



Dies ist eine Leseprobe von Klett-Cotta. Dieses Buch und unser gesamtes Programm finden Sie unter www.klett-cotta.de

Serge Haroche

LICHT

Eine Geschichte

Aus dem Französischen
übersetzt von Ursula Held

KLETT-COTTA

Klett-Cotta

www.klett-cotta.de

Die Originalausgabe erschien unter dem Titel »La Lumière révélée.

De la lunette de Galilée à l'étrangeté quantique.«

© Odile Jacob, Septembre 2020, Paris

Für die deutsche Ausgabe

© 2022 by J. G. Cotta'sche Buchhandlung Nachfolger GmbH, gegr. 1659, Stuttgart

Alle deutschsprachigen Rechte vorbehalten

Cover: Rothfos & Gabler, Hamburg

unter Verwendung einer Abbildung von © shutterstock, azazello photo studio,

Borisovna.art

Gesetzt von Dörlemann Satz, Lemförde

Gedruckt und gebunden von Friedrich Pustet GmbH & Co. KG, Regensburg

ISBN 978-3-608-98495-8

E-Book ISBN 978-3-608-11850-6

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der

Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten

sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

INHALT

Vorwort	13
---------------	----

Kapitel I

DER BEGINN EINER BERUFUNG	19
---------------------------------	----

Frühe Begeisterung für Mathematik und Astronomie	21
Hinwendung zur modernen Physik	30
Shut up and calculate!	38
Wenn Atome und Photonen kreiseln: optisches Pumpen	40
Die Welt, ein »reich und seltnes Gut«	50
Lernen in Vertrauen und Freiheit	60
Die Versprechen des Lasers	62
Anfänge in der Forschung	66
Erste Amerikareise und wiedererwachte Weltraumbegeisterung	69
Die »Blue-Sky-Forschung«	72

Kapitel II

GEDANKEN AUS DEM KLEINEN PARK VOR DEM OBSERVATOIRE	75
---	----

Zwei Instrumente am Anfang einer wissenschaftlichen Revolution: Fernrohr und Pendeluhr	77
Das Universum mit Lichtgeschwindigkeit vermessen	82
Die Wissenschaft des Lichts wird quantitativ: Descartes und <i>La Dioptrique</i>	86

Die Natur nimmt immer den kürzesten und einfachsten Weg:	
das Fermatsche Prinzip	90
Huygens und die Wellentheorie des Lichts	94
Newton, die Lichtpartikel und die Farbe	102
Die Vermessung der Erde	108
Wissenschaftliche Detailversessenheit	118
Grundlagenforschung, Wirtschaft, Macht und Technologie	121

Kapitel III

BETRACHTUNGEN IM FARADAYSCHEN

LABOR	125
-----------------	-----

Young gegen Newton	128
Das Licht polarisiert sich	133
Fresnel und der Triumph der Wellen	134
Vektoren addieren sich, Wellen interferieren	137
Kreisende Schwingung: die zirkulare Polarisation	141
Von der Mathematik beleuchtetes Licht	145
Zurück zur Lichtgeschwindigkeit	149
Von den Salons der Aufklärung zu Faradays Labor	157
Die Entstehung des Feldkonzepts	165
Das Zusammenfließen von Licht, Elektrizität und Magnetismus	168
Manche Rätsel werden gelöst, manche bleiben	173

Kapitel IV

LORD KELVINS WOLKEN	181
-------------------------------	-----

Michelson und das Rätsel des Äthers	185
Einstein betritt die Bühne: Gedankenexperimente	188
Relativistischer Perspektivenwechsel	197
Raum und Zeit vermischen sich	200
Masse und Energie werden eins: $E = mc^2$	205

Einsteins »glücklichste Idee« stammt von Galilei	213
Schwerkraft und Raumzeitkrümmung	219
Vorhersagen und Nachhersagen	225

