieke [12] scheint das schattenseitig gebeugte Licht von der Spaltbacke zu kommen, es muß also schattenseitig versetzt sein. Vielleicht haben das auch schon Newton und Young bemerkt und nur nicht geschrieben, weil es ihnen unmöglich erschien.

Nieke [13] zeigte, daß die Beugungsfigur des Doppelspaltes auftrat, auch wenn die sog. Kohärenzbedingung (vgl. dazu Abschnitt 4) extrem verletzt war. Das erfolgte, wenn der Beleuchtungsspalt eine solche Breite hatte, daß je die erste oder eine höhere Ordnung auf einen Einzelspalt fiel und die nullte auf den Zwischensteg.

Ganci [14] ließ das Licht eines Lasers streifend auf die Kante einer Halbebene fallen und fokussierte das Licht mit einer Zylinderlinse auf den Zwischensteg eines Doppelspaltes. Das gebeugte Licht ergab aber trotzdem die Beugungsfigur des Doppelspaltes, obwohl auch hier die sog. Kohärenzbedingung extrem verletzt war. Ganci versuchte das Ergebnis mit der Umformung von Rubinowicz als kantengebeugte Welle zu erklären.

In beiden Fällen geben die Experimente von Newton [3] eine Erklärung. Das gebeugte Licht kommt nur aus einer engen Umgebung der Kanten von Spalt oder Halbebene und das ungebeugte Licht wird vom Zwischensteg des Doppelspaltes abgedeckt. In beiden Fällen bewirkte nur gebeugtes Licht die Beugungsfigur des Doppelspaltes und dieses kommt nur aus einem engen Bereich der Umgebung jeder Kante, wofür die sog. Kohärenzbedingung erfüllt war. Das ungebeugte Licht war in beiden Fällen durch den Zwischensteg abgedeckt. Nieke [13] konnte seine Ergebnisse entsprechend dem Doppelsternversuch deuten, den Doppelstern ersetzen die beiden Gebiete, aus denen gebeugtes Licht kommt.

## **3. Beugung an Spalt und Halbebene**

### 3.1. Die Beugung am Dreieckspalt nach Newton

Als Bild 1 wird die Zeichnung der Beugung am Dreieckspalt nach Newton [3] III Beobachtung 10 gezeigt, die auch die Berechtigung der Kritik an der unzulässigen Extrapolation aufzeigt, wo als Beugungsfigur des Spaltes nur die äußeren Beugungsstreifen berücksichtigt wurden, weil deren Übergang von inneren zu äußeren Beugungsstreifen nicht begründet werden konnte.

*Bild 1. Die Beugung am Dreieckspalt nach Newton [3] mit Sonnenlicht, einem kleinen Loch im Fensterladen, Entfernung zum Dreieckspalt 10 Fuß und zur Zeichenebene 9 Fuß. ABC Projektion des Spaltes = Schattengrenzen. Bei Sonnenlicht erhält man drei farbige Beugungsstreifen, mit monochromatischem Licht entsprechend mehr.*

*Im oberen Teil, bei kleinen Spaltweiten sind die hyperbelförmigen äußeren (außerhalb ABC) Beugungsstreifen zu sehen, die in Lehrbüchern als einzige Möglichkeit der Beugung am Spalt dargestellt werden. Sie haben die gleichen Winkelabstände, die Abstände wachsen proportional der Entfernung.*

*Im unteren Teil verlaufen die inneren (innerhalb ABC) Beugungsstreifen parallel zum Schattenwurf der Spaltkanten. Diese Streifen entsprechen denen der Halbebenen. Die Streifenabstände sind ungleichmäßig, sie werden lichtseitig enger. Ihre Abstände wachsen bei parallel einfallendem Licht nur proportional der Wurzel aus der Entfernung.*

*Mit steigender Entfernung Dreieckspalt - Zeichenebene wandert die Grenze des Übergangs nach unten, so daß bei sehr großen Entfernungen schließlich nur noch äußere Beugungsstreifen entstehen. Newton schloß aus diesem Tatbestand, daß sich Licht aalartig bewegen müßte (III Frage 3).*

Die Beugungsfigur des Spaltes mit äußeren Beugungsstreifen (im Bild 1 oberer Teil) entwickelt sich bei paralleler Einstrahlung erst ab Entfernungen von etwa  $d^2 / \lambda$  ( $d$  - Spaltweite,  $\lambda$  sog. Wellenlänge des Lichtes), was Malange u. Gronkowski [15] mit Röntgenstrahlung und Nieke [16] mit Licht fanden. In kürzeren Entfernungen entstehen die inneren Beugungsstreifen (Bild 1 unterer Teil), die der Beugung der Kanten als Halbebenen entsprechen.

Im Bild 1 wurde die Beugungsfigur bei variiertem Spaltweite in konstanter Entfernung gezeichnet. Nun kann man auch bei konstanter Spaltweite und variiertem Entfernung die Beugungsfigur betrachten. Dann erhält man in kurzen Entfernungen die inneren Beugungsstreifen, die den Kanten als Halbebenen entsprechen. Dabei ist zu beachten, daß die Abstände der Beugungsstreifen nicht linear mit der Entfernung wachsen, was bereits Fressend [5] experimentell in Abhängigkeit von der Divergenz des Lichtes untersuchte. Es genügt hier festzustellen, daß bei parallelem Lichteinfall die Abstände nur mit der Wurzel aus der Entfernung wachsen, sonst überlagern sich Divergenz und Entfernungsabhängigkeit. In Übereinstimmung damit hatte schon Newton [3] festgestellt, daß sich die Lichtteilchen aalartig bewegen müssen, vor allem um dann in äußere Beugungsstreifen überzugehen.

In größeren Entfernungen als der oben angegebenen Formel, entstehen dann die äußeren Beugungsstreifen. Die Abstände der äußeren Beugungsstreifen wachsen linear mit der Entfernung, Lichtteilchen oder Photonen laufen als äußere Beugungsstreifen geradlinig.

Der Übergang von inneren Beugungsstreifen bei großen Spaltweiten und kurzen Entfernungen zu äußeren Streifen bei kleinen Spaltweiten und großen Entfernungen läßt sich nicht damit abtun, daß hinreichend auseinander gerückte Kanten die Beugung der Halbebene liefern müssen. Sondern es ist zu begründen, warum bei gleicher Spaltweite in kurzen Entfernungen innere Beugungsstreifen auftreten und in großen Entfernungen äußere Beugungsstreifen. Der Versuch von Schwarzschild [17] durch 'Hinüberwerfen' von Lösungen von einer Kante zur anderen, wurde nie als Lösung anerkannt. Malgange u. Gronkowski [15] versuchten ein Computerprogramm zur Interpolation.

Allgemein werden also die Newtonschen Beugungsexperimente unterschlagen, da man sie weder mit Wellen noch mit Lichtteilchen erklären konnte. So ließ man die inneren Beugungsstreifen des Spaltes nicht nur in Lehrbüchern einfach weg, sondern auch in Handbüchern wie bei Laue [18], wo nur ein Photo am Dreieckspalt von Arkadiew [19] aus extrem großen Entfernungen gezeigt wurden, wo nur noch äußere Beugungsstreifen auftreten. Damit wird aber gerade das charakteristische der Beugung unterschlagen. Wenn nur die beiden Grenzfälle betrachtet werden, so lassen sich keine physikalischen Aussagen über die Beugung machen. Bei Nieke [12] wurde die Beugung am Dreieckspalt mit photographischen Aufnahmen belegt.

### 3.2. Der Ursprung der Wellendeutung ab Fresnel

Mit dem Youngschen Interferenzprinzip, das sich wenigstens für große Entfernungen am Doppelspalt bewährt hatte, gelang es Fresnel nicht, die Beugungsfigur äußerer Streifen des Einzelspalt zu berechnen mit der Annahme, daß gebeugtes Licht von der Spaltkante kommt. Auch in der Ferne ließ sich damit die Lage der äußeren Streifen nicht richtig berechnen, wie man leicht nachprüfen kann. Fresnel [5] versuchte es daher mit dem Huygensschen Prinzip.

Nieke [12] prüfte die Newtonschen und Fresnelschen Beugungsexperimente nach. Newtons Angaben stimmen auch dort, wo er sie nicht erklären konnte. Fresnels Angaben der Meßwerte stimmen auch, aber genau dort, wenn seine Theorie die experimentellen Werte nicht mehr bringen, bricht er die Mitteilung seiner Ergebnisse ab.

An sich sind die Lage der Maxima und Minima bei äußeren Streifen (außerhalb der Schattengrenzen) des Spaltes, in großen Entfernungen, leicht zu berechnen, das geht schon aus der Newtonschen Zeichnung Bild 1 (oberer Teil) hervor. Es gilt bekanntlich für die Minima und Maxima:

$$\sin \alpha = m \lambda / d \quad (1)$$

Am Spalt: Minima  $m = n$  mit  $n = 1, 2, 3 \dots$   
 Maxima  $m = 0$  und  $m = (2n + 1) / 2$   $d =$   
 Spaltweite

Am Doppelspalt und Gitter: Maxima  $m = n$  mit  $n = 0, 1, 2$   
 Minima  $m = (2n + 1) / 2$   $d =$  Spaltabstand

mit  $m$  als Maßzahl für die Ordnung  $n$ . Diese Formel wurde auf die Entfernung Null, also auf die Spaltebene extrapoliert und man schloß daraus, daß der Spalt eine Wellenfront begrenzt und jeder Punkt dieser Wellenfront Ausgangspunkt einer neuen Kugelwelle wird. Man versuchte es also mit dem Huygensschen Prinzip in Verbindung mit dem Youngschen Interferenzprinzip (heute als Huygens-Fresnelsches Interferenzprinzip bekannt), wo gebeugtes Licht vom gesamten Spalt ausgehen sollte. Man ignorierte dabei die Erscheinung der inneren Streifen (Abb. 1 unterer Teil) und der leuchtenden Kante, die Fresnel vordem bestätigt hatte.

Zu Fresnel [5] ist zu bemerken, daß er seine Untersuchungen vor allen am Hindernis ausführte und mit divergentem Licht arbeitete. Mit der Betonung des Überganges äußerer zu inneren Streifen hätte er seine Gegner auf eine Schwachstelle seiner Theorie aufmerksam gemacht, was er durch zwei getrennte Ansätze bei Halbebene und Spalt vermied. Fresnel wurde nicht sofort anerkannt, denn es waren zu dieser Zeit zu viele, die die Newtonschen Beugungsexperimente kannten. Aber auf dieser unzulässigen und falschen Extrapolation der Beugung am Spalt nach Formel (1) auf die Entfernung Null baute nicht nur Fresnel seine Theorie auf, sondern nach 1900 entstand die These des Dualismus von Welle und Korpuskel.

Zur gerechten Beurteilung von Fresnel ist zu bemerken, daß er festgestellt hatte, daß man das Gebiet zwischen den Bereichen aus denen gebeugtes Licht kommt, nicht einfach abdecken darf, sonst erhält man die Beugungsfigur des Doppelspalt. Für ihn war dies offenbar der Grund, das Huygenssche Prinzip anzunehmen. (s. Abschn. 6.).

