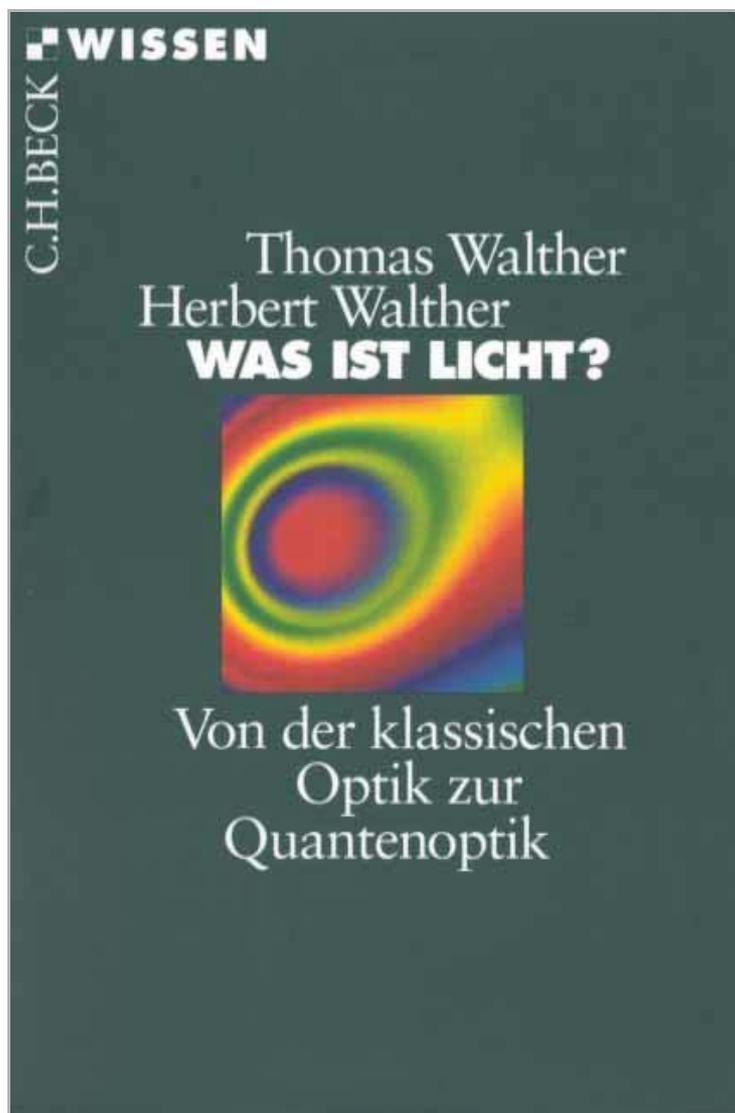


**Unverkäufliche Leseprobe**



**Thomas Walther, Herbert Walther**  
**Was ist Licht?**

Von der klassischen Optik zur Quantenoptik

2021. 136 S., mit 40 Abbildungen und 10 Farbtafeln  
ISBN 978-3-406-44722-8

Weitere Informationen finden Sie hier:  
<https://www.chbeck.de/11755>

© Verlag C.H.Beck oHG, München  
Diese Leseprobe ist urheberrechtlich geschützt.  
Sie können gerne darauf verlinken.

Fast alle Lebewesen leben direkt oder indirekt vom Licht. Aber obwohl Licht für uns das Selbstverständlichste der Welt ist, so ist doch die Frage nach seiner Natur ungleich schwieriger zu beantworten, wie nicht zuletzt die Geschichte seiner wissenschaftlichen Erforschung zeigt. Dieses Buch gibt einen gut verständlichen Überblick über die wichtigsten Kontroversen und Erkenntnisse über die Physik des Lichts. Es erläutert seine Eigenschaften und Erscheinungsformen, erklärt zentrale Anwendungsgebiete des Lichts in Wissenschaft und Technik und stellt die wichtigsten Entwicklungen und Ergebnisse der gegenwärtigen Forschung vor.

