

Martin Pohl

LICHT

Ideen zu seiner Natur und Nutzung
von der Antike bis zur
modernen Wissenschaft

SACHBUCH

 Springer

Licht

Martin Pohl

Licht

Ideen zu seiner Natur und Nutzung von
der Antike bis zur modernen
Wissenschaft

 Springer

Martin Pohl
Hamburg, Deutschland

ISBN 978-3-662-70485-1 ISBN 978-3-662-70486-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-70486-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2025

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jede Person benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des/der jeweiligen Zeicheninhaber*in sind zu beachten.

Der Verlag, die Autor*innen und die Herausgeber*innen gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autor*innen oder die Herausgeber*innen übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Caroline Strunz

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

...was, durch die Berührung feuchter und ungleichartiger Theile erweckt, in allen Organen der Thiere und Pflanzen umtreibt; was die weite Himmelsdecke donnernd entflammt, was Eisen an Eisen bindet und den stillen wiederkehrenden Gang der Nadel lenkt; alles, wie die Farbe des getheilten Lichtstrahls, fließt aus Einer Quelle; alles schmilzt in eine ewige, all-verbreitete Kraft zusammen.

Alexander von Humboldt, Ansichten der Natur, Stuttgart 1849

Wenn du aufwärts gehst und dich hochaufatmend umsiehst, was du doch für ein Kerl bist, der solche Höhen erklimmen kann, du, ganz allein: dann entdeckst du immer Spuren im Schnee. Es ist schon einer vor dir dagewesen.

Kurt Tucholsky, Es gibt keinen Neuschnee, Weltbühne, 1931

Du must nicht glauben, dass du uns etwas beibringen kannst.
§10 Jante-Gesetz, aus Aksel Sandemose, Ein Flüchtling kreuzt seine
Spur [575], 1933

Vorwort

Das Thema Licht beschäftigt mich seit meinem Physikstudium und dem ersten Kontakt mit der Maxwellschen Theorie, der Quanten- und der Quantenfeldtheorie. Als Teilchenphysiker habe ich mit Licht gearbeitet, von den Photonkonversionen in Elektron-Positron-Paare und den Schauern auf Blasenkammerbildern am CERN, über virtuelle Photonen bei den Speicherringen PETRA (DESY, Hamburg) und LEP (CERN, Genf) bis zu kosmischen Photonen mit dem AMS-Experiment auf der Internationalen Raumstation ISS und dem POLAR-Experiment auf der chinesischen Raumstation Tiangong. Der Plan eines Buches über Licht hat mich seit Jahren begleitet und verschiedene Phasen durchlaufen. Ursprünglich hatte ich einen kurzen, populärwissenschaftlichen Inhalt geplant, der mit Vorurteilen und urbanen Legenden über elektromagnetische Strahlung aufräumen sollte, wie z. B. der Katze in der Mikrowelle und den Schäden durch Strahlung des Mobiltelefons.

Was Sie jetzt in Händen halten ist ein völlig anderes Buch. Es führt Sie durch mehr als zwei Jahrtausende von Ideen über Licht, von der griechischen Antike bis heute. Das Buch richtet sich an naturwissenschaftlich interessierte Laien und setzt eine gewisse Affinität zu wissenschaftlicher Herangehensweise voraus. Es kommt zwar nur ein absolutes Minimum an mathematischen Formeln vor, die meisten schamhaft in Fussnoten und Abbildungen versteckt. Die Auseinandersetzung mit dem Thema Licht verlangt aber die Bereitschaft, sich auf nicht immer einfache Argumente und Gegenargumente einzulassen, die manchmal gewundenen Pfade wissenschaftlicher Methodik und Erkenntnis mit mir zusammen zu verfolgen.

Dabei werden wir vielen faszinierenden Persönlichkeiten begegnen und ihr sehr verschiedenes Umfeld wenigstens ansatzweise kennenlernen. Das Umfeld ist mir sehr wichtig, auch wenn mein Text darüber zuweilen recht feuilletonistisch daherkommt. Die gesellschaftlichen, politischen, ökonomischen Bedingungen, unter denen Licht studiert worden ist, haben nach meiner Überzeugung auch das naturphilosophische Denken zu allen Zeiten geprägt. Das Leben mischt sich eben immer in die Wissenschaft ein.

Viele Freunde und Kollegen haben mir zu verschiedenen Zeiten als Informationsquellen und Sparringspartner gedient. Das Deutsche Museum in München, die *Royal Society* und die *Royal Institution* in London waren hilfreich, ebenso wie die *École polytechnique* in Palaiseau bei Paris. Dank gebührt ausserdem der Staats- und Universitätsbibliothek Hamburg, die mich bei meinen Recherchen unterstützt hat. Und meinem ehemaligen Kollegen am CERN, Sir Tim Berners-Lee, der den Grundstein für das World Wide Web gelegt hat. Er hat zwar nicht wissentlich zum Manuskript beigetragen, aber ohne die Ressourcen, die das Internet uns allen jederzeit am Schreibtisch zugänglich macht, ist ein Buch wie dieses schwer vorstellbar.

Dr. Rolf Nahnauer aus Berlin hat die Geduld aufgebracht, meinen Text zur Probe zu lesen. Seine fundierte Kritik und seine Ratschläge haben das Manuskript vielfältig verbessert und bereichert. Dafür kann ich ihm gar nicht genug danken. Natürlich verbleiben viele Fehlinterpretationen und Ungereimtheiten, sie liegen offensichtlich allein in meiner Verantwortung. Wenn Sie Kritik und Ideen für Verbesserungen mit mir teilen wollen, würde ich mich über eine Nachricht an martin.pohl@cern.ch freuen.