Herschel [20] schrieb 1831: „Es scheint daher, daß Fresnel in seinen Einwüfen, die er gegen diese Gegenstände der Newtonschen Theorie aufgestellt hat, selbst keinen deutlichen Begriff von der Lehre, deren Gegner er ist, gehabt habe.“

Biot [21] (1829) geht ausführlich auf die Undulationstheorie ein, er vertritt aber die Korpuskulartheorie und gibt zu, daß diese keine Aussagen über die Kräfte zur Beugung machen kann: „Dies aber scheint sehr schwierig, und es ist wahrscheinlich, daß, wenn es solche Kräfte gibt, ihre Charaktere verschieden von denen sind, welche uns die gewöhnlichen Erscheinungen der Brechung und Zurückwerfung darbieten.“ Hier spricht er das Kernproblem der Lichtteilchentheorie an, sie kann keinen Grund für die seitliche Ablenkung angeben, während die Wasserwellen zeigten, daß bei Wellen eine senkrechte Ablenkung erfolgen kann.

Aber dann waren die Anhänger Newtons ausgestorben und da in Lehrbüchern unbedingt alles erklärt werden muß, wurden die Newtonschen Beugungsexperimente ab etwa 1850 einfach weggelassen. Ein Argument dazu hatte Newton selbst gegeben, als er zur Erklärung der Brechung zum Einfallslot beim Eintritt in ein optisch dichteres Medium die Wirkung einer Kraft annahm und damit eine Beschleunigung der Lichtteilchen. Das Licht müßte daher im dichteren Medium eine höhere Geschwindigkeit haben, was spätere Messungen bekanntlich nicht bestätigen konnten. Aber der Schluß, daß damit die Lichtteilchentheorie widerlegt sei, war falsch. Richtig ist nur, daß damit die Möglichkeit der Behandlung als Massepunkt ausgeschlossen ist.

Buchwald [22] berichtete über den Streit von Biot mit Arago über Fresnel, wobei er aber nicht auf die leuchtende Kante einging, sondern mehr auf persönliche Differenzen und auf Polarisationserscheinungen. Später erschien nur wichtig, daß es Fresnel gelungen war, die Beugung an Hindernis und Spalt zu berechnen und zu deuten. Daß dies nur für sehr große Entfernungen vom Spalt und unter unrichtigen Ausgangsannahmen gelang, wurde in der Folge nicht beachtet.

Im Gegensatz zur Tatsache, daß gebeugtes Licht nur aus der engen Umgebung der Kante kommt, stehen auch die schematischen Darstellungen von Bohr und vieler Lehrbücher, z. B. Orear [23], wo die Beugungfigur der äußeren Streifen, die nur in größeren Entfernungen entstehen (Bild 1 im oberen Teil) bis zum Spalt oder Doppelspalt geführt werden. Diese Darstellungen zeigen, daß sich diese Autoren die Beugung nie richtig, also auch in der Nähe, angesehen haben, denn dann hätten sie gesehen, daß in kurzen Entfernungen die inneren Streifen des Spaltes entstehen und daß gebeugtes Licht nur aus der Umgebung der Kanten kommt. Sie verließen sich also lieber auf Fresnel, wo sie besser selbst kontrolliert hätten.

Zur Beurteilung ist natürlich stets zu bedenken, daß die Korpuskelstruktur erst etwa 1900 bewiesen wurde. Die Lichtteilchen von Newton waren nur indirekt bewiesen, vor allem durch die Lokalisierung des gebeugten Lichtes, und als Massepunkte konnte man mit der Newtonschen Mechanik die Beugung nicht begründen.

Die oft genannten Sätze: 'Beugung und Interferenz sind mit Wellen und nur mit Wellen zu erklären' und 'Eine Wellenfront fällt auf den Spalt, und dann sind nur noch Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich', sind aber mit Sicherheit falsch.

### 3.3. Die Beugung an der Halbebene

Fresnel [5] konnte mit Hilfe des Fouriertheorems die Beugungsfigur der Halbebene für große Entfernungen berechnen. Er ermittelte experimentell die Entfernungsabhängigkeit der Beugungsfigur, wo bei paralleler Einstrahlung die Abstände der Beugungsstreifen nur mit der Wurzel aus der Entfernung wachsen. Dieses Ergebnis wurde in die theoretischen Formeln eingesetzt, es kommt nicht etwa aus der Theorie heraus.

Nieke [16] ermittelte die Abhängigkeit der Beugungsfigur der Halbebene in sehr kurzen Entfernungen bei paralleler Einstrahlung. Die gewohnte Beugungsfigur erscheint erst in der Entfernung von etwa 50 mm, allgemein in  $10^5 \lambda$  wie Hiller u. Ramberg [24] mit defokussierten elektronenmikroskopischen Aufnahmen übereinstimmend ermittelten, wenn man die sog. Wellenlänge als Vergleich benutzt.

### 3.4. Spätere theoretische Arbeiten

Einen Überblick, ohne die Beugungsexperimente von Newton zu erwähnen, gaben Hönl, Maue u. Westphal [25]. Hier seien nur einige wesentliche Punkte angeführt.

Kirchhoff (1824-1887) [26] ging von der elastischen Lichttheorie aus, also von Schwingungen des Äthers mit der Wellengleichung

$$\delta^2 \varphi / \delta t^2 = a^2 \Delta \varphi \quad (2)$$

Er führte das Huygenssche Prinzip in Koordinatenschreibweise ein und integrierte über die freibleibende Lichtfläche. Dabei entsprach die Berücksichtigung der Phase formal der Periodizität des Lichtes wie

schon beim Interferenzprinzip nach Young. Hier gehen maßgebend die Randwerte oder -bedingungen ein, die an sich willkürlich sind, wenn nur der Erfolg diese rechtfertigt. Kirchhoff nahm an, daß zwischen den Spaltbacken die ursprüngliche Feldstärke vorhanden ist und jenseits der Spaltbacken der Wert null und  $\delta \varphi / \delta N = 0$  ( $N$  - Normale). Dieser Ansatz führt natürlich zu einer Unstetigkeit an der Kante und das wurde oft bemängelt. Trotzdem wurde anerkannt, daß für große Entfernungen in speziellen Fällen oft gute Übereinstimmung mit experimentellen Werten vorhanden ist.

Später gingen alle Autoren von der elektromagnetischen Lichttheorie aus, wobei die Formeln aber die gleiche mathematische Form behielten. Die Randbedingung - schwarzer oder blanker Schirm - wurde viel diskutiert, obwohl die experimentellen Ergebnisse nur in speziellen Extremfällen praktisch merkbare Unterschiede zeigten.

Sommerfeld benutzte die für spezielle Randformen reduzierten Maxwell'schen Grenzbedingungen  $E_{\text{tang}} = 0$  und  $B_{\text{norm}} = 0$ . Wesentlich ist bei seinen Arbeiten die Benutzung der Riemannschen Flächen, insbesondere bei der Beugung an der Halbebene. Zum Huygensschen Prinzip schrieb Sommerfeld [27]: „Die im Huygensschen Prinzip benutzten Randwerte sind also nicht nur in der Nähe der Schirmkante, sondern bis auf weite Abstände  $(kr)^{1/2}$  von den in unserem Sinne exakten Randwerten verschieden. Es ist erstaunlich, daß die klassische Beugungstheorie trotzdem praktisch so befriedigende Resultate liefert.“

Rubinowicz [28] berechnete die Beugung mit funktionentheoretischen Mitteln, denn in der Funktionentheorie ist es möglich, ein Linienintegral in ein Flächenintegral umzuwandeln. Voraussetzung ist natürlich, daß sich die Lichtausbreitung als analytische Funktion darstellen läßt, was formal durch das Huygenssche Prinzip in der Schreibweise  $e^{-ikr}/r$  gewährleistet ist. Deutet man nun das Linienintegral als Ausdruck der Young'schen Auffassung, daß gebeugtes Licht von der Kante kommt und das Flächenintegral als Ausdruck für das Fresnel-Huygenssche Prinzip, wonach jeder Punkt einer Wellenfläche Ausgangspunkt einer neuen Kugelwelle wird, dann erscheinen beide Ausgangsformen mathematisch formal völlig gleichberechtigt, obwohl sie physikalisch völlig entgegengesetzte Beschreibungen darstellen und sich gegenseitig ausschließen. Beide entsprechen nicht den physikalischen Tatsachen, der Versuch der Synthese diente nur zur Beruhigung der Gemüter. Bei der Aufspaltung der Beugungsformeln in zwei Teile betrachtete er aber stets den Randanteil als wesentlich. Zusammenfassend berichtet Rubinowicz [20]

Kottler [30] erhielt, mit den Kirchhoffschen Bedingungen zurückgerechnet, nicht wieder die gleichen Bedingungen und er ersetzte das Randwertproblem durch ein Sprungwertproblem. Mit Differentialgleichung, Greenschem Satz und Flächenintegralen ermittelte er so die Intensität im Aufpunkt. In einem zusammenfassenden Bericht gab Kottler [31] hierüber eine Übersicht.

Aber alle diese Theorien berücksichtigen nicht Newtons Beugungsexperimente. Es sind also nur mathematische Näherungen für große Entfernungen, die keine physikalische Erklärung gestatten.

### 3.5. Kritische Betrachtungen

Beugungs- und Interferenzversuche wurden oft als Beweis für die Wellennatur des Lichtes gewertet. Das ist nicht richtig, denn wie schon Mach [32] bemerkte, beweisen diese Experimente nur die Periodizität des Lichtes. Periodizität kann unterschiedlich bedingt sein, nicht nur durch Schwingungen oder Wellen. An jeder Stelle einer Beugungs- oder Interferenzfigur läßt sich mit Hilfe lichtelektrischer Effekte die Quantennatur des Lichtes nachweisen und durch Fehlen einer Akkumulationszeit (wie sie die Wellennatur fordert) eine Wellennatur ausschließen, denn der lichtelektrische Strom setzt praktisch trägheitslos ein. Auch die Möglichkeit einer mathematischen Darstellung der Beugung in Spezialfällen mit Kreis- oder e-Funktionen mit komplexem Exponent ist kein Beweis für die Existenz von Wellen, da Rotationen ebenso dargestellt werden können. Entsprechend dem Fourier Theorem ist dieser mathematische Formalismus für jede Funktion möglich, wenn sie nur stückweise monoton ist, was bei

experimentellen Ergebnissen stets der Fall ist. Die Periodizität des Lichtes begünstigt diese Darstellung, beweist aber nicht die Welle.

Wenn die Formel (1) auf die Entfernung Null, also in die Spaltebene extrapoliert und daraus geschlossen wird, daß der Spalt die Wellenfront begrenzt und von jedem Punkt dieser Wellenfront eine neue Kugelwelle ausgeht, so ist diese Extrapolation unzulässig und falsch, denn in kurzen Entfernungen entstehen erst die inneren Streifen des Spaltes die nicht der Formel (1) gehorchen, und gebeugtes Licht kommt nur aus der engen Umgebung der Kanten.

Wenn man diesen Schluß aus der Differentialgleichung (2) zieht, so gelten die gleichen Einwände, denn es wird in der Spaltebene über die freie Fläche integriert.

Die Beugung findet nicht durch eine einzige Richtungsänderung der Lichtteilchen oder Photonen in der Spalt- oder Hindernisebene statt, sondern im Raum dahinter. Newton stellte also richtig fest: Das Licht läuft aalartig. Hinter der Beugungsebene laufen die Photonen nicht gleich wieder geradlinig weiter, wozu im Abschnitt 5.2, 5.3 und bei Nieke [16] die experimentellen Beweise genannt werden.