Kapitel V

LICHT ERHELMT DIE SELTSAME QUANTENWELT	233
---	-----

Die Ultraviolett-Katastrophe	236
Das Licht zwischen Wellen und Teilchen	238
Die Quanten weiten sich auf die Materie aus	241
Vom Herdentrieb der Photonen und von ihnen nacheifernden Atomen	247
Der Vorhang lüftet sich: Materiewellen	250
Wellenfunktion, Quantenzustände und Überlagerungsprinzip	253
Die Teilchenfamilie wächst	256
Eine fundamentale Identität	260
Die Büchse der Pandora und die Quantenphysik	263
Vom Klassischen zum Quantischen: ein Dialog über die Jahrhunderte hinweg zwischen Fermat, Maupertuis und Feynman . .	265
Eine Reise durch die Dimensionen	269
Quantenverhalten: individuelle Objekte oder statistische Mengen?	272
Der Youngsche Doppelspalt neu interpretiert	274
Maß, Komplementarität und Unschärferelation	277
Auseinandersetzungen über Gedankenexperimente	283
Die Quantenverschränkung	290
Schrödingers Katze und die Grenze zwischen klassischer Welt und Quantenwelt	297

Kapitel VI

LASER, PHOTONEN UND

RIESENATOME 303

Ein mit Photonen »bekleidetes« Atom	304
Kalifornische Laserschulung	310
Sieg über den Dopplereffekt	317
Quantenschwebungen	322
Kalifornische Anekdoten	326
Die erste große internationale Konferenz	329
Die unbekannte Welt der Riesenatome	331
Die Entstehung der Hohlraum-Quantenelektrodynamik	339
Lehre und Forschung auf beiden Seiten des Atlantiks	343
Ein revolutionäres Verfahren: die Laserkühlung	348
Ionenfallen und Quantensprünge	355

Kapitel VII

SCHRÖDINGERS KATZE ZÄHMEN 363

Die Photonenfalle	366
Das kreisförmige Atom	369
Quanten-Pingpong	374
Quantenknoten	377
Wie kann man Photonen sehen, ohne sie zu zerstören?	379
Leben und Tod eines Photons	382
Zurück zum Youngschen Experiment mit beweglichem Spalt	388
Lichtquanten zählen, Quantensprünge sehen	391
Radiographie des Quantenfelds	401
Schrödingers Lichtkatzen	407
Am Übergang vom Klassischen zum Quantischen	417
Quantencomputer: Utopie oder zukünftige Realität?	424
Feynmans Traum: Die Quantensimulation	429
Spukhafte Fernwirkung und geheime Kommunikation	431
Quantenmetrologie und Lichtuhren	433

ANHANG

Nachwort – Wissenschaft und Wahrheit	443
Dank	449
Bibliographie	451
Personenregister	455

»Obgleich die Erfindung glaubwürdiger Hypothesen losgelöst von jedem Bezug zur experimentellen Beobachtung kaum einen Nutzen in der Beförderung des Naturwissens haben kann, muss doch der Entdeckung einfacher und einheitlicher Prinzipien, durch die eine Vielzahl scheinbar heterogener Phänomene auf schlüssige und allgemeingültige Gesetze reduziert wird, eine beachtliche Bedeutung für die Verbesserung des menschlichen Intellekts zugestanden werden.«¹

Thomas Young, *Bakerian Lecture*, 1801

- 1 »Although the invention of plausible hypotheses, independent of any connection with experimental observations, can be of very little use in the promotion of natural knowledge; yet the discovery of simple and uniform principles, by which a great number of apparently heterogeneous phenomena are reduced to coherent and universal laws, must ever be allowed to be of considerable importance towards the improvement of the human intellect.«

VORWORT

Das Licht erhellt und fasziniert die Menschheit seit Anbeginn der Zeit. Doch erst in den vergangenen vier Jahrhunderten sind wir seinen Geheimnissen allmählich auf die Spur gekommen. Wir haben es uns mit modernen Technologien zunutze gemacht, die unser Leben erst vor Kurzem revolutioniert haben. Nur ein gutes Jahrhundert ist seit der Entdeckung der Mikrowellen vergangen – inzwischen sind diese nahen Verwandten des sichtbaren Lichts aus Kommunikations- und Navigationsgeräten und der medizinischen Radiologie nicht mehr wegzudenken. Knapp sechzig Jahre ist es her, dass wir das sichtbare Licht gezähmt und den Laser erfunden haben. Die außergewöhnlichen Eigenschaften dieser Strahlen haben uns wichtige Entdeckungen ermöglicht und Geräte hervorgebracht, die noch zu meiner Jugendzeit unvorstellbar waren.