*Thomas Walther* war von 1998 bis 2001 Assistant-Professor an der Fakultät für Physik der Texas A&M University (USA). 1997 erhielt er den Michelson-Postdoctoral-Lectureship-Prize (CWR University, USA). Seit Januar 2002 ist er Professor für Experimentalphysik an der TU Darmstadt (Institut für Angewandte Physik).

*Herbert Walther* war bis zu seinem Tod im Jahr 2006 Professor für Physik an der Universität München sowie Direktor des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik in Garching. Für seine wissenschaftlichen Arbeiten erhielt er u. a. den Max-Born-Preis (Großbritannien), den King Faisal Prize (Saudi-Arabien), die Charles Townes Medal (USA), die Michelson-Medaille (USA) und die Stern-Gerlach-Medaille (Deutschland).

Thomas Walther  
Herbert Walther

# **WAS IST LICHT?**

Von der klassischen Optik  
zur Quantenoptik

Verlag C. H. Beck

Mit 40 Abbildungen und 10 Farbtafeln

1. Auflage. 1999  
2., aktualisierte Auflage. 2004

3., aktualisierte Auflage. 2010

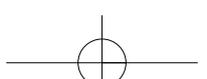
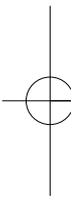
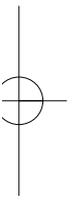
Originalausgabe  
© Verlag C. H. Beck oHG, München 1999  
Gesamtherstellung: Kösel, Krugzell  
Umschlagentwurf: Uwe Göbel, München  
Printed in Germany  
ISBN 978 3 406 44722 8

*www.beck.de*

# Inhalt

Vorwort . . . . .	7
<b>1. Im Licht der Geschichte . . . . .</b>	<b>8</b>
1.1 Erste Anfänge der Optik . . . . .	8
1.2 Welle oder Teilchen – die große Streitfrage . . . . .	10
1.3 Die Wellengleichung – das letzte Wort? . . . . .	14
1.4 Die Quantenhypothese . . . . .	15
1.5 Auch Teilchen sind Wellen . . . . .	16
1.6 Wie entstehen elektromagnetische Wellen und Licht? . . . . .	17
<b>2. Klassisches Licht –   Zusammenfassung der Eigenschaften und Phänomene</b>	<b>31</b>
2.1 Polarisation . . . . .	32
2.2 Brechung und Dispersion . . . . .	34
2.3 Beugung . . . . .	44
2.4 Kohärenz und Interferenz . . . . .	46
<b>3. Moderne Optik . . . . .</b>	<b>53</b>
3.1 Der Laser . . . . .	54
3.2 Ultrakurze Lichtpulse . . . . .	68
3.3 Nichtlineare Optik . . . . .	75
3.4 Licht trägt Nachrichten . . . . .	79
3.5 Spektroskopie mit einzelnen Ionen . . . . .	82
3.6 Gravitationswelleninterferometer . . . . .	88
3.7 Andere Laseranwendungen . . . . .	91
<b>4. Quantenphänomene des Lichts – Quantenoptik . . . . .</b>	<b>92</b>
4.1 Interferenzen einzelner Photonen . . . . .	92
4.2 Die Korrelation von Photonen . . . . .	97
4.3 Weiteres zur Quantenbehandlung des Lichts und die Interferenz von Licht verschiedener Lichtquellen . . . . .	112
4.4 Das Vakuum ist nicht leer . . . . .	117

4.5 Nichtklassisches Licht . . . . .	119
4.6 Experimente mit Photonenpaaren . . . . .	126
4.7 Experimente mit verschränkten Photonen . . . . .	128
<b>5. Schlußbemerkung . . . . .</b>	<b>133</b>
<b>6. Sachregister. . . . .</b>	<b>135</b>



## Vorwort

In diesem Buch haben wir versucht, die wichtigsten Eigenschaften des Lichts und der damit verbundenen Phänomene, wie sie uns täglich begegnen, zusammenzustellen. Auch wird eine Auswahl der wichtigsten technischen Anwendungen angesprochen. Einen breiten Raum nimmt dabei natürlich der Laser ein und die neuen Möglichkeiten, die diese einzigartige Lichtquelle mit sich gebracht hat. Unter dem Einsatz des Lasers sind auch eine ganze Reihe neuer Untersuchungen zur Quantennatur des Lichts durchgeführt worden, die wiederum zum besseren Verständnis des Lichts selbst geführt haben. Es hat den Anschein, daß gerade die Quantenphänomene des Lichts in Zukunft in der Technik eine große Anwendung finden werden.