#### **4. Beugung und Kohärenz**

##### **4.1. Die Kohärenzbedingung als Interferenz-Winkelbedingung**

Bei der Untersuchung der Beugung am Spalt und besonders am Doppelspalt bemerkte man, daß die Lichtquelle (oder der Beleuchtungsspalt) nicht beliebig groß sein dürfen. Verdet [33] gab dazu die mathematische Bedingung mit  $\Theta$  als halber Öffnungswinkel zum Doppelspalt und  $X$  Breite der Lichtquelle:

$$X \sin \Theta < \lambda / 2 \quad (3)$$

Ist diese Bedingung hinreichend erfüllt, so erscheint die Beugungsfigur des Doppelspaltes scharf, je weniger (3) erfüllt ist, je mehr erscheint sie unscharf oder verschmiert. Da sich zu dieser Zeit die Wellenhypothese durchgesetzt hatte, deutete man (3) allgemein so, daß Wellen von beiden Rändern der Lichtquelle keine größere Phasendifferenz als  $\lambda / 2$  haben dürfen. Die hier betrachtete Bedingung bezeichnete man als räumliche Kohärenz, also als räumlichen Zusammenhang.

Nieke [34] machte auf eine andere Deutung aufmerksam, die bereits Berge [35] gegeben hatte. Die ergibt sich, wenn man auch die andere Seite vom Doppelspalt, also die Beugung mit betrachtet. Mit dem ersten Minimum der Beugungsfigur des Doppelspaltes mit dem Spaltabstand  $d$  ergibt sich für hinreichende Entfernungen mit  $m = n = 1$  wie Formel (1):

$$d \sin \alpha = \lambda / 2$$

und mit Formel (3) folgt:

$$X \sin \Theta < d \sin \alpha. \quad (= \lambda / 2)$$

Bei kleinen Winkeln kann man setzen:  $\sin \Theta = d / a$  und  $\sin \alpha = Y / b$

$$X / a < Y / b \quad (= \lambda / d) \quad (4)$$

wenn der Abstand der Beugungsstreifen mit  $Y$  bezeichnet wird,  $a$  als Entfernung vom Doppelspalt zur Lichtquelle und  $b$  als Entfernung vom Doppelspalt zur Beugungsfigur.

In Worten heißt das, daß der Winkel infolge der Beugung größer sein muß als der Winkel infolge der geometrischen Ausdehnung der Lichtquelle oder des Beleuchtungsspalt. Oder: Die Divergenz der Beleuchtung wird als Unschärfe auf die Beugungsfigur übertragen. Mit einer Kohärenz der Strahlung, also mit einem Zusammenhang der Strahlung, hat das nichts zu tun, sondern bei zu großer Ausdehnung der Lichtquelle verteilt sich das Licht, der Geometrie entsprechend, auf die gesamte Fläche der Maxima und Minima und so wird die Beugungsfigur unscharf und verschwindet schließlich.

Arkadiew [19] gab schon an, daß der Winkel zur Öffnung (Lichtquelle) vom Beugungsschirm aus kleiner sein müsse als der Winkel zum Abstand der Beugungsstreifen. Cittert [36], Zernicke [37] und Wawilow [38] stellten in anderem Zusammenhang fest, daß die Phase des einfallenden Lichtes keinen Einfluß auf die entstehenden Interferenzen hat.

In Gleichung (4) fällt  $\lambda$  heraus, aber damit wird sie keineswegs unabhängig von der Frequenz des Lichtes, sondern es wird monochromatisches Licht vorausgesetzt. Mit weißem Licht erhält man bunte Beugungsfiguren. Für die räumlichen Interferenzen sind nur hinreichend monochromatisches Licht jeweils Aussagen möglich. Mit Berücksichtigung der beteiligten Frequenzen erhält man mit Glüh- oder Laserstrahlung die grundsätzlich gleichen Beugungsfiguren.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die sog. Kohärenzbedingung eine geometrische Bedingung ist, die mit Zusammenhang der Strahlung nichts zu tun hat, es braucht kein Ordnungszustand vorzuliegen. Die Bezeichnung Kohärenz ist hier also ungerechtfertigt und etwa durch Interferenz-Winkelbedingung zu ersetzen.

#### 4.2. Die zeitliche Kohärenz als Interferenzlänge

Um mit konventionellen Lichtquellen und Lasern (außer zwei moden- und phasen-stabilisierten Lasern nach Abschn. 3.4) Interferenzen herzustellen, bedarf es einer Strahlungsteilung. Mit Licht als Welle war die Begründung der Teilung kein Problem, denn Wellen sind ohne weiteres teilbar. Anders wurde das nach der Entdeckung der Lichtquanten, den Photonen. Hier kann das Photon nur einen Weg gehen und es kann nach der Forderung der Quantisierung nicht geteilt werden. Broglie nahm dazu schon die Trennung von Photon und seiner Welle an, was aber korrigiert werden muß in den allgemeineren Begriff des Photons mit seinem Feld. Danach ist die Strahlungsteilung eine Trennung von Photon von einem Teil seines Feldes. Dazu steht zur Verfügung:

- a. Reflexion-Brechung (Newtonsche Ringe, Lummer-Gehrcke-Platte)
- b. Doppelabbildung (verkippte Spiegel, geteilte Linsen)
- c. Halbdurchlässige Verspiegelung (Michelson-Interferometer)
- d. Teilabdeckung mit Beugung (Spalt, Doppelspalt, Gitter)
- e. Streuung (eingestaubte Platten)

Will man die zeitliche Interferenzfähigkeit des Lichtes untersuchen, so ist die Strahlungsteilung a bis d möglich, wobei die beiden getrennten Bündel danach wieder in die gleiche Richtung gebracht werden müssen. Entsprechend der Periodizität des Lichtes wechselt die Intensität bei zeitlicher Veränderung. An sich sind alle oben genannten Strahlungsteilungen frequenzabhängig. Da aber nur eine begrenzte Bandbreite der Frequenzen für Interferenzen in Frage kommt, so ist diese Frequenzabhängigkeit meist zu vernachlässigen. Mit einem Interferenzgerät, mit dem zwei örtlich getrennte und damit zeitlich verschiebbare Lichtbündel erzeugt werden, wie etwa mit dem Michelson-, oder Mach-Zehender Interferometer, dem Interferenz Komparator oder dem Kösterschen Doppelprisma, erhält man bei Überschreitung einer Differenzlänge beider Bündel entsprechend einer Zeitdifferenz oder Frequenzdifferenz keine Interferenzen mehr, was als Interferenzlänge bezeichnet wird (historisch als Kohärenzlänge und der Vorgang als zeitliche Kohärenz). Bei Überschreitung hinreichender Differenzen wird die Interferenzfigur unscharf, verschmiert oder wird bunt und verschwindet schließlich. Dies geschieht, wenn kontinuierliche Frequenzen das Frequenzband füllen. Sind hingegen nur zwei Frequenzen einer Doppellinie z.B. bei Na-gelb vorhanden, so verschwinden die Interferenzen, wenn das Maximum der Interferenz der einen Linie in das Minimum der anderen fällt. Bei weiterer Zeitdifferenz erscheinen aber wieder verwaschener Interferenzen. Es baut also jede Frequenz ihr Interferenzsystem auf. Daß das nichts mit einem Ordnungszustand zu tun haben muß, sieht man am einfachsten, indem ein Filter in den Strahlengang gebracht wird, welches die Frequenzbreite vermindert und damit auch die Interferenzlänge erhöht. Maßgebend sind also die beteiligten Frequenzen.

Die besten natürlichen monochromatischen Lichtquellen haben Interferenzlängen von höchstens einigen Dezimeter. Dabei kann eine tiefe Temperatur der angeregten Gase die Bandbreite verkleinern und so die Interferenzlänge vergrößern.

Bei Interferenzversuchen mit kleinsten Intensitäten, wo sich jeweils nur ein Photon in der Apparatur befinden konnte, fand man die gleichen Interferenzfiguren wie bei hohen Intensitäten, was z. B. Reynolds, Spartialian u. Scarl [39] referierten. Dirac [40] schloß aus diesem Tatbestand, daß jedes Photon nur mit sich selbst interferiert und niemals Interferenzen zwischen verschiedenen Photonen geschehen. (Man beachte Abschn. 3.4).

Im vorigen Abschnitt konnte gezeigt werden, daß geometrische Bedingungen die räumliche Interferenzfähigkeit bestimmen oder begrenzen. Bei der zeitlichen Interferenz sind es die beteiligten Frequenzen, die die Interferenzen bestimmen. Im Vorgriff auf Abschnitt 3.4 sei bemerkt, daß diese Interferenzlänge durch stimulierte Emission beeinflusst werden kann.

Wenn man die Frage stellt, wo das Licht bleibt, wenn das eine Feld im Interferenzgerät dunkel erscheint, so ist zu bedenken: Bei Newtonschen Ringen oder dem Mach-Zehender Interferometer ist stets der eine Weg (Reflexion-Transmission) dann hell, wenn der andere dunkel ist. Das Licht ging dann den anderen Weg, sie verhalten sich wie Positiv und Negativ. Beim Michelson-Interferometer ist zu beachten, daß der zweite Weg zur Lichtquelle zurück reflektiert wird. Newton [41] beantwortete diese Frage bei den nach ihm benannten Ringen, daß die Lichtteilchen 'fits' (= Passungen) haben als periodisch wechselnde Neigungen zu Brechung oder Reflexion. Im Vorgriff auf Abschnitt 5 kann dies als Wechselwirkung des Photon mit seinem Feld entsprechend der Weglängendifferenz betrachtet werden. Es muß also den schon von Newton geforderten Effekt der Beeinflussung von Reflexion-Brechung geben.

#### 4.3. Beschreibungen als Teilkohärenz

Licht wurde bisher als inkohärent betrachtet wenn, etwa im Youngschen Doppelspaltversuch, keine Interferenzen mehr sichtbar sind. Sind sie sichtbar, aber schlechter als von einem Punkt stammend, so wurde das Licht als teilkohärent bezeichnet.

Michelson [42] definierte als Sichtbarkeit der Interferenzstreifen

$$I_{\text{Max}} - I_{\text{Min}} / I_{\text{Max}} + I_{\text{Min}} \quad (5)$$

Das ist eine rein experimentelle Definition. aufbauend auf Cittert [36] versuchte Zernicke [37] aus den Daten der Beleuchtung mit der Wellenvorstellung dieses Verhalten mit zwei Strahlen als Kohärenzgrad zu berechnen. So definierte er Kohärenzgrad mit A als Amplitude und J als Intensität mit  $J_1 = A_1 A_1^*$  (\* konjugiert komplex)

$$A_2 / A_1 = J_{12} / J_2 \quad (6)$$

was er zum komplexen Kohärenzgrad weiterführte. Mittels des Fourier Theorems und anderer Umformungen waren damit umfangreiche Formulierungen und Anpassungen durchführbar und auch die Bezugnahme auf eine Ordnung der Strahlung war möglich, worüber etwa Vinson [43] und Perina [44] berichteten.