Ich habe das Glück gehabt, dieses Abenteuer der Forschung im Laufe des vergangenen halben Jahrhunderts selbst mitzuerleben. Indem ich hier ein dem Licht gewidmetes Forscherleben nacherzähle, versuche ich meinen Lesern zu vermitteln, welche Freude uns Wissenschaftler packt, wenn ein neu entdecktes Phänomen die Welt auf unerwartete und überraschende Weise beleuchtet. Nach langen Jahren des Forschens ist es mir und meinem Team gelungen, Mikrowellenphotonen für eine Zehntelsekunde in einer winzigen verspiegelten Kammer einzufangen. Indem wir die fragilen, flüchtigen Lichtteilchen mit durch Laserstrahlen angeregten Atomen in Wechselwirkung treten ließen, konnten wir in unseren Experimenten sowohl das Wellen- als auch das Teilchenverhalten des Lichts beobachten und so die seltsamen Eigenschaften der Quantenwelt veranschaulichen. Zur Freude über die Entdeckung trat der spannende Gedanke, ob diese Arbeiten nicht irgendwann zu neuen Anwendungen führen könnten – obgleich bisher schwer vorauszusagen ist, wie diese genau aussehen könnten. Jeder Forschende, der etwas Neues und Vielversprechendes entdecken konnte, wird diese Zufriedenheit und Euphorie kennen.

In einer Zeit, in welcher der Bedarf an Forschung größer ist denn je, ist es wichtig, einer nicht über Expertenwissen verfügenden Öffentlichkeit durch persönliches Zeugnis nahezubringen, welche Motive Wissenschaftler antreiben, welche Phänomene ihre Neugierde wecken und welche Rolle das Glück bei ihrem niemals zufallsfreien Vorgehen spielt. Genauso wichtig ist der Hinweis, dass die Forschung in erster Linie Wissen schafft, das ein über Jahrhunderte angewachsenes kulturelles Erbe bereichert. Wissenschaftler sehen die Welt aus einem etwas erhöhten Blickwinkel, denn nach dem Isaac Newton zugeschriebenen Ausspruch sitzen sie ja auf den Schultern von Riesen, nämlich ihren Vorgängern und Wegbereitern. Aus dieser privilegierten Position heraus fungieren sie als Wissensvermittler von einer Generation zur anderen und tragen die für unsere Zivilisation so bedeutende rationale wissenschaftliche Methodik weiter.

Indem ich über Forschung schreibe – über jene, mit der ich selbst mich beschäftigt habe, aber auch über die Arbeiten anderer, die mich bereichert und mir tiefere Einblicke in die Welt gewährt haben –, möchte ich meine Begeisterung mit jungen Menschen, Schülern, Studenten und Wissenschaftsneulingen teilen und sie anstacheln, das immer neue Abenteuer weiterzuführen. Ich hoffe genauso auf das Interesse der breiten Öffentlichkeit und richte mich an alle, die neugierig sind auf eine Geschichte, die unsere Sichtweise auf die Welt tiefgreifend beeinflusst und uns bedeutende Handlungs- und Kontrollmittel über sie gegeben hat. Nicht zuletzt möchte ich Leser ansprechen, welche die Grundzüge dieser Geschichte bereits kennen, indem ich ihnen meinen persönlichen Blick auf die Dinge vorstelle. In diesem Buch möchte ich darlegen, was wir inzwischen über das Licht wissen und wie wir dieses Wissen in Erfahrung gebracht haben. Dabei spreche ich aber auch über das, was uns noch unbekannt ist und für zukünftige Generationen zu entdecken bleibt.

Es erschien mir unmöglich, von meinen Forschungen zu berichten, ohne sie in eine mehrere Jahrhunderte umfassende Erkenntnisgeschichte einzubetten. Diese Geschichte geht über die Optik hinaus, sie berührt sämtliche Wissensgebiete. Wer entdecken wollte, was Licht ist, beschäftigte sich natürlich mit Physik, aber es kamen weitere Felder hinzu: Astronomie, Chemie, Biologie und sogar die Biowissenschaften sind von diesen Forschungen stark beeinflusst worden. So haben auch bei der Erkundung unseres Planeten und der Bestimmung seiner Größe und Form Erkenntnisse über das Licht eine

entscheidende Rolle gespielt. Wer sich das Licht zum Thema nimmt, bezieht also alle Wissensgebiete mit ein.