Wir hoffen, daß dieses Buch dazu beitragen wird, das Interesse an den Erscheinungen des Lichts zu wecken, und daß die Faszination, die die Autoren bei der Beschäftigung mit der Materie empfinden, sich auch auf den Leser übertragen wird. Wir wissen, daß einige der Dinge, die wir beschreiben, für Laien schwer verständlich sind. Wir haben uns bemüht, die schwierigen Zusammenhänge so einfach wie möglich zu erklären, ohne daß die wissenschaftlichen Tatsachen zu sehr auf der Strecke bleiben.

Die Autoren danken Frau Ingrid Hermann für die Herstellung vieler Abbildungen dieses Buches.

*College Station und  
München, im Mai 1999*

*Thomas und Herbert Walther*

# 1. Im Licht der Geschichte

## 1.1 Erste Anfänge der Optik

Licht hat seit jeher die Menschheit beschäftigt und ihr Verhalten beeinflußt. Schon in der Genesis spielt Licht eine entscheidende Rolle. Licht als Gegensatz zur Finsternis gehört zu den religiösen Ursymbolen der Menschheit. Das Licht wird als der Lebenserwecker angesehen, der die Todesstarre der Natur in den dunklen Wintermonaten vertreibt. Die Frühjahrs-sonnenwende hat deshalb insbesondere bei Kulturen des Nordens immer eine große Rolle gespielt. Es ist sicher, daß Denkmäler wie Stonehenge bei Wiltshire in England (erbaut etwa 2000 v. Chr.) und Carnac in der Normandie, Frankreich, und die dort praktizierten Kultgewohnheiten mit diesem Ereignis in Zusammenhang standen.

Licht galt immer als Symbol des Lebens, während die Finsternis als unheilvoll angesehen wurde. Diese Vorstellungen sind in viele Religionen eingeflossen. Die Mythologie kennt Lichtgötter, die im Kampf mit den Mächten der Finsternis stehen. Als uraltes Kultsymbol wird das Licht in der Form des Feuers wie auch der Kerze als Mittel der Vertreibung der Dämonen angesehen und bei sakralen Handlungen verwendet. Es ist nicht verwunderlich, daß die Menschen im Rahmen ihrer Kulturgeschichte immer versucht haben das Licht und seine Eigenschaften zu verstehen und sich nutzbar zu machen.

Nach der Überlieferung waren viele Prinzipien des Lichts bzw. der Optik als der Lehre des Lichts bereits im Altertum bekannt. Es war insbesondere der griechische Mathematiker Euklid, der im 3. Jahrhundert vor Christus an der Platonischen Akademie in Alexandria wirkte und in seinem Werk über Optik wichtige Grundsätze der sogenannten geometrischen Optik beschrieben hat, die sich aus der geradlinigen Ausbreitung des Lichtes ergeben. Ein Beispiel dafür ist das Gesetz der Reflexion von Licht. Euklid als Geometriker brachte natürlich die mathematischen Grundlagen mit, diese fundamentalen Tatsachen der Optik zu beschreiben.

Der aus Sizilien stammende griechische Mathematiker Archimedes, der in Alexandria studierte und um 280 v. Chr. nach Syrakus zurückkehrte, soll durch eine Bündelung des Sonnenlichts mit großen Brennsiegeln Teile der Flotte der Römer vernichtet haben, als diese Syrakus erobern wollten. Archimedes hatte bei der römischen Belagerung auch andere Kriegsmaschinen wie Katapulte erfunden, mit denen schwere Steinblöcke auf die angreifenden Schiffe geworfen werden konnten, und Kräne, die unter Ausnutzung der von ihm formulierten Hebelgesetze von den Festungsmauern aus die Schiffe packen konnten. Die Belagerung endete im Herbst 212 v. Chr., als einige der Belagerten überliefen. Beim Sturm der Römer auf die Stadt wurde Archimedes, wie Plutarch berichtet, von einem römischen Soldaten erschlagen, dem er verboten hatte, sich Figuren zu nähern, die er bei seinen Überlegungen in den Sand gemalt hatte.