Dort werden nicht etwa geometrische oder frequenzmäßige Bedingungen in Abrede gestellt, aber sie werden nicht abgetrennt, sondern vermischt betrachtet. Durch Integration über die Spaltfläche wird nicht beachtet, daß gebeugtes Licht ausschließlich aus der Umgebung der Kanten kommt. Es werden also die Newtonschen Beugungsexperimente nicht berücksichtigt.

In den beiden vorhergehenden Abschnitten wurde gezeigt, daß die sog. räumliche und zeitliche Kohärenz nur von geometrischen bzw. frequenzmäßigen Bedingungen abhängen ohne Hinweis auf einen Zusammenhang der Strahlung. So ist auch die Teilkohärenz unter diesen Gesichtspunkten zu betrachten.

Bei der Beugung an der Halbebene wird als Teilkohärenz bezeichnet, wenn die Interferenz-Winkelbedingung (mit Beugungswinkel der Halbebene) nicht hinreichend erfüllt wird wie bei Kinzly [45], Considine [46] und referiert bei Thomson [47]. Hier liegt nur die geometrische Bedingung der Interferenz-Winkelbedingung vor, die mit der Ordnung der Strahlung nichts zu tun hat. Nieke [48] zeigte, daß der Machsche Streifen bei Sonnenbestrahlung von Kanten nur der Rest des ersten Maximum der Beugungsfigur der Halbebene ist.

Bei der Mikroskopie stellte man fest, daß ein Bild besser aufgelöst erschien, wenn die Beleuchtungsapertur nur das 0,6 bis 0,8 fache der Apertur des Mikroskopobjektivs beträgt. Das versuchte man mittels der Teilkohärenz zu erklären, wozu z. B. Hofmann [49] einen Kohärenzparameter definierte. Mit der Bemerkung, daß nur Licht, das in der engen Umgebung der Kante, also hier der Aperturblende, passierte, gebeugt wird, ist die Deutung als Teilkohärenz überflüssig und unbelegt. Wenn der Rand der Aperturblende infolge kleinerer Beleuchtungsapertur weniger beleuchtet wird, so wird dort selbstverständlich weniger gebeugt und damit wird das Bild schärfer. Es liegt also kein Grund vor, hier eine Ordnung der Strahlung oder eine Teilkohärenz anzunehmen.

Seit Zernicke [50] das Phasenkontrastverfahren erfand, wurden Eingriffe in die Beugungsfigur in der Brennebene der Objektive genutzt. Das wurde aber von ihm nicht mit einer Kohärenz erklärt, sondern mit Recht als eine Art Schlierenverfahren betrachtet. Hingegen bezeichneten z. B. Yu [51] u. a. Eingriffe in die Beugungsfigur oder Objektbilder als Folge einer Teilkohärenz, was nach den beiden vorigen Abschnitten nicht berechtigt ist. Sie trennen geometrische und frequenzmäßige Bedingungen nicht von Ordnungszuständen und beachtet nicht die Herkunft des gebeugten Lichtes.

Anders ist dies bei Eingriffen in Figuren der Holographie, wo ein Ordnungszustand der Strahlung zu erwarten und zu berücksichtigen ist, hier kann man von Kohärenz sprechen. Es ist aber zu beachten, daß nach Pietsch u. Menzel [52] die Fourieroptik nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich hat. Dafür ist als physikalischer Grund zu nennen, daß gebeugtes Licht nur aus einem engen Bereich der Umgebung jeder Kante kommt, was man schon seit Newton weiß. Es ist also von vornherein klar, daß die physikalischen Verhältnisse anders liegen und die Fourieroptik nur eine formale mathematische Näherung sein kann. Menzel, Miradé u. Weingärtner [53] betonen, daß erst eine Vereinfachung der Beugungstheorie die Anwendung des Fouriertheorems erlaubt.

#### 4.4. Kohärenz als Zusammenhang der Strahlung

Hanbury-Brown u. Twiss [54] wiesen bei extraterrestrischer und Quecksilber-Strahlung nach, daß Koinzidenzen häufiger auftraten, als nach statistischer Ordnung zu erwarten wäre. Daraus ist zu folgern, daß die stimulierte Emission auch hier schon eine Rolle spielt und nicht nur beim Laser. Nieke [55] versuchte dies mit der Entstehung zusätzlicher thermischer Strahlung zu verbinden.

Magyar u. Mandel [56] fanden, daß zwei Laser ohne Strahlungsteilung Interferenzen zeigen können, wenn sie hinreichend phasen- und modenstabilisiert waren. Allerdings sind dazu hohe technische Forderungen zu erfüllen. Richter, Brunner u. Paul [57] schlossen daraus, daß Photonen nicht nur mit sich selbst interferieren, wie dies Dirac [40] gefordert hatte, sondern auch mit anderen Photonen, wenn diese nur hinreichend in Mode und Phase übereinstimmen. Auch die große Interferenzlänge spezieller Laser ließe sich so erklären.

Auf Anregung von Kapitza u. Dirac [58] führte Schwarz [59] Experimente im Laser senkrecht zur Längsachse durch Elektronenbeugung aus. Er fand, daß die Elektronen so gebeugt wurden, als wenn in Längsrichtung die Gitterkonstante eine Wellenlänge des Laserlichtes betragen würde. Sie sprechen daher von einem Lichtkristall. Daraus ist zu folgern, daß stimulierendes und stimuliertes Photon den Abstand  $\lambda$  haben oder ein Vielfaches davon.

Diese Arbeit soll anregen, von Kohärenz nur dann zu sprechen, wenn ein Ordnungszustand der Strahlung wirklich vorliegt, und nicht, wenn nur geometrische Abmessungen oder Frequenzverteilung einen Einfluß auf die Interferenzen haben. Bisher wurde das vermischt betrachtet wie etwa bei Vinson [43] oder Perina [44].

Für die nichtlineare Optik wird man die Interferenz der Photonen als deren Wechselwirkung noch erweitern müssen, aber das ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

### 5. Weitere Experimente zur Beugung

Die Newtonschen Ergebnisse konnten bestätigt werden mit Ausnahme der Aufspaltung der Nullen Ordnung bei sehr engem Spalt Newton [3] III, Beobachtung 6. Stuewer [60] betrachtete Newtons Beugungsexperimente kritisch im Vergleich zu Grimaldi und Hooke. Fresnels Beugungsexperimente übernimmt er unkritisch. Er unterscheidet aber innere und äußere Beugungsstreifen. Zu Newtons Beobachtung 6 schrieb er (übersetzt): „Ich glaube, daß die dunkle zentrale Linie, welche ich selbst verifiziert habe, zu einem physiologischen Effekt gehört.“ Erläuterungen dazu gab er nicht. Nach Arndt u. Nieke [61] beruht dies auf einen physiologischen Effekt beim Verstellen der Spaltweite, nach einigen Sekunden verschwindet die Aufspaltung

### 5.1. Beugung an Spalt und Hindernis

Nieke [62] prüfte die Beugung an Spalt und Hindernis. Dabei fand er, daß sich die Beugungsfiguren kantensymmetrisch gleichen, wobei die inneren Beugungsstreifen des Spaltes den äußeren Beugungsstreifen des Hindernis entsprechen, die beide der Beugung an der Halbebene mit den Kanten als Halbebenen entsprechen. Statt kantensymmetrisch kann man auch sagen, daß sich jeweils lichtseitige und schattenseitige Beugungsfiguren gleichen oder symmetrisch zur Schattengrenze vertauschen.

Wie im Abschnitt 2 ausführlich betrachtet, treten dann in größeren Entfernungen die äußeren Beugungsstreifen des Spaltes und die inneren des Hindernisses auf, die wieder kantensymmetrisch einander entsprechen. Nur in Spezialfällen gleichen sich die Beugungsfiguren wie bei der Fraunhoferschen Beobachtungsart, wo die Lichtquelle in die Beobachtungsebene abgebildet wird und so nur die äußeren Beugungsstreifen des Spaltes oder die inneren des Hindernis auftreten, wenn man von der Zentralfigur absieht. Aber wie Nieke [34] zeigte, treten außerhalb der Brennebene bei Fraunhoferscher Beobachtungsart wieder innere Beugungsstreifen auf.

Nieke [16] zeigte, daß Spalt und Hindernis gleicher Abmessung die gleichen Bilder von Spalt und Hindernis in der Schlierenapparatur (vgl. Abschnitt 4.6) liefern, woraus zu schließen ist, daß gebeugtes Licht aus bezüglich zur Kante gleich gelegenen Orten kommt.

### 5.2. Beugungen hintereinander folgend

Nieke [62] beleuchtete aus einer engen Lochblende mit parallelem Licht eine Halbebene. Deren Beugungsfigur beleuchtete einen schräg gestellten Spalt. Die Beugungsfigur zeigte, daß hintereinander folgende Beugungen andere Ergebnisse liefern als mit unbeeinflusstem Licht. Es zeigten sich nicht nur die Intensitäten beeinflusst, sondern auch die Winkel. Mit Absicht wurde hier eine Halbebene als erste Beugung gewählt, denn wie schon Fresnel [5] experimentell gezeigt hat, wachsen die Abstände der Beugungsfigur nicht linear mit der Entfernung, sondern mit parallelem Licht mit der Wurzel aus der Entfernung. Für Licht aus Photonen ist daraus zu schließen, daß gebeugte Photonen nicht geradlinig laufen und so noch die folgende Beugung beeinflussen.

Nieke [63] zeigte, daß auch die Interferenzfigur beeinflusst wird, wenn in einem Arm des Mach-Zehender Interferometers eine Halbebene eingesetzt wird. Die Verhältnisse liegen hier allerdings nicht so übersichtlich.

### 5.3. Beugung am Doppelspalt

Wenn am Doppelspalt ein Einzelspalt abgedeckt wird, so erhält man nur die Beugungsfigur des einen Spaltes. Mit Photonen gab so die Beugungsfigur des Doppelspaltes ein Problem, denn ein Photon kann nur einen Spalt durchlaufen. Broglie [64] nahm zur Erklärung an, daß zwar das Photon nur einen Spalt durchlaufen kann, aber seine Welle als Führungswelle auch den anderen Spalt und diese Welle führt das Photon. Den Ausdruck Führungswelle korrigierte Born [65] in Führungsfeld.

Nieke [62] deckte nun nicht einen Spalt direkt ab, sondern erst in einer Zwischenabbildung wurde ein Einzelspaltbild abgedeckt. Dabei entstand die Beugungsfigur des Doppelspaltes auch bei abgedecktem

Bild eines Einzelspalt, wenn vor der Zwischenabbildung das Licht einen hinreichend langen Weg durchlaufen hat, etwa einige Dezimeter. Daraus wird geschlossen, daß das Photon durch sein zurücklaufendes Feld (vgl. Abschnitt 6) die Information auch über den Spalt erhalten hat, den es selbst nicht durchlaufen hat. Das Feld bewirkt beim Rücklauf die dazu gehörigen Richtungsänderungen, wie ebenfalls im Abschnitt 6 erläutert wird.

#### 5.4. Frequenzminderung nach der Beugung

Smekal [66] sagte in der Arbeit, in der er auch den Raman-Effekt voraussagte, ebenfalls voraus, daß nach der Beugung das Licht eine niedrigere Frequenz haben müßte. Nieke [67] führte dazu Experimente durch, wo er die Frequenzminderung mit Laser und einer Lummer-Gehrcke Platte nachweisen konnte. Dabei tritt keine Verschiebung der gesamten Linie ein, sondern nur eine Verbreiterung nach niedrigeren Frequenzen.