Eine wesentliche Rolle in dieser Geschichte spielen immer präzisere Messmethoden. Die Beobachtung der Natur ist erst wirklich wissenschaftlich geworden, nachdem man Instrumente ersonnen hatte, mit denen sich die untersuchten Phänomene quantifizieren und anhand von Maßzahlen beschreiben ließen, die objektiv und reproduzierbar zuerst Entfernungen und Zeitintervalle und später auch weniger greifbare Größen wie Kräfte, Ladungen und Felder wiedergeben. Der gemeinsame Fortschritt von Mathematik, Geometrie und Algebra hat diese Zahlen in theoretischen Modellen in Beziehung zueinander gesetzt und konnte so scheinbar verschiedene Phänomene unter einen Erklärungsrahmen fassen. In diesem Kontext wird deutlich, wie sich wissenschaftliche Erkenntnisse schrittweise entwickelt haben, und zwar im steten Zusammenspiel von immer fortschrittlicheren Instrumenten und Rechenmethoden. Die Handwerker, welche die ersten optischen Linsen geschliffen und in Fernrohre eingebaut haben, oder auch die Uhrmacher, die erste präzise Pendeluhrn konstruierten, sind genauso wichtige Akteure dieser Geschichte wie die Mathematiker, die komplexe Zahlen, Ableitungen und die Integralrechnung entdeckt haben.

Einem Laienpublikum wissenschaftliche Themen zu präsentieren, ist eine schwierige Kunst. Man ist versucht, Bilder und Metaphern zu verwenden, die dann leicht in die Irre führen. Die Erläuterung der Quantenphysik, die ja essentiell für das Verständnis vom Wesen des Lichts ist, läuft so Gefahr, in den Mystizismus abzurutschen. Zugegeben, diese Physik ist verwirrend, denn wir erfahren sie nicht auf direktem Weg über unsere Sinne und unsere intuitive Auffassung der makroskopischen Welt, und doch hat sie tatsächlich gar nichts Mysteriöses. Sie hat sich der Forschung logisch erschlossen und ist in eine strenge mathematische Theorie gemündet, mit der wir beobachtete Phänomene präzise berechnen können, ohne dass Raum für esoterische Verschwommenheit bleibt.

Galileo Galilei ist sicher einer der ersten Wissenschaftler, der es unternommen hat, seine Entdeckungen einer breiten Öffentlichkeit verständlich darzulegen. In seinem *Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme* hat er seinen verdutzten und entsetzten Zeitgenossen sein Relativitätsprinzip der Bewegung erläutert. Den festen Glauben an eine im Zentrum der Welt ruhende Erde aufzugeben, war für die Menschen der Renaissance eine schwierige Her-

ausforderung – ähnlich schwierig, wie es für den modernen Menschen ist, mit der Beschreibung einer nichtdeterministischen Welt der Atome und Photonen über die klassische Vorstellung der Newtonschen Bahnen hinauszugehen. Für Galilei war die Gefahr ungleich größer, denn wer sich den Dogmen der Kirche widersetzte, machte sich nach den Regeln der Inquisition der Häresie schuldig. Wenn heutige Wissenschaftler die kontraintuitiven Konzepte einer Physik zu erläutern versuchen, deren Anwendungen unser Alltagsleben revolutioniert haben, droht ihnen zum Glück kein vergleichbares Schicksal wie dem mutigen Forscher des 17. Jahrhunderts.

Dennoch bin ich mir der weniger dramatischen, aber sehr realen Gefahren bewusst, die ein Wissenschaftler eingeht, wenn er sich an Leser außerhalb des Fachpublikums wendet. Man riskiert entweder einen zu technischen oder aber einen zu vereinfachenden Blick. Ich habe mich bemüht, dieses Problem zu umgehen, indem ich die Konzepte zum Licht, zur Relativität und zur Quantenphysik schrittweise darstelle und Gleichungen und Formeln vermeide. Ich verfolge die Entwicklung der Ideen und Theorien über die Jahrhunderte und beleuchte parallel dazu die Fragen, die sie bei den Gelehrten der Zeit ausgelöst haben, und hoffe so, dass diese Konzepte im Laufe der Lektüre immer bekannter und verständlicher werden.