Hamburg 2024

Herbst

Inhaltsverzeichnis

1	Leitmotive	1
2	Schlaglichter	7
3	Augenlicht	17
4	Göttliches Licht	49
5	Ex oriente lux	59
6	Sternenlicht	85
7	Ratio	117
8	Lichtteilchen	135
9	Ätherwellen	175
10	Interferenz	197
11	Kraftlinien	235

X	Inhaltsverzeichnis	
12	Felder	271
13	Lichtgeschwindigkeit	295
14	Radiowellen	329
15	Lichtbilder	343
16	Wärme	371
17	Lichtquanten	387
18	Quantenfelder	429
19	Lichtwerkzeuge	455
20	Nachleuchten	489
	Literatur	491
	Namens- und Sachverzeichnis	525

1

Leitmotive

Sie interessieren sich für Licht? Da sind Sie in allerbesten Gesellschaft:

- Sie wollen wissen, wie der Sehvorgang zu verstehen ist, eher aktiv wie der Tastsinn oder eher passiv wie das Gehör? Darüber haben schon die antiken Naturphilosophen nachgedacht.
- Sie wollen wissen, wie Licht und Wärme zu uns gelangen? Da haben Descartes und Newton verschiedene Antworten anzubieten.
- Es lässt Ihnen keine Ruhe, ob Licht nun aus Wellen besteht oder aus Teilchen oder gar aus beidem? Die Forscher vergangener Jahrhunderte haben verschiedene Standpunkte vertreten und die Diskussion ist nicht etwa beendet.
- Der Zusammenhang mit elektrischen und magnetischen Phänomenen interessiert Sie? Dazu hat James Clerk Maxwell sehr viel zu sagen, und natürlich Max Planck, Albert Einstein und Richard Feynman.
- Ob abstrakte Konzepte wie Symmetrie bei alledem eine Rolle spielen? Und ob! Emmy Noether, Martinus Veltman und Gerard t'Hooft haben das herausgefunden.
- Lässt sich das alles auch auf andere Naturkräfte übertragen? Mindestens für den radioaktiven Zerfall und die Kernkraft ist das der Fall, ob es auch für die Schwerkraft gilt, wissen wir leider immer noch nicht.
- Sie haben über das rätselhafte Phänomen der quantenmechanischen Verschränkung gelesen und fragen sich, was das bedeuten mag? Da haben die Nobelpreisträger von 2012 und 2022, vor allem Serge Haroche und Alain Aspect, gute Antworten parat.

Gemessen und nachgedacht wird, und wie! Und Anwendungen von Licht erleben als Werkzeug eine neue Renaissance.

Darum also ein Buch über Licht, über elektromagnetische (und andere) Wellen (oder Teilchen), sichtbare und unsichtbare. Aber warum ausgerechnet dieses Buch, ein systematische Revue der Ideen über Licht? Und das auch noch von der Antike bis heute? Sie haben es wohl befürchtet: „Schon die alten Griechen ...“. Hier ein paar meiner Argumente:

Unsere wohl am weitesten entwickelten Sinnesorgane sind schließlich die Augen. Direkt mit dem Gehirn verbunden, speisen die hundert Millionen Lichtrezeptoren unserer Netzhaut geschätzte zehn Megabits pro Sekunde in unser Gehirn ein, so viel wie Ihr Internet zu Hause leistet (wenn Sie Glück haben). Das ist etwa fünfzigmal mehr, als unser Gehörsinn an Informationen überträgt, und dabei sind die Augen auch noch beweglich. Damit nicht genug. Das faszinierende neuronale Netz unseres Gehirns verarbeitet all diese Informationen in Echtzeit, reduziert sie auf das im Moment Wesentliche, vergleicht sie mit bekannten Mustern und lässt uns in Sekunden motorisch reagieren. So erlaubt uns das visuelle System seit frühester Kindheit, unsere Umwelt zu erfassen und zu interpretieren. Schon früh lernen wir, unsere Mutter von anderen Menschen zu unterscheiden, ein Lächeln zu erkennen. Man muss schon sehr nüchtern veranlagt sein, um von Lichtphänomenen wie dem Polarlicht, dem Regenbogen oder dem Blitz nicht fasziniert zu sein. Und nicht beeindruckt von Anwendungen wie der Röntgenaufnahme oder der Laserzange.

Die elektromagnetische Kraft ist eine der vier bekannten Naturkräfte, die anderen sind die schwache, die starke Kraft und die Schwerkraft. Etwas Besonderes ist aber, dass wir – ähnlich wie für die Gravitation – Organe für die Wahrnehmung elektromagnetischer Phänomene haben! Elektron und Photon sind die einzigen Elementarteilchen, die wir sehen und fühlen können. Elektromagnetische Wellen sind eben wichtige Akteure in unserer Umwelt: Wärme, Licht und Informationen werden damit übertragen. Licht ist auch die einzige Strahlung, die in der Öffentlichkeit gemeinhin wenigstens nicht durchgehend negativ besetzt ist.

Denkende Menschen haben sich also zu allen Zeiten mit Licht und dem Sehvorgang beschäftigt. Eben „schon die alten Griechen“, wahrscheinlich viele *vor* ihnen, von denen wir nichts wissen. Und sicher sehr viele *nach* ihnen, über die wir besser informiert sind. Die Vielfalt der Ideen und die Auseinandersetzungen um ihre Gültigkeit geben faszinierende Einblicke in die Denkweise verschiedener Epochen. Die Entwicklung der Wissenschaft, wie wir sie heute kennen, lässt sich anhand des Leitmotivs Licht gut nachzeichnen. Und genau das möchte ich in diesem Buch versuchen.