Der Raman-Effekt erforderte mit konventionellen Lichtquellen stundenlange, ja tagelange Belichtungszeiten. Mit dem Laser ist der Raman-Effekt heute einfach auszuführen. Mit der Frequenzminderung ist es ähnlich, mit Laserstrahlung ist der Nachweis des Effektes der Frequenzminderung bei den notwendigen kleinen Spaltweiten ebenfalls leicht ausführbar.

#### 5.5. Die Machschen Streifen

Mach [68] begründete die nach ihm genannten Streifen an rotierenden schräg begrenzten sternförmigen Figuren mit der Reaktion auf den zweiten Differentialquotient der Intensität nach dem Ort bei Netzhaut und photographischer Emulsion und als physiologischen Effekt. Nieke [69] wies mit objektiven Strahlungsempfängern und photographischen Momentaufnahmen nach, daß es sich um einen physikalischen Effekt handelt. Er führt es auf eine örtlich und zeitliche Verschiebung der Reflexion an der Kante von Photon und seinem Feld zurück, also als Beugung an der bewegten Kante.

#### 5.6. Experimente in der Schlierenapparatur

Nieke [70] erweiterte Newtons Beugungsexperimente in einer Schlierenapparatur. Eine Schlierenapparatur gestattet eine Trennung gebeugten Lichtes von nicht hinreichend gebeugtem Licht, denn das letztere wird von der Schlierenblende abgefangen. Ohne Objekt erscheint das Bildfeld in einer Schlierenapparatur praktisch dunkel. Bringt man nun einen Spalt in den Strahlengang, so erscheint als Bild des Spaltes je ein Doppelstreifen (Abb. 2b) an den Stellen, wo das Bild jeder Kante im Auflicht erschien. Jeder Doppelstreifen hat einen

a

b

c

d

e

*Bild 2. Strichzeichnung als Negativ der Ergebnisse des Schauversuchs nach Nieke [70]. In einer Schlierenapparatur nach Abbe wird Licht auf eine Lochblende fokussiert. Im Abstand der Brennweite steht ein Objektiv, das mit parallelem Strahlengang den Spalt beleuchtet. Dieser Spalt wird durch ein zweites Objektiv abgebildet, aber im bildseitigen Brennpunkt steht die Schlierenblende; die ungebeugtes Licht abfängt.*

*Die Größe der Schlierenblende kann man so wählen, daß die nullte Ordnung der Beugungsfigur an diesem Ort abgefangen wird. Dann ergibt nur gebeugtes Licht das Bild des Spaltes.*

*a: Bild des Spaltes im Auflicht.*

*b: Bild des Spaltes in einer Schlierenapparatur.*

*Das Bild besteht aus Doppelstreifen (Breite (1:1) maximal 0,1 mm), die durch einen dünnen dunklen Streifen getrennt sind. Ein Streifen liegt schattenseitig (!) und der andere lichtseitig jedes Kantenbildes.*

*c: Vor dem Abbildungsobjektiv ist eine Seite der Beugungsfigur des Spaltes abgedeckt.*

*d: Die andere Seite abgedeckt.*

*e: Schlierenblende durch eine Lochblende gleicher Größe ersetzt, es erzeugt nur Licht der nullten Ordnung das Bild. Die Beleuchtung ist dazu zu reduzieren damit keine Überstrahlung.*

dunklen Zwischenraum, der sich am Ort des Bildes der Kante im Auflicht befindet. Der äußere Teil jedes Doppelstreifens scheint also von der Spaltbacke herzukommen das schattenseitig gebeugte Licht muß schattenseitig versetzt sein.

Bei Kenntnis der Newtonschen Beugungsexperimente ist dieses Ergebnis nicht verwunderlich. Die Breite der Doppelstreifen ist von der Apertur der Abbildungsoptik abhängig und betrug  $< 0,1$  mm. Da Newton seitlich beobachtete, so konnte er nur einen Teil des Doppelstreifens sehen und mit  $0,03$  mm stimmt sein Resultat gut damit überein. Durch detaillierteres Abdecken konnte Nieke [70] jeder Ordnung zwei Gebiete im Spaltbild zuordnen. Es ist zu beachten, daß in der Schlierenapparatur die Zuordnung Beugungsfigur - Spaltbild gefunden wird und noch nicht die Zuordnung zum Gebiet im Spalt. Den dunklen Streifen im Doppelspalt an der Spaltkante, wird man als Spur des schattenseitig versetzten Lichtes deuten.

## **6. Deutung der Experimente: Das Photon mit Struktur und Feld**

Nach Kuhn [71] genügt es nicht, daß Experimente bekannt sind, die eine anerkannte Theorie falsifizieren, sondern es muß noch ein Paradigma anerkannt sein, welches die Erscheinungen insgesamt neu erklären kann. Das ist möglich, denn seit spätestens Hofstadter [72] ( $\approx 1960$ ) weiß man, daß Elementarteilchen eine Struktur haben. Somit ist die Wiederaufnahme des Problems von Welle Korpuskel eigentlich schon lange überfällig. Einstein konnte davon keinen Gebrauch machen, denn er starb bereits 1955.

Für das Photon gab Heisenberg [73] nebeneinander liegend Fermion und Antifermion mit Spin und Antispin als Isospin an.

Nieke [74] zeigte, daß Sommerfeld unbewußt bewiesen hat, daß die Schrödinger-Gleichung eine Formel der Wirbeldynamik sein kann. Dazu hat Sommerfeld [75] gezeigt, daß die äußere Einwirkung, die von einem zweiten Wirbel ausgeht, nicht die Beschleunigung, sondern die Geschwindigkeit bestimmt. Er schrieb: „Es ist eine sehr eigenartige Dynamik, die wir hier kennengelernt haben. Sie weicht in entscheidenden Punkten von der Dynamik der Massenpunkte ab. Schon die lex prima von Newton ist hier abgeändert. Der isolierte, also kräftefreie Wirbel, beharrt im Zustand der Ruhe. Der gleichförmig geradlinigen Bewegung ist er nur fähig im Verein mit einem zweiten Wirbel gleicher Stärke und entgegengesetztem Drehsinn oder unter Einwirkung einer Wand. ... Noch bemerkenswerter ist der Unterschied in der lex secunda. Die äußere Einwirkung, die von einem zweiten Wirbel ausgeht, bestimmt hier nicht die Beschleunigung, sondern die Geschwindigkeit. Dementsprechend ist auch die Aussage des Schwerpunktsatzes verschoben: Nicht die Schwerpunktsbeschleunigung ist Null, sondern die Schwerpunktschwindigkeit.“

Sommerfeld [76] konnte die klassische Wellengleichung und die Schrödinger-Wellengleichung so schreiben, daß sie sich außer den Faktoren  $h$  und  $i$  nur dadurch unterschieden, daß die klassische Wellengleichung die zweite Ableitung von  $\Psi$  nach der Zeit und die Schrödinger-Wellengleichung die erste

Ableitung nach der Zeit enthielten wie bei der Wirbeldynamik. Damit wird Einstein bestätigt, der stets eine System-Gesamtheit als Lösung der Schrödinger-Gleichung forderte. Daraus leitete Nieke [74] die Berechtigung ab, den Spin des Photon wirklich als Rotationsaggregat (des Feldes) oder Wirbelaggregat und nicht nur als formale Spinquantenzahl anzusehen. Damit ergibt sich in Übereinstimmung mit Heisenberg für das Photon die Struktur eines elektromagnetischen Wirbelpaares, das sind zwei Wirbel gleicher Wirbelstärke, aber entgegengesetztem Drehsinns, die in Ruhe instabil sind und sich mit konstanter Geschwindigkeit senkrecht zur Verbindungslinie der beiden Schwerpunkte und den Wirbelachsen bewegen.

Nach Dirac [77] interferiert jedes Photon mit sich selbst und nach Broglie u. Silva [78] dient die Welle als Steuerfeld für das Photon. Hier ist Welle durch Feld zu ersetzen, denn Licht hat ein elektromagnetisches Feld und so muß auch jedes Photon ein elektro-magnetisches Feld haben. Da jedes veränderliche elektromagnetische Feld nach Maxwell ein Wirbelfeld sein muß, so muß das Feld jedes Photons zum Photon wieder zurückkehren.

Daraus formulierte Nieke [74] ein Modell für die Beugung für Photonen mit elektromagnetischer Struktur und Feld. Vom Photon geht laufend, vor allem nach vorn, ein elektromagnetisches Feld aus (neue Formulierung für ein Huygenssches Prinzip), das normalerweise zum Photon zurückläuft. Wird aber das Feld unsymmetrisch am Rücklauf behindert, etwa durch einen Spalt, so hat das ehemalige Wirbelpaar nicht mehr die Struktur eines Wirbelpaares, sondern die von zwei Wirbeln entgegengesetzten Drehsinns, aber etwas ungleicher Wirbelstärke und ein solches Aggregat führt, etwa nach Sommerfeld [75], eine Schwenkung um seinen gemeinsamen Schwerpunkt aus, der außerhalb der Verbindungslinie beider Wirbel liegt. (Neue Formulierung für ein Interferenzprinzip.) Damit wurde ein Mechanismus für die Beugung als Ablenkung angegeben, der Licht als Welle völlig überflüssig macht.

Die Umformung der inneren Beugungsstreifen zu äußeren beim Dreieckspalt im Bild 1 nach Newton [3] diskutierte Nieke [74] mit dem Photon mit Struktur und Feld folgendermaßen: Innere Beugungsstreifen des Spaltes entstehen, wenn die Photonen nur die Information von der benachbarten Kante haben, weil zum Photon nur Feld zurückkehrte, das die Umgebung der benachbarten Kante passierte. Im Bereich der äußeren Beugungsstreifen haben die Photonen mit Struktur und Feld die Information vom gesamten Spalt, denn ihr inzwischen zurückgelaufenes Feld hat den gesamten Spalt passiert. Aber die gebeugten Photonen kommen doch nur aus einem engen Gebiet nahe der Kanten wie im Bild 2 gezeigt wurde. Also Newton [3] folgerte richtig: Licht läuft hier aalartig.

Newton und Young hatten richtig beobachtet. In der Schlierenapparatur läßt sich eindeutig entscheiden, daß gebeugtes Licht in der Tat teils von der Spaltbacke zu kommen scheint, es muß also schattenseitig versetzt sein, zum anderen Teil kommt gebeugtes Licht lichtseitig nahe der Kante. Zwischen beiden Gebieten erscheint in der Schlierenapparatur ein schmaler dunkler Streifen, den man als Spur des schattenseitig gebeugten Lichtes deuten wird.

Auch das Huygenssche Prinzip hat seine Berechtigung, wenn man es modernisiert und ergänzt: Jedes Photon sendet laufend ein elektromagnetisches Feld aus (vor allem nach vorn), das normalerweise zu seinem Photon zurücklaufen muß. Ist der Rücklauf unsymmetrisch behindert, bewirkt die Wechselwirkung von Photon mit Wirbelstruktur und seinem Feld eine Beugung als Richtungsänderung gemäß der Wirbeldynamik

Die Extrapolation der Formel (1) auf die Spaltebene ist zweifellos unzulässig und falsch, aber in großen Entfernungen erreicht das Feld sein Photon, welches den gesamten Spalt passiert hat. Dagegen in kurzen Entfernungen erreicht nur das in der Nähe der Kante passierende Feld sein Photon und erzeugt so die Beugungsfigur der näheren Kante.