Der historische Rückblick bis zu den Anfängen der modernen Wissenschaft gibt mir Gelegenheit, von meinen Forscheridolen von Galilei bis Einstein zu erzählen und die Arbeiten bedeutender Wissenschaftler vorzustellen, welche die meisten Leser zumindest vom Namen her kennen werden, wobei aber auch unbekanntere Persönlichkeiten, die zu diesem großen Abenteuer beigetragen haben, zu ihrem Recht kommen. Dieses Buch ist keine objektive Darstellung eines Wissenschaftshistorikers. Möglicherweise habe ich mich bei einzelnen Details dieser so reichen und wechselvollen Wissensgeschichte geirrt. Die folgenden Seiten sind daher eher als mein persönlicher Blick auf die Lichtforschung im Laufe der Jahrhunderte zu sehen: Ich stelle sie so dar, wie ich sie mir selbst vor Augen geführt habe und wie sie mich bei meinen eigenen Forschungen angeleitet und inspiriert hat.

Dieses Buch verbindet die Geschichte des Lichts mit meinen persönlichen Erfahrungen in der Forschung. Es ist in zwei etwa gleich große Partien unterteilt: Drei Kapitel – das erste und die beiden letzten – behandeln die vergangenen fünfzig Jahre. Sie beschreiben meine eigenen Forschungen und die Arbeiten meiner Zeitgenossen, an deren Entdeckungen ich teilhaben konnte.

Leser, die über gewisse Grundkenntnisse in der Physik verfügen und sich für aktuelle Entwicklungen in der Licht- und Laserforschung interessieren, können mit diesen Kapiteln beginnen. Der Hauptteil dieses Buches von Kapitel II bis V bildet ein Hintergrundgemälde, das die Wissenschaft des Lichts vom 17. bis zum 20. Jahrhundert darstellt. Ich zeige darin, wie sich mit deren Evolution auch unsere Vorstellung von der Welt entscheidend gewandelt hat. wurde. Diese Kapitel verdeutlichen zudem die engen Verknüpfungen, die sich seit dem Beginn der modernen Wissenschaft zwischen der von reiner Neugier angetriebenen Grundlagenforschung und menschlichen Aktivitäten wie der Erkundung unseres Planeten oder der Entwicklung von Handel und Industrie ergeben haben. Ich hoffe, Nichtwissenschaftler ebenso wie Wissenschaftler für diese Zusammenhänge zu interessieren – Letztere werden so vielleicht an selten beachtete oder vergessene Details einer spannenden, überraschungsreichen Geschichte erinnert.

Dieses Buch enthält zahlreiche Abbildungen, auf die ich im Text aber nicht explizit eingehe, damit der Lesefluss nicht gestört wird. Die Grafiken und ihre Legenden sind Zugaben, die für sich betrachtet werden können. Soweit möglich, sind auch die einzelnen Kapitel in sich abgeschlossen und können unabhängig voneinander gelesen werden, da sie sich auf bestimmte Phasen in der Geschichte des Lichts oder meinen persönlichen Werdegang beziehen. Dennoch gibt es Bezüge zwischen den Kapiteln, welche die in verschiedenen Kontexten behandelten Ideen und Konzepte miteinander verbinden. Für den historischen Teil habe ich mich von einer reichhaltigen Literatur inspirieren lassen, deren wichtigste Werke sich in den Literaturangaben wiederfinden. Auch eine Publikationsliste meiner Forschungsgruppe ist beigelegt. Ein alphabetischer Index listet die wissenschaftlichen Akteure dieser Geschichte auf, samt Seitenzahl, die auf ihre Nennung im Text verweist. Die Biographien dieser Forscher sind allesamt unter anderem auch in der Wikipedia zugänglich, und es könnte eine nützliche Ergänzung zur Lektüre dieses Buches darstellen, sich mit ihnen bekannt zu machen.

Kapitel II

GEDANKEN AUS DEM KLEINEN PARK VOR DEM OBSERVATOIRE

Seit mehr als vierzig Jahren überquere ich auf meinem täglichen Weg ins Labor die kleine Grünanlage der Pariser Sternwarte. Eine grasbewachsene, von Kastanien gesäumte Allee verbindet das unter Ludwig XIV. erbaute Observatoire mit dem Jardin du Luxembourg und folgt dabei der Linie des Pariser Meridians. Damit ist der Meridianbogen zwischen Dünkirchen und Barcelona gemeint, den die Astronomen Delambre und Méchain während der Französischen Revolution zur Festlegung des Meters vermaßen. Wenn ich den Platz überquere, dann kreuze ich diese imaginäre Linie von West nach Ost. Der Pariser Meridian war bis 1880 Bezugspunkt für sämtliche Längengrade auf französischen Weltkarten, bis dann der etwa 2° weiter westlich verlaufende Greenwich-Meridian als Nullmeridian festgelegt wurde.