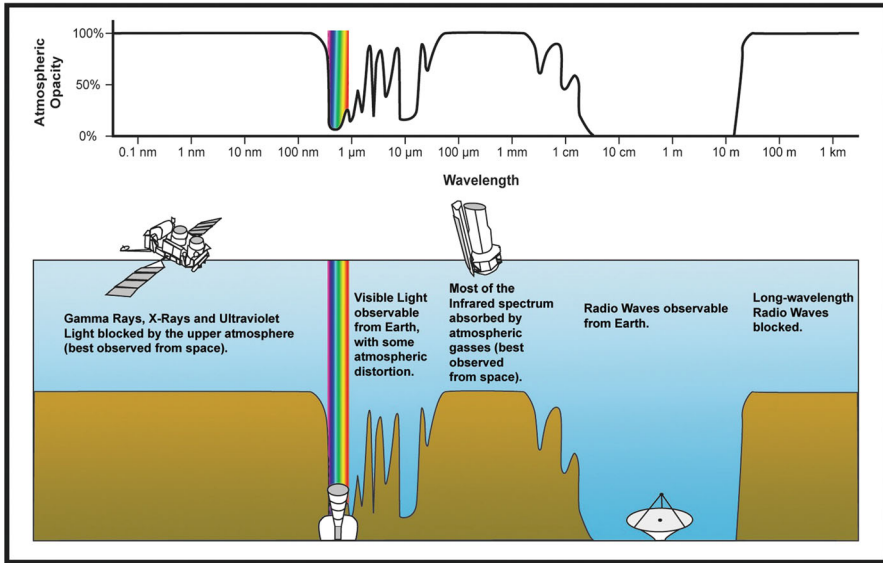


Abb. 1.1 Beschattung der Erdoberfläche durch die Atmosphäre als Funktion der Wellenlänge. (Bildnachweis: Wikimedia Commons)

Elektromagnetische Wellen sind Licht. Photonen sind die Quanten dieser Strahlung, die kleinsten Einheiten, aus denen sie sich zusammensetzt. Die Wellenlänge des Lichts, mit anderen Worten die Energie der Photonen, bestimmt ihre Wirkungsweise. Wir können nur einen kleinen Teil ihres Spektrums sehen und fühlen. Das hat seine Gründe in der Evolutionsbiologie. Wie die Grafik Abb. 1.1 zeigt, ist die Erdatmosphäre für weite Teile des elektromagnetischen Spektrums undurchsichtig. Zwei Fenster bleiben offen: das erste im Bereich des sichtbaren Lichts und der infraroten Wärmestrahlung. Das zweite im Bereich der Radiowellen, für die wir kein Organ haben, die wir aber z. B. für Telekommunikation und Radioteleskope nutzen. Dass uns die Atmosphäre vor Gamma- und Röntgenstrahlen schützt, ist ein Glücksfall, der uns zu überleben erlaubt. Und den Elon Musk und Jeff Bezos auf der Mars-Oberfläche schmerzlich vermissen werden.

Licht und verwandte Boten geben Auskunft über so faszinierende Phänomene wie die Babyjahre des Universums, Vergangenheit und Gegenwart entfernter Himmelskörper und die Beschaffenheit der mikroskopischen Welt. Sie sind also ein Werkzeug in z. B. Kosmologie, Astronomie, Teilchenphysik und Medizin. Und in neuerer Zeit auch Werkzeuge, die uns erlauben, Quantensysteme zu manipulieren.

Wir verstehen die elektromagnetische Kraft seit über hundert Jahren als Wechselwirkung zwischen elektrisch geladenen Teilchen, vermittelt durch Photonen, also Lichtteilchen. Diese Art von Mechanismus dient auch zum tieferen Verständnis anderer Naturkräfte, etwa der Kernkraft und der schwachen Kraft, die für die Radioaktivität verantwortlich ist. Gibt es am Ende vielleicht nur eine einzige universelle Naturkraft? Wir werden uns auch damit beschäftigen.

Ich habe für naturwissenschaftlich interessierte Laien geschrieben, mich bemüht, anschaulich und manchmal überspitzt zu formulieren, damit der Text sich möglichst unterhaltsam lesen lässt. Ich habe aber auch versucht, verfälschende Vereinfachungen von – zugegeben manchmal schwierigen – Erkenntnissen zu vermeiden. Ob dieser Spagat gelungen ist, müssen Sie selber entscheiden.

Sie müssen auch wissen, dass Sie es mit einem Experimentalphysiker zu tun haben. Also nicht etwa mit einem Wissenschaftshistoriker, sondern mit einem Praktiker, näher am Klempner als am Philosophen. Ein weiteres Leitmotiv dieses Buches wird also sein, wie sich Ideen und Werkzeuge gegenseitig bedingen und beeinflussen. Unter Werkzeugen verstehe ich nicht nur wissenschaftliche Instrumente, sondern eben auch Methodik und natürlich den mathematischen Werkzeugkasten.

Ich erlaube mir deshalb immer wieder Abschweifungen, z. B. in die Astronomie, die Licht seit jeher als Informationsträger verwendet. In die damit verbundene Geometrie und andere mathematische Disziplinen. In die Kinematik, die Lehre von der Bewegung, die Dynamik, die das Wirken der Kräfte beschreibt, und die damit verbundene Infinitesimalrechnung. Und immer wieder zu den Durchbrüchen in der Technologie, die mit den hier ausgebreiteten Ideen so eng verwoben sind. Damit sind wir bei einem weiteren Leitmotiv, der Entwicklung in der Naturbeobachtung von Augenschein und Alltagserfahrung hin zum wissenschaftlichen Experiment.

Eine wichtige und möglicherweise falsche Entscheidung zu Beginn war aber, dass das Buch ohne Formeln auskommen soll. Das ist total unverträglich mit der naturwissenschaftlichen Methode, die uns stets leitet, und die in drei Schritten vorgeht:

- die Natur zu beobachten,
- das Beobachtete vollständig und wahrheitsgetreu zu beschreiben und
- das Beschriebene in Naturgesetze zu verdichten, die im günstigsten Fall neue Phänomene vorhersagen.