Ein weiteres Zeugnis des Optik-Wissens der Antike ist in einem Buch des griechischen Naturforschers Ptolemäus zusammengefaßt, der in Alexandria im 2. Jahrhundert nach Christus lehrte. Es behandelt die geometrischen Aspekte der Optik, einschließlich der Reflexion, im wesentlichen auf der Basis von Euklid und von Heron von Alexandria. Es schließt auch das Phänomen der Brechung des Lichtes zwischen Medien unterschiedlicher Dichte ein, wie z. B. bei Luft-Wasser oder Luft-Glas. Ptolemäus kommt zu den richtigen Ergebnissen, allerdings wird ein Gesetz für die Brechung noch nicht angegeben.

Der oben erwähnte Heron von Alexandria war ebenfalls Grieche und lebte im 1. Jahrhundert nach Christus. Seine Arbeiten wurden stark von denen des Archimedes beeinflusst. Heron hat sich in seinen optischen Arbeiten mit der Wegevermessung mit einem Instrument, „Dioptra“ genannt, das eine Art Theodolit darstellte, beschäftigt. Darüber hinaus hat er sich in seinen Schriften auch viel mit Problemen der Mechanik und Pneumatik im Zusammenhang mit dem Geschützbau befaßt.

Das wichtigste Werk über Optik aus dem Mittelalter stammt von Ibn al-Haitham oder Alhazen, wie er mit lateinischem

Namen heißt. Er stammte aus Basra und lebte um 1000 n. Chr. in Kairo. Er beschreibt den Vorgang des Sehens wesentlich besser als alle seine Vorgänger, kannte die vergrößernde Wirkung von Linsen, die sphärische Aberration, behandelte parabolische Spiegel, konnte beweisen, daß das Licht des Mondes von der Sonne herrührt, beschrieb den Regenbogen, die atmosphärische Brechung und die scheinbare Vergrößerung von Himmelskörpern am Rande des Erdhorizonts. Seine Schriften waren zusammen mit denjenigen von Ptolemäus die Grundlagen der Optik bis ins 17. Jahrhundert. Danach setzte eine stürmische Entwicklung der Erkenntnisse der Optik ein, die teilweise mit einer besseren quantitativen Beschreibung der Phänomene zusammenhing, aber auch mit der Tatsache, daß die Herstellung der Linsen und die experimentelle Beobachtung als solche wesentlich verfeinert werden konnten. Wir wollen bei der geschichtlichen Betrachtung im folgenden nur noch auf diejenigen Schritte der Erkenntnis über das Licht eingehen, die für unsere spätere Diskussion von besonderem Interesse sind.

## 1.2 Welle oder Teilchen – die große Streitfrage

Ein wesentlicher Schritt zum Verständnis des Lichts war die Beobachtung der Interferenzerscheinungen. Ähnlich wie Wasserwellen folgt Licht dem Superpositionsprinzip, d.h., treffen zwei Wellen gleichzeitig an einem Ort ein, müssen die Amplituden addiert werden. Wenn Lichtstrahlen ausgehend von einem Ort zu einem Auffänger gelangen, dabei aber jeweils geringfügig unterschiedliche Wege und damit Weglängen durchlaufen, stellt man fest, daß die Fläche des Auffängers nicht gleichmäßig beleuchtet wird. Es treten helle und dunkle Stellen auf, die je nach der experimentellen Anordnung Ringe mit variablem Abstand oder parallele Streifen bilden. Die ersten Experimente dazu sind Anfang des 17. Jahrhunderts von dem Franzosen Robert Boyle und dem Engländer Robert Hooke durchgeführt worden. Eine Erklärung dieser Erscheinung legte nahe, daß, wie oben schon bemerkt, das Licht sich