Die Struktur des Photons ermöglicht es also, alle Eigenschaften des Lichtes - zunächst qualitativ - zu erklären, die man früher glaubte als Wellennatur des Lichtes zu beschreiben müssen.

Also Einstein [79] hatte recht! - eine Verschmelzung von Welle und Korpuskel ist möglich.

## **7. Einstein und die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie**

### **7.1. Einstein und die Newtonschen Beugungsexperimente**

Aus den bisherigen Abschnitten geht bereits hervor, daß Newton, zumindest mit unseren heutigen Kenntnissen, nicht nur behauptet, sondern bewiesen hatte, daß Licht niemals ein Welle sein kann. (Beobachtung 10 mit der Umwandlung innerer zu äußerer Beugungstreifen.) Dann hat Newton mit der Beobachtung 5 den Indeterminismus widerlegt mit dem Nachweis der Lokalisierung des gebeugten Lichtes in der engen Umgebung der Kante. Also mit seinen Beugungsexperimenten hatte Newton bereits die Kopenhagener Deutung widerlegt, die auf dem Dualismus von Welle und Korpuskel und dem Indeterminismus bei Quantenprozessen aufbaut.

Einstein [79] forderte statt des Dualismus eine Verschmelzung von Welle und Korpuskel und er bekämpfte den Indeterminismus (Gott würfelt nicht). Die Frage lautet also: warum hat Einstein die Möglichkeit der Beweisführung seiner Anschauung durch Newtons Beugungsexperimente nicht erkannt? Aus den Lehr- und Handbüchern seiner Zeit bekam er dazu nicht die geringsten Hinweise, denn darüber wurde seit etwa 1850 nirgends berichtet. Man könnte annehmen, Einstein habe die Newtonschen Beugungsexperimente nicht gekannt. Aber 1934 hat Einstein [80] zu Newtons Opticks ein Vorwort geschrieben, also er hat die Bedeutung der Newtonschen Beugungsexperimente nur nicht erkannt und sicher das 3. Buch nur flüchtig durchgeblättert. Allerdings hat Newton diese Experimente nicht betont, denn er konnte ja nicht ahnen, daß Fresnel diese einfach wegextrapolieren würde, auch wertete er seine Beugungsexperimente nur wenig für die Natur des Lichtes aus, denn eigentlich wollte er sie ja noch weiterführen, aber er wurde bekanntlich zum Direktor der Münze berufen. Einstein hätte sicher experimentieren müssen, um Fresnels Beugungsexperimente mißtrauischer zu beurteilen.

Einstein hätte aber keine Alternative bieten können, denn mit Lichtteilchen oder Photonen als Massepunkte konnte man in der Tat die Beugung physikalisch nicht begründen, dazu gab die Newtonsche Mechanik keine Möglichkeit. Das war ja die Chance der Welle, denn dort zeigten die Wasserwellen eine seitliche Ablenkung. Da zu Lebzeiten Einsteins eine Struktur der Elementarteilchen nicht denkmöglich war, gab es für ihn keine Möglichkeit, eine Alternative für seine ablehnende Haltung zu bieten.

### **7.2. Einsteins Arbeiten**

Einstein [81] begann seine erste Arbeit über die Quantentheorie von 1905: „Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied.“ Dabei ist die Energie im ponderablen Körper, der Atome und Elektronen nicht teilbar; nach der Undulationstheorie der Maxwellschen Theorie aber soll Licht beliebig teilbar sein. Aus dem Planckschen Strahlungsgesetz und aus vorliegenden Arbeiten über den lichtelektrischen Effekt schloß er auf die Existenz von Lichtquanten.

Einstein veröffentlichte 1905 drei grundlegende und berühmte Arbeiten. Die erste [81] über die Quantentheorie, die zweite [82] über die Wärme und die dritte [83] bildet die Grundlage der Relativitätstheorie. Alle drei Arbeiten hingen für Einstein über Entstehung, Struktur und Bewegung des Lichtes eng zusammen.

Bis 1923 vertrat Einstein fast als einziger ernsthaft die Quantenphysik, nach 1923 (Entdeckung des Compton Effektes) vertrat er sie weiterhin fast allein gegen Verwässerungen durch Dualismus von Welle und Korpuskel und statistische Deutung der Quantentheorie. Einstein stand also immer einsam auf weiter Flur, was er mehrfach beklagte.

Born [84] bezeichnete als Einsteins empirisches Glaubensbekenntnis: „Begriffe, welche sich bei der Ordnung der Dinge als nützlich erwiesen haben, erlangen über uns leicht eine solche Autorität, daß wir ihres irdischen Ursprungs vergessen und sie als unabänderliche Gegebenheiten hinnehmen. Sie werden

dann zu 'Denknotwendigkeiten', 'Gegebenheiten a priori' usw. gestempelt. Der Weg des wissenschaftlichen Fortschrittes wird durch solche Irrtümer oft für lange Zeit ungangbar gemacht.“

### 7.3. Dualismus von Welle und Korpuskel oder Komplementarität

Einstein [85] schrieb: „Es ist nicht zu verwundern, daß Newton von einer Undulationstheorie des Lichtes nichts wissen wollte, denn diese Theorie paßte recht schlecht zu seinem theoretischen Fundament. ... Die stärksten empirischen Argumente für die Wellen-Natur des Lichtes, bestimmte Fortpflanzungsgeschwindigkeiten, Interferenz, Beugung, Polarisierung, lagen noch nicht, beziehungsweise noch nicht übersichtlich vor, so daß er ein gutes Recht hatte, an seiner Emissionstheorie festzuhalten.“ Diese Bemerkung ist so nur möglich, da Einstein Newtons Beugungsexperimente nicht berücksichtigte, sonst hätte er sich entschieden für Newton und seine Emissionstheorie ausgesprochen.

Bohr [86] schrieb: „Die Lichtquantenhypothese kann jedoch keineswegs als eine befriedigende Lösung angesehen werden, weil man auf diesem Wege nicht nur bisher nicht zu einer Erklärung der Interferenzerscheinungen imstande war, die doch unser Hauptmittel bei der Untersuchung der Beschaffenheit der Strahlung bilden, sondern weil darüber hinaus sogar das Bild, das der Lichtquantenhypothese zugrunde liegt, die Möglichkeit einer sinngemäßen Definition der Schwingungszahl  $\nu$ , die ja eben in dieser Theorie eine Hauptrolle spielt, prinzipiell ausschließt.“ Dies ist das einzige Argument, das für Dualismus von Welle und Korpuskel oder Komplementarität vorgebracht werden kann: „Beugung und Interferenz sind mit Wellen und nur mit Wellen zu erklären.“

Aber bereits Mach [32] zeigte, daß alle Beugungs- und Interferenzexperimente nicht die Welle, sondern nur die Periodizität des Lichtes beweisen. Dabei wurde der Wellenbegriff viel zu weit gefaßt. Zumindest muß man jetzt unterscheiden zwischen physikalischer Welle, wo eine rücktreibende Kraft vorhanden ist, und einer mathematischen oder formalen Welle. So beruht die „Schallwelle“ auf Stoßprozessen, wo exzentrische Stöße das Huygenssche Prinzip vortäuschen. Schrödinger [87] schlug einen Stoßprozeß schon für den Compton Effekt vor.

### 7.4. Ausschließliche Wahrscheinlichkeit oder statistische Deutung

Einstein [88] schrieb: „Ich frage nun aber: Glaubt wirklich irgend ein Physiker, daß wir in diese bedeutenden Veränderungen der Einzelsysteme, ihre Struktur und Kausalzusammenhänge niemals werden Einblick erlangen können, trotzdem jene Einzelvorgänge dank der wunderbaren Erfindung der Wilson-Kammer und dem Geiger-Zähler in solche Erlebnisnähe gerückt sind? Dies zu glauben ist zwar logisch widerspruchsfrei möglich, widerstrebt aber meinem wissenschaftlichen Instinkt so lebhaft, daß ich es nicht unterlassen kann, nach einer vollständigen Auffassungsweise zu suchen.“ Als Ursache dieser Unvollständigkeit und damit des statistischen Zustandes schrieb Einstein [89] : „Die  $\psi$ -Funktion beschreibt überhaupt nicht einen Zustand, der dem einzelnen System zukommen könnte; sie bezieht sich vielmehr auf so viele Systeme, eine »System-Gesamtheit« im Sinn der statistischen Mechanik. Wenn die  $\psi$ -Funktion abgesehen von besonderen Fällen, nur statistische Aussagen über meßbare Größen liefert, so liegt dies also nicht nur daran, daß der Vorgang der Messung unbekannt, nur statistisch erfaßbare Elemente einführt, sondern eben daran, daß die  $\psi$ -Funktion überhaupt nicht den Zustand eines Einzelsystems beschreibt. Die Schrödinger-Gleichung bestimmt die zeitlichen Änderungen, welche die System-Gesamtheit erfährt, sei es ohne, sei es mit äußeren Einwirkungen auf das Einzelsystem.“

Einstein [90] nimmt zu den Einwänden 'seiner hochgeschätzten Kollegen Born, Pauli, Heitler, Bohr, Morgenau' Stellung: „Ich will im folgenden Gründe anführen, die mich davon abhalten, mich dieser Meinung fast aller zeitgenössischen theoretischen Physiker anzuschließen. Ich bin sogar fest davon überzeugt, daß der grundsätzlich statistische Charakter der gegenwärtigen Quantentheorie einfach dem Umstand zuzuschreiben ist, daß diese mit einer unvollständigen Beschreibung der physikalischen Systeme operiert.“ Und Einstein [91], ... die  $\psi$ -Funktion ist als Beschreibung nicht eines Einzelsystems, sondern

einer Systemgemeinschaft aufzufassen. Roh ausgesprochen lautet dies Ergebnis: Im Rahmen der statistischen Interpretation gibt es keine vollständige Beschreibung des Einzelsystems. Vorsichtig kann man so sagen: Der Versuch, die quantentheoretische Beschreibung der individuellen Systeme aufzufassen, führt zu unnatürlichen theoretischen Interpretationen, die sofort unnötig werden, wenn man die Auffassung akzeptiert, daß die Beschreibung sich auf die Systemgesamtheit und nicht auf das Einzelsystem bezieht. Es wird dann der ganze Eiertanz zur Vermeidung des 'Physikalisch-Realen' überflüssig. Es gibt jedoch einen einfachen physiologischen Grund dafür, warum diese naheliegende Interpretation vermieden wird. Wenn nämlich die statistische Quantentheorie das Einzelsystem (und seinen zeitlichen Ablauf) nicht vollständig zu beschreiben vorgibt, dann erscheint es unvermeidlich, anderweilig nach einer vollständigen Beschreibung des Einzelsystems zu suchen, dabei wäre von vornherein klar, daß die Elemente einer solchen Beschreibung innerhalb des Begriffsschemas der statistischen Quantentheorie nicht enthalten wäre. Damit würde man zugeben, daß dieses Schema im Prinzip nicht als Basis der theoretischen Physik dienen könne. Die statistische Theorie würde - im Fall des Gelingens solcher Bemühungen - im Rahmen der zukünftigen Physik eine einigermaßen analoge Stellung einnehmen wie die statistische Mechanik im Rahmen der klassischen Mechanik. Ich bin fest davon überzeugt, daß von solcher Art die Entwicklung der theoretischen Physik sein wird: aber der Weg wird langwierig und beschwerlich sein.