Im Süden, zu meiner Rechten, sehe ich am Ende der Allee die weiße Kuppel der Sternwarte. 1676 konnte hier der dänische Astronom Ole Rømer die Trabanten des Jupiter beobachten, anhand derer sich erstmals die Geschwindigkeit von Licht messen ließ. Links von mir erblicke ich das im Auftrag von Maria de' Medici errichtete Palais du Luxembourg. Beim Betrachten der von den Fensterscheiben eben dieses Schlosses reflektierten Sonnenstrahlen entdeckte der Ingenieur Étienne Louis Malus 1808 die Grundlagen der Lichtpolarisation. Diese spielt – wie wir gesehen haben – eine wichtige Rolle beim Verfahren des optischen Pumpens, mit dem in ich meinen ersten Jahren als Forscher experimentierte.

Ich habe also oft Gelegenheit, über die lange Geschichte der Lichtforschung nachzusinnen. An ihr sind natürlich hauptsächlich Physiker, aber auch Mathematiker, Astronomen, Ingenieure und sogar Seefahrer beteiligt. In ihnen

finde ich alles wieder, was mich in meiner Jugend begeistert hat. Mir gefällt diese Geschichte, denn sie zeigt, wie sich die verschiedenen Wissensbereiche im Laufe der Jahrhunderte gemeinsam entwickelt und die reiche und seltene Schönheit der Welt in immer mehr Details offenbart haben. Um den Geheimnisse des Lichts auf die Spur zu kommen, musste man den Himmel und die Erde mit immer größerer Genauigkeit beobachten. Dazu bedurfte es der Erfindung neuer Messinstrumente und der Entwicklung überzeugender Rechenmethoden.

In diesem Wissensabenteuer hat das Streben nach Präzision eine entscheidende Rolle gespielt. Durch die immer sorgfältigere Messung von Zeiten und Entfernungen konnten die Gesetze der Newtonschen Mechanik, die Gestalt der Erde und die Ausmaße des Sonnensystems bestimmt werden. Und indem die Präzision ins immer noch Genauere weitergetrieben wurde, kam es schließlich zu einer radikalen Revision des klassischen Weltbilds durch die Gesetze der Relativität und der Quantenphysik. Es ist die mit Galilei beginnende und zu Einstein und der modernen Physik führende Wissensgeschichte, die ich in diesem und den drei folgenden Kapiteln erzählen möchte. Dabei sollen die Fragestellungen zum Licht der rote Faden sein, doch werden wir auf unserem Weg einige Abstecher machen, da diese Geschichte manche Überraschung und unerwartete Entdeckung birgt.

Die Menschheit ist seit Anbeginn der Zeit gebannt vom Licht. Im Gegensatz zur Finsternis, die für Schrecken und Tod steht, ist das Licht ein Zeichen für Leben und Neuanfang. In allen ›primitiven‹ Religionen war die Licht und Wärme spendende Sonne ein Objekt der Anbetung. Zur Feier des Jahreskreises gehörten verschiedene Formen des Sonnenkults. Licht war aber immer auch ein Symbol der Erkenntnis – denn alle wichtigen Informationen, die wir über die Welt erhalten, ermöglicht uns das Licht: Das vom Himmel kommende Licht lehrt uns etwas über das Universum, und durch das Licht der Dinge und Lebewesen in unserem Umfeld können wir uns orientieren und werden vor drohenden Gefahren gewarnt.

Die Verehrung, welche das Altertum dem Licht entgegenbrachte, hatte nichts mit Vernunft zu tun; es ging nicht darum, grundlegende Fragen zum Wesen und zu den Eigenschaften der Lichtstrahlung zu beantworten. Wenn sich die Menschheit Fragen stellte, dann gab sie poetische, mythische oder religiöse Antworten in Form von Offenbarungen, die aber die Geheimnisse des Lichts nicht erhellen konnten. Erfüllt das Licht den Raum unmittelbar oder

verbreitet es sich mit einer endlichen Geschwindigkeit? Ist es wie Materie gerätet oder hat es eine andere Beschaffenheit? Warum sind manche Medien durchsichtig und andere nicht? Auf all diese Fragen gab es keine Antworten.