Natürlich hält die wirkliche Entwicklung der Naturwissenschaften diese Reihenfolge nie ein, die drei Schritte sind eng miteinander verwoben. Die Schritte

sind aber vollständig undenkbar ohne die unverzichtbaren Werkzeuge der Mathematik. Ihre strikten Regeln verpflichten automatisch zur Disziplin; ihr Werkzeugkasten ermöglicht oft erst, Muster im Beobachteten zu erkennen und ihre universelle Sprache erlaubt besser als alle Worte, das Erkannte zu kommunizieren.

Versucht man also, ohne mathematische Formeln Naturwissenschaft zu erklären, so fühlt man sich als Naturwissenschaftler wie amputiert. Nicht nur, dass das wichtigste Kommunikationsmittel nicht zur Verfügung steht. Die Phantomschmerzen verhindern manchmal, dass man mit Worten herausbringt, was man sagen will. Das artet ab und zu in eine Art Wortmathematik aus. Deshalb mag Ihnen die eine oder andere Erklärung gewunden und weit hergeholt erscheinen. Seien Sie getröstet, mir geht es ebenso. Sollten Sie eine bessere, direktere Erklärung finden, wäre ich für eine E-Mail dankbar.

Vor einer weiteren Tendenz Ihres Autors müssen Sie gewarnt sein. Meine ganze wissenschaftliche Sozialisation fand in mehr oder minder großen internationalen Forschungsgruppen statt, die man Kollaborationen nennt (heute ohne den Beigeschmack aus dem Dritten Reich). Nach meiner Beobachtung machen Individuen in der Wissenschaft einen großen Unterschied. Sie können Paradigmenwechsel vollenden, die in der Luft lagen. Sie können Paradigmenwechsel einleiten, aus Opposition zum herrschenden Zeitgeist. Aber was in der Luft liegt – *l'air du temps* ist mein Lieblingsausdruck dafür –, spielt bei beidem eine große Rolle, auch was das Schicksal der Protagonisten angeht. Virginia Woolf schreibt 1929 in *Orlando*: „Der Geist der Zeit aber ist von so unzählbarer Gewalt, daß er jeden, der sich gegen ihn zu stemmen versucht, weit wirksamer zu Boden schlägt als die Fügsamen, die auf seinen Wegen wandeln“.¹ Sollten Sie sich bei meinen Bemerkungen dazu an die vermischten Meldungen aus dem Feuilleton erinnert fühlen, ist das keineswegs unbeabsichtigt. Wenn Sie einen Abriss der Kulturgeschichte wollen, sollten Sie sich wohl einen kundigeren Autor suchen. Aber es gibt Ereignisse jenseits der Wissenschaft, die die Epochen prägen. Und niemand, auch René Descartes nicht, sitzt in einem Zimmer mit Kachelofen und revolutioniert die Physik.

Aber damit genug geschwätzt: Es werde Licht!

¹Siehe <https://www.projekt-gutenberg.org/woolf/orlando/orlando.html>.

2

Schlaglichter

Wenn wir heute über Tradition sprechen, meinen wir nicht mehr, was das achtzehnte Jahrhundert gemeint hat, eine Arbeitsweise, die von einer auf die nächste Generation weitergereicht wird; wir meinen ein Bewusstsein, dass die gesamte Vergangenheit in der Gegenwart da ist. Originalität bedeutet nicht länger eine leichte persönliche Veränderung unmittelbarer Vorgänger [...]; sie bedeutet die Fähigkeit, in irgendeinem Werk aus irgendeiner Zeit oder Gegend Schlüssel zu finden für die Behandlung unserer eigenen Thematik.

Wystan Hugh Auden, *Criticism in a Mass Society*, 2002 [477]

In diesem Kapitel möchte ich vorwegnehmen, was wir *heute* über Licht wissen. Das ist, was man einen *Spoiler* nennt. Wäre dieses Buch ein Kriminalroman, würde ich Ihnen den ganzen Spaß verderben. Wenn Sie sich also die Spannung erhalten wollen – oder einfach keine Lust auf die nüchterne und abstrakte Sprache dieses Kapitels haben –, rate ich Ihnen, ein paar Seiten weiterzublättern bis zu den alten Griechen.

Wenn Sie das nicht tun, finden Sie im Folgenden moderne Antworten auf drei Fragen: Was ist Licht, wie entsteht es und wie wirkt es auf Materie? Und zwar absichtlich in nummerierten Paragraphen, wie in einem Gesetzestext. Damit will ich die apodiktische Bestimmtheit moderner Wissenschaft kenntlich machen. Die Statements sind alle durch Experimente sehr gut unterfüttert. Aber kein ernst zu nehmender Wissenschaftler würde sie für überall und ewig gültig erklären. Jedes neue Experiment birgt in sich die Möglichkeit, scheinbar in Stein gemeißelte Wahrheiten zu widerlegen oder wenigstens in

ihrer Gültigkeit zu begrenzen. Jeder neue theoretische Ansatz kann bekannte Phänomene in einem neuen Licht erscheinen lassen. Warum sollte man sonst fortfahren zu experimentieren und zu theoretisieren?

Sie sind herzlich eingeladen, mir zu widersprechen, wenn Sie mich bei Ungenauigkeiten oder Verkürzungen erwischen, die bei diesem Format schwer vermeidbar sind. Meine folgende Liste erhebt auch keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sie orientiert sich vielmehr an den Themen, die im Rest dieses Buches behandelt werden sollen. Keine Sorge, wenn Sie irgendetwas hier nicht verstehen sollten. Zur Klärung von Begriffen und Zusammenhängen dient eben gerade dieses Buch, entlang von historischen Leitplanken.

Was ist Licht?

§1 Licht ist eine elektromagnetische Welle, bestehend aus elektrischen und magnetischen Feldern, die sich in Raum und Zeit periodisch verändern. Ein Feld ist ein Zustand des Raumes, hier eine elektrische und eine magnetische Feldstärke. Beide sind durch Betrag und Richtung charakterisiert, stellen Sie sich zwei Pfeilchen an jedem Raum- und Zeitpunkt vor wie in der Skizze Abb. 2.1.