#### 7.5. Diskontinuität - Individualität - Quantenspringerei

Bohr [92] legte großen Wert auf die Betonung der Diskontinuität oder vielmehr Individualität als Eigenschaften atomarer Prozesse. Heitler [93] meinte: „... Es könnte sein, daß die Sprünge durch irgendwelche äußeren Einflüsse verursacht werden und daß dann die Zeit ihres Auftretens exakt vorausgesagt werden kann.“ ... „Ferner wurde von Anfang an angenommen, daß die Zeit, welche das Atom im höheren Zustand verbringt nicht ein fester bestimmter Zeitintervall  $\Delta t$  war, das in ein und demselben Anregungszustand für alle Atome dasselbe war, sondern daß die Lebensdauer der einzelnen Atome statistisch verteilt war und ein Gesetz der Wahrscheinlichkeit befolgte. Manche Physiker hofften auch, daß ihnen ein solcher Prozeß gelingen werde. Die weitsichtigeren unter ihnen erkannten die tiefen Veränderungen, welche das Vorhandensein solcher Sprünge für die klassische Auffassung bedeute, und niemand war sensitiver für eine solche Einsicht als Einstein selbst.“

Der entschiedenste Gegner der Quantenspringerei war Schrödinger. Nach [94] antwortete er auf den Einwand Bohrs, daß die Plancksche Strahlungsformel nur mit Quantensprüngen zu erklären sei, daß, wenn die verdammten Quantensprünge wirklich vorhanden seien, er sich lieber gar nicht mit der Quantenphysik beschäftigt hätte. Daß der Quantensprung unberechtigt ist, wurde bereits gezeigt. Ein Photon mit Struktur kann während der sog. Lebensdauer (bei sichtbarem Licht  $\approx 10^6$  Perioden) aufgebaut werden. Nach Nieke [55] bestimmt der Anteil der thermischen Energie den statistischen, aber doch determinierten Prozeß. Schrödinger konnte dies nur ahnen, aber nicht beweisen.

Die Vertreter der Kopenhagener Deutung fühlten sich sehr sicher, daß ihr theoretisches Gebäude ewigen Bestand habe, so schrieb Jordan [95]: „Die Geschichte der Physik ist nicht nur eine Geschichte der Erfolge, sondern auch eine Geschichte von Irrtümern“. Als Beispiel von Irrtümern nennt er Einsteins Festhalten an der Kausalität und Schrödinger, der durch seine Gleichung die ganze Quantenspringerei entbehrlich machen wollte. Hier hat er gerade Beispiele genannt, die zeigen, daß sich auch Jordan und Bohr irren konnten wie im Abschnitt 5 und 6 gezeigt wurde.

Die Kopenhagener Deutung zeichnet sich durch die Bequemlichkeit aus, die sie ihren Gläubigen liefert. Der Dualismus gestattet ein Umsteigen auf die 'Welle', die mit einer e-Funktion mit komplexem Exponent identifiziert mit dem Fourier Theorem gestattet, alles stückweise monotone, also jedes experimentelle Ergebnis, formal mathematisch darzustellen. Dann hält die statistische Deutung von der Mühe ab, den physikalischen Prozeß zu erkunden, denn es sind ja grundsätzlich nur Wahrscheinlichkeitsaussagen bei Quantenprozessen möglich. Damit waren zwar gute Anfangserfolge zu

erzielen, aber schon Broglie [96] schrieb: „Viel mehr sollte man der Gefahr aus dem Wege gehen, daß ein zu fester Glaube an den statistischen Charakter der Quantentheorie diese schließlich unfruchtbar macht.“ Dieser Zustand hat sich schon eingestellt.

Nach Heisenberg [97] gab es drei Gruppen der Gegner der Kopenhagener Deutung: 1. Anerkennung der Kopenhagener Deutung, aber unterlegen einer anderen Philosophie. 2. Versuche, die Quantentheorie in kritischen Punkten zu ändern, und damit die gleichen Resultate zu erreichen. 3. Ablehnung und allgemeine Unzufriedenheit ohne Gegenargumente wie Einstein und Schrödinger. Einsteins Ablehnung der Kopenhagener Deutung führte man auf ein instinktives Gefühl, daß es so etwas in der Natur nicht geben kann, oder auf mehr philosophisch-religiöse Gesichtspunkte zurück.

Einstein [98] schrieb: „Die ganzen fünfzig Jahre bewußter Grübeleien haben mich der Antwort der Frage ‘Was sind Lichtquanten’ nicht näher gebracht.“ Einstein [99]: „Die Quantenmechanik ist sehr achtunggebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, daß das noch nicht der wahre Jacob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, daß er nicht würfelt.“ Pais [100] erläutert die Vision Einsteins: „Er forderte, daß die Theorie strikt kausal sein soll ... und die Quantenpostulate Konsequenzen der allgemeinen Feldgleichung sein sollen.“ So stellt auch Klein [101] heraus, daß es das Ziel Einsteins war, eine Feldtheorie, die Elektromagnetismus und Gravitation einbezieht, wobei die Quellen des Feldes in nicht-singulärer Weise einbezogen sind.

#### 7.6. Stimmen der Kritik nach Einstein

In der Zeit nach dem zweiten Weltkrieg hatte sich die Kopenhagener Deutung durchgesetzt, in Lehrbüchern war jetzt nur die Heisenberg-Bohrsche Quantentheorie ohne kritische Anmerkungen zu finden. Es war also die gleiche Situation wie nach 1850, wo nur die Fresnelsche Theorie gebracht und die Newtonschen Beugungsexperimente verschwiegen wurden. Allerdings wurde Einstein nicht so vollständig unterdrückt wie damals Newtons Beugungsexperimente, in historischen Betrachtungen ist die Anschauung Einsteins noch zu finden, nicht aber Newtons Beugungsexperimente.

Aber auch in dieser Zeit gab es noch kritische Stimmen. z. B. Landé [102] lehnte die Wellendeutung der Beugung ab und versuchte diese mit der Quantenbedingung nach Duane [103] zu erklären, die einen Impuls senkrecht zur Ausbreitungsrichtung proportional  $h/\text{Fourierkomponente}$  der Raumstruktur des Beugers forderte. Dann ist Bohm [104] zu nennen, er vertrat den Determinismus und Aufspaltung der Wellenfunktion.

Ein ausführliches Literaturverzeichnis über die Verbindung von Quantentheorie und Information findet man bei Wheeler [105], Schweber [106] analysiert die Krise der theoretischen Physik. Diese suchen nur deren Ursache bei Bohr oder später, nach dieser Arbeit muß die Suche bereits bei Newton und Fresnel einsetzen.

#### 7.7. Zusätzliche Betrachtungen

Fragen der Beugung oder Kohärenz werden meist mit der Fourierzerlegung mathematisch formuliert, wobei auch die Quantenfeldtheorie und die Quantenelektrodynamik herangezogen wird. Feynman [107] schrieb in seiner populärwissenschaftlichen (sonst werden derartige Grundlagen nicht so klar und zitierfähig geäußert) Einführung zur Quantenelektrodynamik (QED): „Nein, Sie werden es nicht verstehen. ... auch meine Physikstudenten verstehen es nicht. Und zwar, weil ich es nicht verstehe. Niemand begreift es.“ „... entzieht sich die Art und Weise, wie die Natur nötigt, sie zu beschreiben, unserem Verständnis ganz allgemein.“ „... , daß man der Natur einzig und allein auf diese Weise beikommen kann.“ (Mit Wahrscheinlichkeitsamplituden).

Diese Theorie ist also formal mathematisch und wird philosophisch nur durch die Kopenhagener Deutung gestützt. Die ausschließlichen Wahrscheinlichkeitsaussagen begründete er hier mit dem Nichtverständnis der partiellen Reflexion der Photonen. Hier weist aber die Abhängigkeit von der

Brechzahl und die Winkelabhängigkeit der Polarisation auf eine Struktur der Photonen, so daß ein zukünftiges Verständnis nicht so ausgeschlossen erscheint.

Daß Licht nur an der Kante gebeugt wird, davon weiß Feynman offensichtlich (dort Abb. 33 und 34) nichts. Er betonte, daß Newton mit seiner Teilchentheorie recht hatte, meinte aber, daß seine Beweisführung falsch war. Feynman hatte sicher Newtons Optik III nicht oder nur flüchtig gelesen.

Ausführliche Überlegungen zur Alternative stellte Nieke [108] an.

## Literatur I.

- [1] F. M. Grimaldi, *Physico-mathesis de lumine, coloribus et iride*. Bonniae 1665.
- [2] C. Huygens, *Treatise on Light*. Macmillan, London 1912; *Traité de la lumière*. Lipsiae 1805; *Abhandlungen über das Licht* (1678). Ostwald's Klassiker Nr. 20. Engelmann, Leipzig 1890.
- [3] Newton, *Opticks, or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*. London 1704; *Opera quae exstant omnia*. Tom IV. London 1782; Reprint, Bruxelles 1966; *Optik II + III*. Übers. W. Abendroth: Ostwald's Klassiker Nr 97 Engelmann, Leipzig 1898; Neuauflage Bd. 96/97, Vieweg, Braunschweig 1983. *Optique*, Trac. J. P. Marat, 1787; *Reproduction*. Bourgois, Paris 1989.
- [4] T. Young, *A course of lecture on natural philosophy and mechanical arts*. London 1807.
- [5] A. J. Fresnel, *Oeuvres Complètes I*. Paris 1866; *Abhandlungen über die Beugung des Lichtes*. Ostwalds Klassiker Nr. 215, Engelmann, Leipzig 1926.
- [6] A. Kalaschnikov, *J. Russ. Phys. Ges.* **44** (1912), zitiert nach Laue [18] S. 332.
- [7] Rubinowicz, *Ann. Physik (IV)* **53** (1917) 257 315.
- [8] R. M. Shoucri, *Optik* **31** (1970) 315.
- [9] F. Rosenberger, *Isaac Newton und seine Prinzipien*. Barth, Leipzig 1895, S. 300-1.
- [10] M. v. Laue, *Naturwissenschaften* **15** (1927) 276.
- [11] A. R. Hall, *All Was Light, an introduction to Newton's Optics*. Clarendon Press, Oxford 1993.
- [12] H. Nieke, *Newtons Beugungsexperimente und ihre Weiterführung*. Halle 1997, Comp. print 1. Arbeit 1.
- [13] H. Nieke, *Exp. Techn. Physik* **31** (1983) 119.
- [14] S. Ganci, *Am. J. Phys.* **20** (1989) 370
- [15] C. Malange u. J. Gronkowski, *phys. stat. sol. (a)* **85** (1984) 389.
- [16] Wie [12], Arbeit 3.
- [17] K. Schwarzschild, *Math. Ann.* **55** (1902) 177.
- [18] A. v. Laue, In: *Handbuch der Experimentalphysik* Bd. 18. Akad. Verl. Ges., Leipzig 1928 S. 316.
- [19] W. Arkadiew, *Ph ys. Z.* **14** (1913) 832.
- [20] J.P. W. Herschel, *On the Theory of Light*. 1828; *Vom Licht*. Übers. J.E.E. Schmidt, Stuttgart u. Tübingen 1831, S. 335.
- [21] J. B. Biot, *Précis élémentaire de physique expérimentale*. Paris 1818-21. *Lehrbuch der Experimental-Physik oder Erfahrungs-Naturlehre*. Übers. G.T. Fechner, Voß, Leipzig 1829 Bd. 5, S. 105.
- [22] J. Z. Buchwald, *J. Optics (Paris)* **20** (1989) 109.
- [23] J. Orear, *Fundamental Physics*. Wiley New York 1961; *Grundlagen der Physik*. Hanser, München und Wien 1975, S. 314.
- [24] Hiller a. E. Ramberg, *J. Appl. Phys.* **18** (1947) 48.
- [25] H. Hönl, A. W. Maue u. K. Westphal, In: *Handbuch der Physik* Bd. XXII/1. Springer, Göttingen, Heidelberg, Berlin 1961.
- [26] G. Kirchhoff, *Vorlesungen über mathematische Optik*. Teubner, Leipzig 1891.