Gesetze der Optik, welche die Ausbreitung von Lichtstrahlen beschreiben, wurden schon in der Antike und in der mittelalterlichen arabischen Welt entwickelt, doch erst mit dem Aufkommen der wissenschaftlichen Methodik im 17. Jahrhundert konnten die Geheimnisse des Lichts allmählich aufgespürt werden. Genaues Beobachten, Experimentieren und Messen sowie die Entwicklung mathematischer Theorien traten an die Stelle mythischer Erzählungen. Grundlagenwissen und Fortschritte in der Instrumentierung wuchsen Hand in Hand – ein früher Beweis für die fruchtbare Symbiose zwischen Technologie und einer von reiner Neugier angetriebenen Forschung, der *blue sky research*.

Zwei Instrumente am Anfang einer wissenschaftlichen Revolution: Fernrohr und Pendeluhr

Beginnen wir mit der Frage nach der Lichtgeschwindigkeit. Entgegen der altertümlichen Auffassung, Lichtstrahlen würden einen Raum unmittelbar und verzögerungsfrei füllen, kam Galilei als erster Wissenschaftler der Neuzeit zu der Einsicht, dass das Licht sich ebenso wie der Schall mit endlicher Geschwindigkeit verbreiten müsse. Es heißt, Galilei habe sogar versucht, diese Geschwindigkeit zu messen, indem er und sein Gehilfe auf je einen toskanischen Hügel stiegen und sich über eine Distanz von mehreren Kilometern Laternensignale schickten. Dazu deckte Galilei seine zunächst verdunkelte Laterne zu einem verabredeten Moment ab und bat seinen Assistenten, das Gleiche zu tun, sobald ihr Lichtstrahl bei ihm angekommen wäre. Bei bekannter Entfernung zwischen den beiden Hügeln hoffte Galilei, über die Verzögerung des Antwortsignals die Geschwindigkeit der Lichtstrahlen berechnen zu können.

Das Ergebnis des Versuchs war enttäuschend. Es gab tatsächlich eine kaum nachweisbare Verzögerung von einem Sekundenbruchteil zwischen der Aussendung und dem Empfang des Lichtsignals. Diese war jedoch unabhängig von der Entfernung zwischen den beiden Männern und entsprach ganz ein-

fach der Reaktionszeit ihrer Gehirne. Man weiß inzwischen, dass das Intervall, das sie hätten beobachten wollen, nur Millionstelsekunden beträgt – also viel zu kurz ist, als dass unsere Sinne es wahrnehmen könnten. Kein Instrument der damaligen Zeit war in der Lage, eine so minimale Spanne zu messen. Es sollte noch zweieinhalb Jahrhunderte dauern, bis das von Galilei ersonnene Experiment dank technologischen Fortschritts zu einem positiven, präzisen Ergebnis führte. Immerhin war zu Beginn des 17. Jahrhunderts klar, dass Licht sehr schnell unterwegs ist und dass es unerlässlich war, zu lernen, sehr kurze Zeitspannen und sehr große Distanzen zu messen, wenn man eine Vorstellung von seiner wahren Geschwindigkeit bekommen wollte.

Schon Galilei widmete sich diesen beiden Herausforderungen, dachte dabei aber nicht primär an die Lichtgeschwindigkeit, die ihn seit dem gescheiterten Experiment nicht mehr zu beschäftigen schien. Indem er Pendelbewegungen analysierte und erstmals ein Vergrößerungsglas zur Himmelsbetrachtung einsetzte, konnte Galilei Entdeckungen machen, die ein halbes Jahrhundert später erste Schätzungen der Geschwindigkeit von Lichtstrahlen erlaubten.