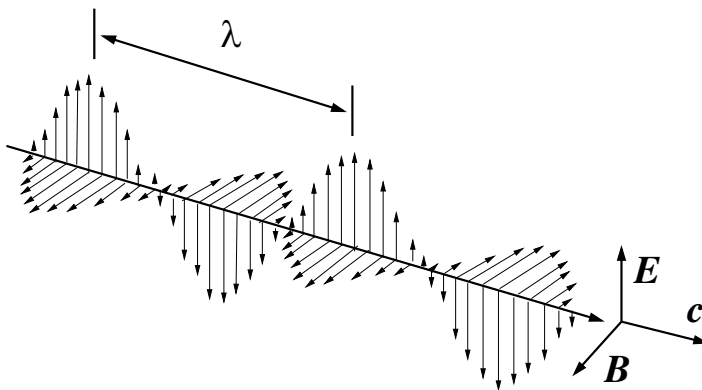


Abb. 2.1 Momentaufnahme einer elektromagnetischen Welle, bestehend aus Schwingungen von elektrischen Feldern E und magnetischen B . Deren Maximum, das man Amplitude nennt, ihre zeitliche Periode T und die räumliche Wellenlänge λ charakterisieren eine Welle. Sie pflanzt sich fort in Richtung der Geschwindigkeit c . Deren Betrag entspricht dem Produkt aus Wellenlänge und Frequenz ν , dem Inversen der Periode

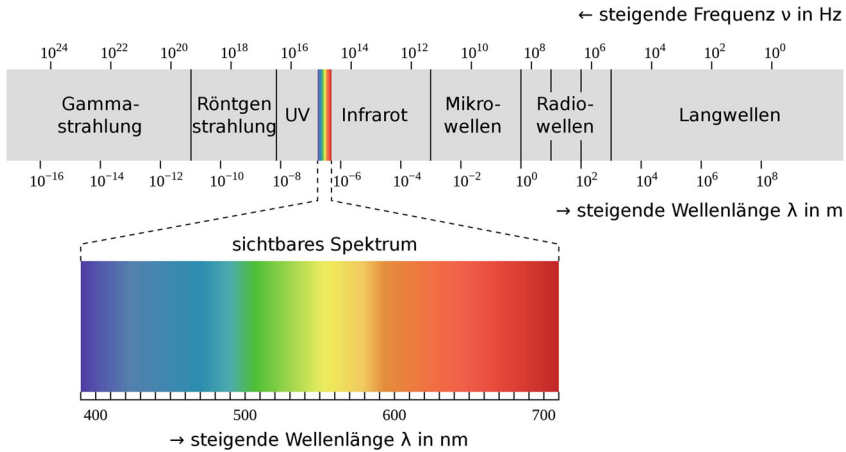


Abb. 2.2 Nomenklatur des Spektrums elektromagnetischer Wellen. Das Spektrum ist auf beiden Seiten unbegrenzt. (Bildnachweis: Wikimedia Commons)

§2 Die Welle wird charakterisiert durch ihre Amplitude, Wellenlänge, Frequenz und Ausbreitungsrichtung. Die Grafik Abb. 2.2 zeigt das Spektrum elektromagnetischer Wellen, von denen sichtbares Licht nur ein kleiner Teil ist. Das Spektrum ist auf beiden Seiten unbegrenzt.

§3 Bei einer Lichtwelle stehen elektrisches und magnetisches Feld senkrecht aufeinander. Die Ausbreitungsrichtung der Welle steht wiederum senkrecht auf beiden. Die Schwingungen beider Felder sind in Phase, d. h., Maxima und Minima werden zur gleichen Zeit am gleichen Ort erreicht. Elektrische und magnetische Amplitude stehen in einem festen Verhältnis, ihr Quotient ist die Lichtgeschwindigkeit. Wellenlänge und Frequenz sind ebenfalls nicht unabhängig, ihr Produkt ist wieder die Lichtgeschwindigkeit.

§4 Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist eine universelle Konstante $c = 299.792.458 \text{ m/s}$, unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle und des Beobachters. Sie definiert gleichzeitig die maximale Geschwindigkeit, die ein Objekt erreichen kann. In unserem modernen Einheitensystem ist sie eine feste Zahl und definiert – zusammen mit der jeweils genauesten Uhr – die Längeneinheit Meter. In Materie ist die Lichtgeschwindigkeit kleiner als im Vakuum.

§5 Seine geradlinige Ausbreitung und unveränderliche Geschwindigkeit weisen dem Licht eine tragende Rolle bei der Vermessung von Raum und Zeit zu. Uhren müssen über Lichtsignale synchronisiert werden, Lichtlineale dienen zur Messung von Längen und Bewegung. Eine absolute Zeit und einen absoluten Raum gibt es nicht, also auch keinen im Universum ruhenden Punkt. Man fasst diese Befunde unter dem Begriff der Relativität zusammen.

§6 Die Felder zweier elektromagnetischer Wellen addieren sich komponentenweise, also in Betrag und Richtung analog zum Parallelogramm der Kräfte. Haben die Wellen nicht die gleiche Ausbreitungsrichtung oder sind sie asynchron, kommt es zu Schwebungen, die man Interferenzen nennt. Das Auftreten von Interferenzen ist geradezu die definierende Eigenschaft von Wellenphänomenen.

§7 Licht wird einerseits beschrieben durch eine klassische Feldtheorie. Darin ist die elektromagnetische Welle kontinuierlich in Zeit und Raum. Andererseits sind elektromagnetische Wellen quantisiert, d. h., sie bestehen aus kleinsten Einheiten, die man Photonen nennt. Das spielt eine Rolle, wenn man Abstände von weniger als ungefähr einem Atomradius betrachtet. Jedes Photon hat eine bestimmte Energie, proportional zur Frequenz der Welle, mit der Planck'schen Konstante als Proportionalitätsfaktor. Die Masse der Photonen ist null, alle bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit. Sie sind punktförmig, haben keine Ausdehnung.