ähnlich einer Wasserwelle verhält. Es kommt dann je nach Wegunterschied der Wellen an einem betrachteten Punkt am Auffänger zu einer Auslöschung oder Verstärkung. Dies ist abhängig davon, ob Wellenberg und Wellental bzw. Wellenberg und Wellenberg zusammentreffen. Die daraus resultierende Interferenz wird in Abb.1 erläutert. Als eigentlicher Begründer der Wellentheorie für das Licht ist der Holländer Christiaan Huygens anzusehen. In Analogie zu Wasserwellen und Schallwellen, die sich in einem Medium – Wasser bzw. Luft – fortpflanzen, dachte er sich als Träger der Lichtwellen einen alle Körper durchdringenden „Lichtäther“ und sprach das später nach ihm benannte Prinzip aus, wonach jeder von der Lichterregung getroffene Punkt des Äthers als Zentrum einer neuen kugelförmigen Lichtwelle aufgefaßt werden muß. Die Sekundärwellen wirken dann so zusammen, daß ihre Überlagerung eine neue resultierende Wellenfront ergibt.

Eine alternative Theorie hat der Engländer Isaak Newton aufgestellt, die vielfach auch als Emissionstheorie bezeichnet wurde. Wegen der geradlinigen Ausbreitung sah er das Licht als einen Strom unwägbarer, schnell dahinfliegender Teilchen. Er konnte auf dieser Basis die Zerlegung des weißen Sonnenlichtes in einzelne Spektralfarben erklären. Dies waren Experimente, die er um 1672 durchgeführt hatte. Es war jedoch äußerst schwierig, mit seiner Teilchenhypothese die sogenannten Newtonschen Ringe, die aufgrund von Interferenzen an dünnen Schichten entstehen, zu erklären. Diese hatte ironischer Weise Newton selbst 1675 beobachtet. Mit seinen Vorstellungen lag er in Konkurrenz mit den Versuchen seines Landsmannes Robert Hooke, der ein Anhänger der Huygensschen Wellenhypothese des Lichtes war. Dies war dann auch der Grund, daß das Buch „Opticks“ von Newton, das natürlich die Teilchentheorie favorisierte, erst nach dem Tode von Hooke im Jahre 1704 veröffentlicht wurde.

Newton war jedoch ein prominenter, hoch angesehener Physiker, der im Bereich der Mechanik der Massenpunkte Hervorragendes geleistet hatte. Mit der Gravitationstheorie hatte er die volle theoretische Fundierung der Beobachtungen