- [27] A. Sommerfeld, Vorlesungen über theoretische Physik Bd. IV, Optik. Dietrich, Wiesbaden 1950, S. 271.
- [28] A. Rubinowicz, Ann. Physik (IV) **53** (1917) 257.
- [29] A. Rubinowicz, In: Hrsg. E. Wolf: Progress in Optics, Vol. IV, North-Holland, Amsterdam 1965, S. 201.
- [30] F. Kottler, Ann. Physik (IV) **70** (1923) 405; **71** (1923) 457.
- [31] F. Kottler In: Ed. E. Wolf: Progress in Optics, Vol. IV North-Holland, Amsterdam 1965, S. 233.
- [32] E. Mach, Die Prinzipien der physikalischen Optik. Barth, Leipzig 1921; The Principles of Physical Optics. New York 1926.
- [33] M. E. Verdet, Ann. Sci. L'Ecole Norm. Super. (Paris) **2** (1865) 291.
- [34] Wie [12], Arbeit 4
- [35] E. Berge, Math. naturwiss. Unterricht **27** (1974) 326
- [36] H. P. Cittert, Physica **1** (1934) 201.
- [37] F. Zernicke, Physica **5** (1938) 785.
- [38] S. I. Wawilow, Die Mikrostruktur des Lichtes. Akademie-Verl. Berlin 1954, S. 62, 76 u. 84.
- [39] G. T. Reynolds, K. Spartalian a. D. B. Scarl, Nuovo chim. **61** B (1969) 355.
- [40] P.A. M. Dirac. Die Prinzipien der Quantenmechanik. Hirzel, Leipzig 1930, S. 2. The Principles of Quantum Mechanics. Clarendon Press, Oxford 1935, 1947, 1958, p. 9. wie Newton [3], aber Buch II.
- [41] A. Michelson, Phil. Mag. **30** (1890) 1.
- [42] F. Vinson, Optische Kohärenz. Akademie-Verlag, Pergamon-Press, Vieweg, Berlin, Oxford, Braunschweig, WTB Bd. 85 (1971).
- [44] J. Perina, Coherence of Light. Norstrand, London, N. Y., Cincinnati, Toronto, Melbourne 1971.
- [45] R. E. Kinzly, J. Opt. Soc. Am. **55** (1965) 1002.
- [46] P. S. Considine, J. Opt. Soc. Am. **56** (1966) 1001.
- [47] B. J. Thomson, Ed. E. Wolf, Progress in Optics VII (1969) 170.
- [48] H. Nieke, Exp. Techn. Physik **31** (1983) 53.
- [49] Ch. Hofmann, Fortschr. Physik **27** (1979) 595; Exp. Techn. Physik **28** (1980) 403.
- [50] F. Zernicke, Physica **9** (1942) 686.
- [51] F. T. 5. Yu, Ed. E. Wolf, Progress in Optics XXIII (1986) 222.
- [52] K. Pietsch u. E. Menzel, Optik **49** (1977) 203.
- [53] E. Menzel, W. Mirade u. I. Weingärtner, Fourieroptik und Holographie. Springer, Wien u. New York 1973, Zitat im Vorwort.
- [54] B. Hanbury-Brown a. R. Q. Twiss, Proc. Roy. Soc. London **242** (1957) 300; **243** (1958) 291.
- [55] Wie [12], Arbeit 15.
- [56] G. Magyar a. L. Mandel, Nature **198** (1963) 255.
- [57] G. Richter, W. Brunner u. H. Paul, Ann. Physik (7) **14** (1964) 239
- [58] P. L. Kapitza a. P. A. M. Dirac, Proc. Cambridge Phil. Soc. **28** (1933) 297.
- [59] H. Schwarz, Z. Phys. **204** (1967) 276; Phys. Bl. **26** (1970) 436.
- [60] R. H. Stuewer, Isis **61** (1970) 188-205.
- [61] H. Arndt u. H. Nieke, Z. Psychol. **193** (1985) 295.
- [62] Wie [12], Arbeit 5.
- [63] Wie [12], Arbeit 8.
- [64] L. de Broglie, Die Elementarteilchen,. Govarts, Hamburg 1943.
- [65] M. Born, Physics in my Generation. Pegamon, London 1956; Physik im Wandel meiner Zeit. Vieweg, Braunschweig u. Akademie-Verlag, Berlin 1958.
- [66] A. Smekal, Naturwiss. **11** (1923) 973.
- [67] Wie [12], Arbeit 6.
- [68] E. Mach, Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, math.-naturwiss. Kl. Abt. II, **52** (1865) 302; **54** (1866) 131; **57** (1868) 11; **115** (1906) 635.
- [69] H. Nieke, Exp. Techn. Physik **31** (1983) 53.
- [70] Wie [12], Arbeit 2.
- [71] S. Kuhn, The structure of scientific revolutions. Chicago 1962; Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. Suhrkamp, Frankfurt M 1973.
- [72] R. Hofstadter, Rev. Mod. Phys. **28** (1956) 214, **30** (1958) 482; Phys. Bl. **18** (1962) 193.
- [73] W. Heisenberg, Introduction to the Uniform Field Theory of Particles. New York 1966. Einführung in die einheitliche Feldtheorie der Elementarteilchen. Hirzel, Stuttgart 1967. S. 116.

- [74] Wie [1-12], Arbeit 12.
- [75] A. Sommerfeld, Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. II, Mechanik der deformierbaren Medien. Akad. Verlagsges. Leipzig 1945, S. 155.
- [76] A. Sommerfeld, Atombau und Spektrallinien. Bd. II. Vieweg, Braunschweig 1960. Gleichungen (I.1.5) und (I.6.9a);  
Atomic Structure and Spectrallines. Methuse, London 1923, 1930, 1934.
- [77] P. A. M. Dirac, Die Prinzipien der Quantenmechanik. Hirzel, Leipzig 1930.  
The Principles of Quantum Mechanics. Clarendon Press, Oxford 1935, 1947, 1958, p. 9.
- [78] L. de Broglie a. J. A. E. Silva, Phys. Rev. (2) **172** (1968) 1284.
- [79] A. Einstein, Phys. Z. **18** (1917) 121.
- [80] Wie [3] Reprint from the fourth edition 1730 (with a Foreword by Albert Einstein and an Introduction by Sir E. T. Whittaker) 1934.
- [81] A. Einstein, (Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt) Ann. Physik (IV) **17** (1905) 132-148.
- [82] A. Einstein, (Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderten Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen) Ann. Physik (IV) **17** (1905) 549-560.
- [83] A. Einstein, (Zur Elektrodynamik bewegter Körper) Ann. Physik (IV) **17** (1905) 891-912.
- [84] A. Schlipp (Ed.): Albert Einstein, Philosoph - Scientist. Evaston (USA) 1949 and 1951.  
A. Schlipp (Hrsg.): Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher. Kohlhammer, Stuttgart 1956.  
N. Born: Einsteins statistische Theorien. Zitat S. 96 bezieht sich auf A. Einstein, Phys. Z. **17** (1916) 101.
- [85] A. Einstein, Out of my later years. Phil Lib. New York 1950.  
Aus meinen späten Jahren. D. Verl. Anst. Stuttgart 1979 (2. Aufl.) S. 109.
- [86] N. Bohr, Z. Phys. **13** (1923) 117, Zitat S. 157.
- [87] Schrödinger, Über den Indeterminismus in der Physik. Barth, Leipzig 1932, S. 15.
- [88] A. Einstein, Wie [85], S. 99-100.
- [89] A. Einstein, Wie [85], S. 97-98.
- [90] A. Einstein, Wie [84], Zitat S. 493-494.
- [91] A. Einstein, Wie [84], S. 498.
- [92] N. Bohr, Atomtheorie und Naturbeschreibung. Springer, Berlin 1931, S. 35;  
Atomic Theory and the Description of Nature. Univ. Press Cambridge 1949
- [93] W. Heitler, In [84], S. 98-114, Zitat S. 100
- [94] W. Heisenberg, In: W. Pauli (Ed.): Niels Bohr - and the development of physics. Pergamon, London 1955, S. 12-29, Zitat S. 14.
- [95] P. Jordan, Albert Einstein - Sein Lebenswerk und die Zukunft der Physik. Huber, Fraunfeld u. Stuttgart 1969, S. 49.
- [96] L. de Broglie, La Physique quantique restera-t-elle indéterministe? Gauthier-Villars, Paris 1953  
Phys. Bl. **9** (1953) 488-497 u. 541-548
- [97] W. Heisenberg, Physics and Philosophy. Harper & Brothers York 1958.  
Physik und Philosophie. Hirzel, Stuttgart 1972, S. 119.
- [98] In: A. Pais, „Raffiniert ist der Herrgott ...“ Albert Einstein - eine wissenschaftliche Biographie. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1986, S. 389  
‘Subtle is the Lord ...’ The Science and Life of A. Einstein. Clarendon, Oxford 1982.
- [99] In: M. Born, The Born-Einstein Letters. Walker, New York 1971.  
Albert Einstein - Hedwig und Max Born - Briefwechsel. Nymphenburger, München 1969, S. 96.
- [100] Wie [99], S. 473
- [101] A. P. French (Ed.), Einstein - A Century Volume. Heinemann 1979  
A. P. French (Hrsg.): Albert Einstein - Wirkung und Nachwirkung. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden 1985  
Hier in: M. J. Klein: Einstein und die Entwicklung der Quantenphysik. S. 227-252.
- [102] A. Landé, Ann. Physik (7) **33** (1976) 88.
- [103] W. Duane, Proc. Nat. Sci. Wash. **9** (1923) 158.
- [104] D. Bohm, Phys. Rev. **85** (1952) 166; **87** (1952) 389);  
Ref.: D. A. Albert, Spektr. Wiss. Juli 1994, 70.
- [105] J. W. Wheeler, In: Proc. 3rd Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics, Tokyo, 1989, p. 354-368.

- [106] S. S. Schweber, *Physics Today*, Nov. 1993, 34.
- [107] R. F. Feynman, *QED - The strange theory of light and matter*. Princeton Univ. Press, Princeton 1985;  
QED - Die seltsame Theorie des Lichtes und der Materie. Piper, München, Zürich 1985, S. 20, 92, 93.
- [108] Wie [1-12], Arbeit 20.