§8 Die makroskopische Lichtintensität ist definiert als die Energie, die das Licht pro Zeiteinheit durch eine gedachte Einheitsfläche transportiert. Sie ist proportional zum Quadrat der Amplitude von elektrischem oder magnetischem Feld und zur Lichtgeschwindigkeit. Mikroskopisch gesehen ist sie proportional zum Energiefluss der Photonen, d. h. zum Produkt ihrer Energiedichte¹ und der Lichtgeschwindigkeit.

§9 Eine Entscheidung zwischen Lichtwelle und Photon ist weder möglich noch sinnvoll. Licht ist beides. Die Gesamtheit der Photonen bildet die Lichtwelle, auch ein einzelnes Photon kann das schon. Welcher Aspekt bei der Darstellung von Lichteigenschaften überwiegt, hängt ausschließlich von der Fragestellung ab. In der klassischen Physik unterscheidet man Wellen von Teilchen durch das Auftreten von Interferenz. Aber Interferenz tritt eben auch

¹Die Energiedichte ist die Gesamtenergie der Photonen pro Volumen.

für Teilchen auf. Auf dem Quantenniveau reisen alle als Welle und kommen als Teilchen an.

§10 Im Zusammenhang mit den Quanteneigenschaften des Lichts ergibt sich eine Beziehung zwischen den kinetischen Eigenschaften (Energie und Impuls, beide durch Frequenz oder Wellenlänge bestimmt) und der Lokalisierung der Wellen. Man nennt das unglücklicherweise die Unschärferelation. Sie gilt für alle Quantenobjekte, hat aber mit der Unschärfe im umgangssprachlichen (optischen) Sinne nichts zu tun. Sie bedeutet vielmehr: Je stärker der Frequenzbereich einer Welle eingeschränkt ist, umso größer ist der räumliche und zeitliche Bereich, den sie einnimmt. Eine idealisierte Welle mit fester Frequenz wäre dann überall im Raum präsent und müsste für alle Zeiten existieren.

Wie entsteht Licht?

§11 Die länger bekannte Methode zur Lichterzeugung ist die schnelle, beschleunigte Bewegung von elektrischen Ladungen. Beispiele für die Energiequelle solcher Bewegungen sind etwa die Kernfusion im Inneren der Sonne oder chemische Redox-Reaktionen bei Feuer. Die einfachste Elementarquelle ist ein schwingender Dipol, bestehend aus einer positiven und einer negativen Ladung. Ein solcher Dipol strahlt eine elektromagnetische Welle senkrecht zu seiner Achse ab. Und zwar unabhängig davon, ob sich die Ladungen im Vakuum oder in Materie befinden, wie bei einer Antenne.

§12 Zu dieser Klasse von Lichtquellen gehören auch elektromagnetische Bugwellen. Sie werden durch geladene Teilchen erzeugt, die sich in Materie schneller bewegen als Licht.² Man nennt das so erzeugte Licht Cherenkov-Strahlung. Auch die Bremsstrahlung gehört dazu. Sie entsteht als elektromagnetische Stoßwelle, wenn geladene Teilchen abrupt gebremst oder abgelenkt werden. So erzeugt man z. B. Röntgenlicht oder Synchrotron-Strahlung.

§13 Die erst seit dem 19. Jahrhundert bekannte zweite Lichtquelle besteht aus zeitlich veränderlichen elektrischen und magnetischen Feldern. Ein variables elektrisches Feld löst ein magnetisches Feld aus und umgekehrt. Durch diesen

²Seien Sie nicht irritiert: Nichts kann sich schneller bewegen als Licht *im Vakuum*. Wohl aber können Teilchen *in Materie* schneller sein als die reduzierte Lichtgeschwindigkeit im gleichen Medium.

Mechanismus kann sich das elektromagnetische Feld von seinen Ladungsquellen lösen und in Zeit und Raum selbsttätig fortpflanzen.

§14 Der Übergang eines geladenen Teilchens von einem höheren Energiezustand in einen tieferen – etwa eines Elektrons in einem Atom – führt zur Aussendung eines Photons. Dessen Energie entspricht dem Unterschied zwischen Ausgangs- und Endenergie des Übergangs. Der Übergang erfolgt im Allgemeinen spontan. Er kann aber auch durch ein elektromagnetisches Feld angeregt werden.

§15 Kollektive Anregungen einer großen Anzahl von Elektronen können zur Aussendung von Licht führen, das man Laserlicht nennt.³ Das Licht ist dabei kohärent, alle Photonen schwingen in Phase. Die Elektronen können in Atomen gebunden sein – wie bei einem Laserpointer – und monochromatisches sichtbares Licht erzeugen. Sie können sich aber auch in einem Beschleuniger frei in einer Vakuumröhre bewegen und Blitze energiereichen Röntgenlichts erzeugen.

Wie wirkt Licht?

§16 Allgemein gesprochen überträgt Licht Energie und Information durch Raum und Zeit. Die frequenzabhängige Energie des Lichts kann bei Kontakt mit Materie in andere Energieformen umgewandelt werden. Man kann Lichtwellen Informationen aufprägen, die beim Empfänger wieder entschlüsselt werden können. Dabei kann auch der nicht lokale Charakter von Lichtwellen ausgenutzt werden.

§17 Auf subatomarem Niveau übertragen Photonen die elektromagnetischen Kräfte zwischen geladenen (Elementar-)Teilchen. Die Quantenfeldtheorie beschreibt, wie das funktioniert. Der Mechanismus der Wechselwirkung über den Austausch von Kraftteilchen lässt sich auch auf andere Naturkräfte übertragen.