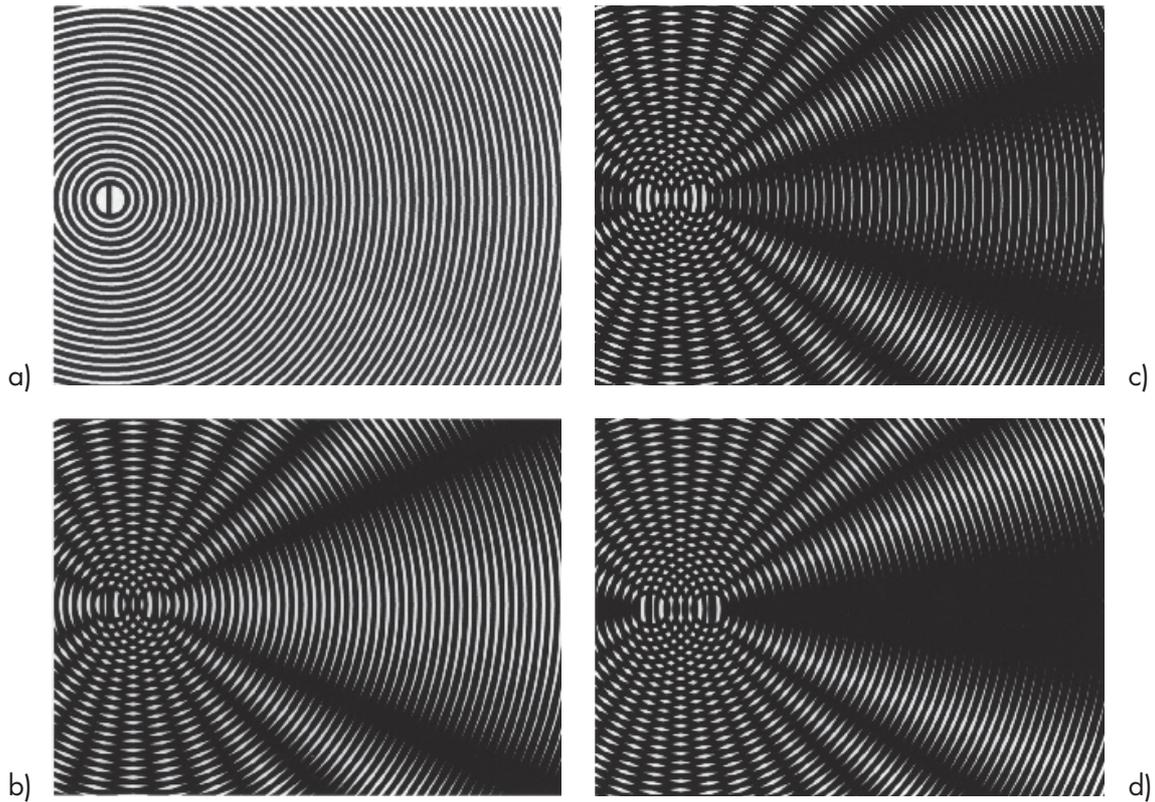


Abb. 1: (a) Veranschaulichung der Ausbreitung einer transversalen Welle. Die dunklen Ringe sollen die Wellenberge veranschaulichen. Das Bild muß als Momentaufnahme gesehen werden. Der Abstand zwischen den Mitten der dunklen Ringe (Wellenberge) entspricht der Wellenlänge der Welle; diese wollen wir mit dem griechischen Buchstaben  $\lambda$  bezeichnen. Das Bild entspricht der Aufnahme der Wellenfigur einer Wasserwelle, wenn ein Stein in einen ruhigen See geworfen wird. (b) Das Bild zeigt die Interferenz zweier identischer Wellen von (a), die von unterschiedlichen Zentren ausgehen. Bei den drei Bildern (b) bis (d) wird der Abstand zwischen den beiden Wellenzentren stetig größer (es handelt sich um eine Änderung von jeweils  $\lambda/2$ ). Am rechten Rand jedes Bildes kann man sehr deutlich die Änderung der Interferenzstruktur sehen. Fällt Wellenberg (dunkle Streifen) mit einem Wellental zusammen, so kommt es zu einer Auslöschung der Intensität (1 d). Die genaue Interferenzfigur auf der rechten Seite hängt von der Form der Quelle ab. Ist die Quelle in der Richtung senkrecht zur Bildfläche ausgedehnt, d. h., handelt es sich um einen Schlitz, so entstehen Streifen senkrecht zur Zeichenebene. Bei einer Punktquelle, die gleichmäßig nach allen Richtungen strahlt, entstehen Ringe.

von Galilei und Kepler erbracht. Trotz der Verzögerung der Veröffentlichung wurde deshalb auch seiner Teilchentheorie des Lichtes vollstes Vertrauen entgegengebracht, was dazu geführt hat, daß die Wellentheorie für das Licht, die insbeson-

dere von Christiaan Huygens in sehr konsequenter Weise entwickelt wurde, nur langsam akzeptiert wurde.

Es folgten jedoch viele durchschlagende Erfolge der Wellentheorie. Zu Beginn des 18. Jahrhunderts publizierte Thomas Young seine Ergebnisse zur Interferenz des Lichtes und zur Beugung (1802). Die Polarisation des Lichtes wurde durch Louis Malus entdeckt. Er beobachtete im Jahre 1808 eines Abends durch einen doppelbrechenden Kalkspat das Spiegelbild der Sonne in einem Fenster und fand, daß sich die beiden durch Doppelbrechung entstandenen Bilder bei Drehung des Kristalls um die Blickrichtung unterschiedlich veränderten; als Ursache hierfür erkannte er die Polarisation des Lichtes.