Bis ins 17. Jahrhundert maß man die Zeit mit primitiven Mitteln. Turmuhrren zählten die Drehschwingungen eines langen Seils, an dem ein horizontaler Holzbalken (»Foliot«) befestigt war. Die Ungenauigkeit dieser Uhren betrug bis zu einer Viertelstunde pro Tag. Kürzere Intervalle maß man anhand von Pulsschlägen oder Wasseruhren, den Klepsyden. Die Zeit, die eine Kugel brauchte, um eine Schräge hinunterzurollen, soll Galilei dadurch bestimmt haben, dass er die Wassermenge wog, die zwischen Anstoß und Landung der Kugel aus der Klepsydra geflossen war. Auch hier ließ die Genauigkeit zu wünschen übrig.

Neue Perspektiven eröffneten sich dann durch Galileis Versuche mit einem Punktpendel – einer an einem Faden befestigten kleinen Kugel, die im Schwerfeld der Erde hin und her schwingt. Galilei erkannte, dass die Schwingungsdauer unabhängig von der Masse des Pendelkörpers und auch von der Schwingungsweite ist. Letztere Eigenschaft, auch Isochronismus von Schwingssystemen genannt, gilt jedoch nur für kleine Ausschläge des Pendels. Die Schwingungsdauer hängt damit nur von der Länge der Pendelschnur ab. Bei einer Aufhängung von knapp einem Meter Länge dauert ein Pendelschwingung zwei Sekunden (Galilei maß natürlich nicht in Metern, sondern in damals üblichen Einheiten wie Elle oder Klafter). Es galt noch enorme Fortschritte zu bewältigen, um vom einfachen Fadenpendel, das ungefähr eine

Sekunde schlägt, zu einem Uhrwerk zu gelangen, das die Zeit autonom und präzise misst. Doch immerhin war die Idee geboren, Zeitintervalle nach einer regelmäßigen Schwingungsbewegung zu messen.

Christiaan Huygens war derjenige, der Galileis Pendel ein halbes Jahrhundert später in eine eigentliche Uhr und ein präzises Instrument zur Zeitmessung verwandelte. Er entwickelte die Formel, nach der die Schwingungsdauer eines Fadenpendels 2π mal die Quadratwurzel aus dem Quotienten von Fadenlänge l und Fallbeschleunigung g beträgt. Letztere entspricht etwa $9,8 \text{ m/s}^2$ und steht für die Geschwindigkeitsveränderung bei einem fallenden Körper im Gravitationsfeld der Erde. Huygens zeigte zudem, dass die Schwingungsdauer bei einem beliebig geformten, um eine horizontale Achse kreisenden Körper über dessen Drehimpuls bestimmt werden muss – eine Größe, die ich bereits im vorigen Kapitel erläutert habe. Waren Masse, Drehimpuls und die Entfernung vom Schwerpunkt bis zum Aufhängepunkt des Körpers bekannt, so ließ sich die Schwingungsdauer und damit die Länge eines im selben Rhythmus schwingenden Fadenpendels bestimmen.

Huygens war daran gelegen, Dauer und Weite von Schwingungen zu entkoppeln, da die Schwingungsweite für Ungenauigkeiten sorgte. Er bewies, dass die Schwingungen nur dann perfekt isochron, also unabhängig von der Amplitude der Schwingungen, waren, wenn der Schwerpunkt des Pendels keinem Kreisbogen, sondern einer Zykloide oder Rollkurve folgte; diese beschreibt die Bewegung eines Punkts auf dem Umfang eines gleichmäßig abgerollten Rades. Um ein Pendel in diese Bahn zu zwingen, bedurfte es eines genialen Räderwerks, mit dem die Pendellänge während des Schwingens verändert wurde.

Seinen scharfsinnigen Theorien und Berechnungen fügte Huygens ebenso beeindruckende Ingenieurarbeiten hinzu. So schuf er einen raffinierten Hemmungsmechanismus: Er koppelte die Hemmung an ein ins Schwerfeld absinkendes Gewicht und stellte dem Pendel so Energie zur Verfügung, mit der die Wirkung der Reibungskräfte ausgeglichen und das System in Dauerschwingung gehalten wurde. Die Hemmung trieb zudem die Zeiger an, die sich im Rhythmus des Pendels auf einem Zifferblatt fortbewegten und so Sekunden, Minuten und Stunden anzeigten. Es musste also niemand mehr die Schwingungen zählen, das übernahm das Uhrwerk. Es brauchte großen Erfindergeist, um einen Hemmungsmechanismus zu ersinnen, der die Zuverlässigkeit des auf die Sekunde einstellbaren Schwungwerks nicht beeinträchtigte.