§18 Makroskopisch betrachtet kann Materie Licht absorbieren, reflektieren und brechen. Im Allgemeinen treten alle drei Effekte gleichzeitig auf,

³Das Kunstwort Laser ist entstanden aus der Abkürzung für *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, also Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung.

unterhalb eines streifenden Grenzwinkels aber nur noch Reflexion. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Licht ist in Materie geringer als im Vakuum. Das hängt mit der Anregung der geladenen Komponenten der Materie durch das elektromagnetische Wechselfeld zusammen.

§19 Mikroskopisch gesehen üben elektromagnetische Felder auf elektrisch geladene Teilchen eine Kraft aus. Elektrische Felder beschleunigen Ladungen entlang ihrer Richtung, proportional zu Ladung des Teilchens und elektrischer Feldstärke.

§20 Magnetische Felder üben nur auf bewegte Ladungen eine Kraft aus. Diese steht senkrecht auf der Bewegungsrichtung der Ladung und der Richtung des Magnetfeldes. Magnetfelder lenken also geladene Teilchen ab, ohne sie schneller zu machen oder zu bremsen. Die Magnetkraft ist proportional zur magnetischen Feldstärke sowie zu Ladung und Geschwindigkeit des Teilchens.

§21 Die Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Materie ist abhängig von der Wellenlänge des Lichts. Bei statischen oder sehr langwelligen Feldern hängt sie von Eigenschaften der Materialien ab. Sie können elektromagnetische Felder verstärken oder schwächen. Umgekehrt können die Felder Materie polarisieren oder magnetisieren.

§22 Radio- und Mikrowellen dienen der Telekommunikation, da die Erdatmosphäre für sie durchlässig ist. Im Mikrowellenbereich liegen aber auch Resonanzfrequenzen von Wasser, Ihr Mikrowellenofen nutzt das aus.

§23 Im Infrarotbereich liegt, was wir gemeinhin als Wärmestrahlung bezeichnen. Abhängig von Materialeigenschaften wie der Farbe kann Materie einen Teil dieser Strahlung absorbieren, was zur Erwärmung des Materials führt. Infrarote Strahlung ist auch prominent im Sonnenlicht enthalten.

§24 Licht im sichtbaren Bereich des Spektrums wird von den Zapfen und Stäbchen der Retina in elektrische Signale umgewandelt. Dabei sind Zapfen auf die Lichtintensität empfindlich, Stäbchen dienen der Farbwahrnehmung. Der Sehnerv leitet die Impulse an das Gehirn weiter, wo sie zu einem Bild verarbeitet werden.

§25 Im Allgemeinen ist das Auflösungsvermögen von Licht proportional zur Wellenlänge. Man kann also mit kurzwelligem Licht kleinere Strukturen beobachten, mit fotografischer Bildgebung oder geeigneten Detektoren.

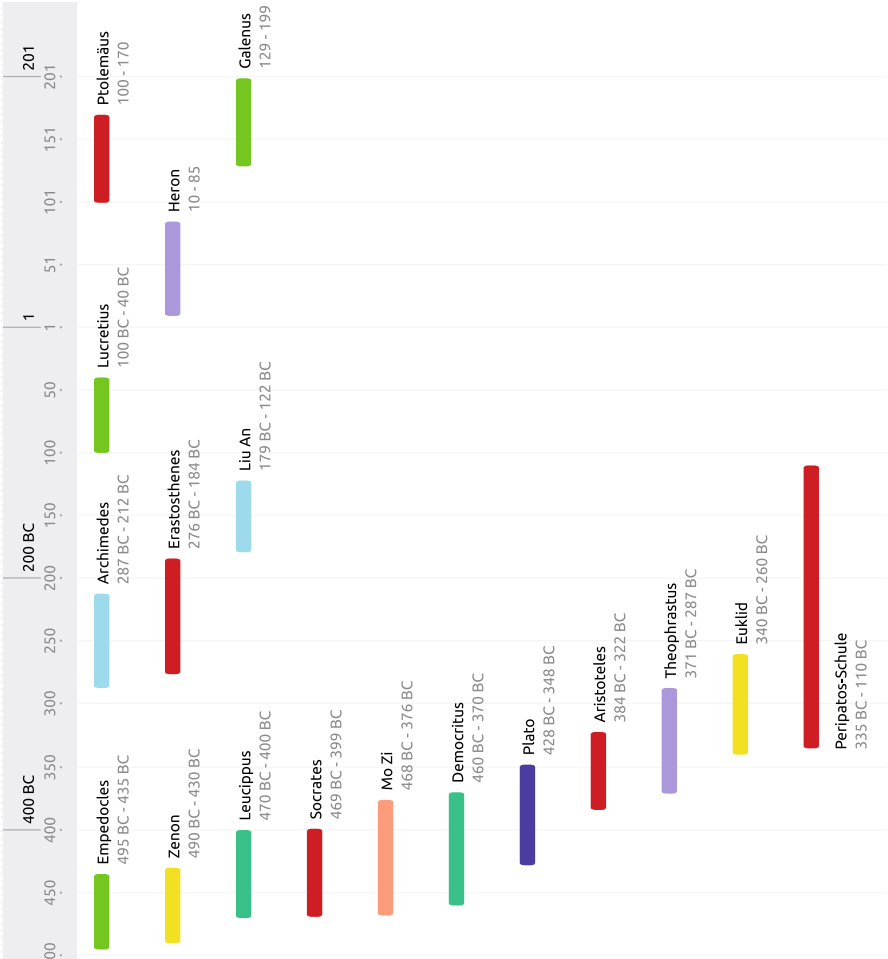
§26 Ultraviolettes Licht ist im kurzwelligen Bereich des Sonnenlichts enthalten. Es wirkt auf unsere Haut und führt zu Pigmentbildung, bei zu hohen Intensitäten zu Schäden. Es wirkt außerdem keimtötend. Unterhalb einer Wellenlänge von etwa 200 nm ist die Energie hoch genug, um Atome zu ionisieren.