Detaillierte Erklärungen der Interferenzerscheinungen gelangen Fresnel und Fraunhofer, die unterschiedliche und für entgegengesetzte Grenzfälle gültige Betrachtungsweisen der Erscheinung angestellt hatten. Darüber hinaus haben beide die Optik noch in anderen Bereichen vorangebracht. Für Fraunhofer gilt dies mehr in technischer Hinsicht durch seine Entwicklung hervorragender Instrumente und die Beiträge zur Atomspektroskopie, die in der Beobachtung der nach ihm benannten Fraunhofer-Linien gipfelten. Diese sind kleinste Lücken im sonst kontinuierlichen Sonnenspektrum, die durch atomare Absorption genau dieses Lichtes in den äußeren Sonnenschichten zustande kommen. Trotz ihrer Feinheit blieben sie den Instrumenten Fraunhofers nicht verborgen. Fresnel erkannte, daß das Licht einer transversalen Schwingung entspricht, d. h., daß die Schwingungsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung steht. Diese Erkenntnisse hat er aus Interferenzexperimenten mit polarisiertem Licht gewonnen, die 1817 publiziert wurden. Bis dahin hatte man angenommen, daß das Licht eine longitudinale Welle ist, wie dies vom Schall her bekannt war.

Fresnel gelang es auch, das Verhältnis von unterschiedlich polarisiertem Licht bei der Brechung und Reflexion an Grenzflächen zu erklären. Er gab damit die vollständige Deutung der Experimente von Malus. Er hatte mit seinen Überlegungen die Wellentheorie auf so sichere Grundlagen gestellt, daß

es fast überflüssig erschien, als Leon Foucault und Louis Fizeau das entscheidende Experiment gegen die Teilchentheorie Newtons durchführten. Dieses ursprünglich von Dominique François Arago vorgeschlagene Experiment basiert auf der Tatsache, daß bei der Teilchentheorie Newtons die Brechung an einer Grenzfläche über die Anziehung der Lichtteilchen an der Übergangsfläche erklärt wird; dies führt zu einer Brechung zum optisch dichteren Medium hin mit der Konsequenz, daß die Lichtteilchen dann eine höhere Geschwindigkeit haben. Im Gegensatz dazu fordert die Wellentheorie nach dem Huygensschen Prinzip im optisch dichteren Medium eine kleinere Geschwindigkeit. Es gelang Foucault und Fizeau, die Lichtgeschwindigkeit in Luft und Wasser direkt zu messen und zu zeigen, daß in der Tat die Geschwindigkeit im Wasser kleiner ist – ein überzeugender Beweis zugunsten der Wellentheorie.

### 1.3 Die Wellengleichung – das letzte Wort?

Die Wellentheorie des Lichtes sollte noch von einer anderen Seite große Unterstützung erhalten. Im 19. Jahrhundert wurden detaillierte Experimente zum elektrischen Strom und den damit verbundenen Magnetfeldern durchgeführt. Michael Faraday an der Royal Institution in London untersuchte diese Phänomene ebenfalls und fand 1831, daß ein in einer Spule erzeugtes zeitlich variables Magnetfeld in einer zweiten Spule einen Strom hervorrufen konnte. Er fand damit das Induktionsgesetz. Ein elektrischer Strom erzeugte also ein Magnetfeld, aber ebenso konnte ein zeitlich variables Magnetfeld auch zu einem Strom führen. Zeitlich veränderlicher Magnetismus konnte also in elektrischen Strom umgewandelt werden. Eine wichtige Voraussetzung, um das Wechselspiel zwischen elektrischen und magnetischen Feldern zu vervollständigen, das bei der Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle eine Rolle spielt. Faraday hat sehr schlüssige Experimente durchgeführt, konnte jedoch seine Ergebnisse nicht in mathematische Formeln übertragen. Dies blieb dann James Clerk Maxwell vor-

behalten, der die vollständige mathematische Formulierung der Gesetze 1873 publizierte. Diese Maxwellschen Gleichungen ergaben die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle auf der Basis von Konstanten, die unabhängig aus anderen Experimenten bestimmt werden konnten. Die daraus errechnete Geschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle stimmte mit der Lichtgeschwindigkeit überein, woraus gefolgert werden konnte, daß Licht ebenfalls eine elektromagnetische Welle ist.

---

Mehr Informationen zu diesem und vielen weiteren Büchern aus dem Verlag C.H.Beck finden Sie unter: [www.chbeck.de](http://www.chbeck.de)