§27 Treffen Elektronen nach einer Beschleunigung durch Hochspannung von ca. 20 bis 120 kV auf eine Metallplatte auf, senden sie Bremsstrahlung im Bereich der Röntgenstrahlung aus. Diese ist kurzweilig genug, um organisches Material und viele andere Materialien zu durchdringen. Durch diese Durchleuchtung ist eine hochauflösende Darstellung der inneren Struktur möglich. Organisches Gewebe wird durch längere oder häufige Exposition geschädigt.

§28 Im extrem kurzwelligen Bereich der Gammastrahlung kann elektromagnetische Strahlung Atome ionisieren. Bei ausreichender Energie setzen auch Kernreaktionen ein. Auch dieser Frequenzbereich ist für organisches Material schädlich, insbesondere durch Beeinträchtigung des Erbguts.

§29 Licht lässt sich einsperren, allerdings nur kurzzeitig. Transversale Wellenleitung durch Totalreflexion wird z. B. in Glasfasern ausgenutzt. Longitudinale Begrenzung, etwa durch parallele Spiegel, führt bei geeigneter Geometrie zu stehenden Lichtwellen, analog den Schwingungen einer Saite. Dann bewegen sich Bäuche (Maxima-Minima der Felder) und Knoten (Nullstellen) nicht oder nur langsam. Man kann das ausnutzen zu Speicherung und Studium geladener Teilchen, etwa von Elektronen oder ionisierten Atomen.

So weit der heutige Blick auf Licht. Aber jetzt alles zurück auf Anfang. Und mein Anfang ist die griechische Antike. Ich gebe zu, dass diese Wahl auf meinen persönlichen Vorlieben und meinem begrenzten Bildungshorizont beruht. Natürlich haben Menschen auch vorher schon über Licht nachgedacht und Ideen formuliert. Aber darüber weiß ich noch weniger als über antike Denker.



3

Augenlicht

Am Anfang schuf Gott den Himmel und die Erde. Die Erde war aber wüst und öde, und Finsternis lag auf der Urflut, und der Geist Gottes schwebte über den Wassern. Und Gott sprach: Es werde Licht! Und es ward Licht. Und Gott sah, dass das Licht gut war, und Gott nannte das Licht Tag und die Finsternis nannte er Nacht. Und es ward Abend und ward Morgen: ein erster Tag.

Die Bibel, Moses 1:1–5

Nicht umsonst beginnt die Schöpfungsgeschichte der Bibel, wie viele andere Schöpfungsmythen auch, mit der Erschaffung des Lichts. Es erlaubt uns schließlich das Sehen, unseren wohl direktesten Zugang zur Welt. Für unsere Zwecke aber wollen wir die Zeit, wo nichts als Mythen die Welt erklären konnten, hinter uns lassen und beginnen mit den Lichtideen der klassischen Antike, in der griechischen und hellenistischen Naturphilosophie. Autoren und Werke, die im Text eine Rolle spielen, sind auf der Zeitachse der vorhergehenden Seite verortet, soweit man die Daten wenigstens ungefähr kennt.

Ich muss gestehen, ich fühle mich unwohl, wenn ich über die Antike schreibe. Das Lebensgefühl, dominiert vom Augenschein, einem heillos überfüllten Olymp und wilder Spekulation, ist mir ziemlich fremd. Das liegt wohl zum Teil daran, dass ich Altgriechisch allenfalls wortklaubertisch entziffern kann. Und dass mein Latein in den über 50 Jahren seit dem Großen Latinum mehr als eingerostet ist. Ich bin also für das Folgende auf Sekundärliteratur angewiesen. Das ist allerdings verzeihlich, weil die Überlieferung

der antiken Naturphilosophie alles andere als direkt und vollständig ist. Die meisten Schriften sind im Original wenn überhaupt nur bruchstückhaft als Fragmente auf Papyrus zugänglich. Mehr wissen wir aus der sogenannten doxografischen Tradition, also aus den Kommentaren und Kritiken späterer Autoren über die Lehren ihrer Vorgänger. Doxografie ist der Fachausdruck für eine Sprechweise wie „A hat uns gelehrt, dass...“. Sie ist Ihnen vielleicht in antiken und antikisierenden Schriften schon aufgefallen und hat Sie (wie mich) misstrauisch gemacht. Ich rate also sehr dazu, was ich schreibe, mit den Autoritäten kritisch zu vergleichen, etwa mit Egon Friedells klassischer *Kulturgeschichte des Altertums* [531] von 1936, die sich vergnüglich liest. Aus neuerer Zeit empfehle ich Gábor Á. Zempléns *The History of Vision, Colour, & Light Theories* [504] oder Igal Galilis *Scientific Knowledge as a Culture* [593], die ich beide sehr schätze.

Trotz Ihres berechtigten Misstrauens ist ein Kapitel über antike Lichtideen nützlich und erforderlich. Nützlich deshalb, weil viele der dort verfolgten naturphilosophischen Ansätze dem kindlichen Verständnis von Licht und Sehen ziemlich ähnlich sind. Jean Piaget hat diese Parallelen in seinen Forschungen herausgearbeitet. Und erforderlich, weil wir verstehen müssen, wie weit man kommt, wenn im Wesentlichen nur rudimentäre Messinstrumente und die Geometrie als Werkzeuge zur Verfügung stehen. Mit der Methode des reinen Nachdenkens über die Natur, der Naturphilosophie eben.

In der Antike waren Licht und Sehvorgang nicht voneinander zu trennen. Die erste uns bekannte Theorie gründet sich wohl auf die Lehre des Pythagoras aus dem 6. Jahrhundert v. u. Z., an dessen Satz von den Seiten eines rechtwinkligen Dreiecks Sie sich sicher erinnern. Die seiner Schule zugerechneten Hippokrates und Archytas entwickelten im 5. und 4. Jahrhundert v. u. Z. das, was man heute die Extramissionstheorie des Sehprozesses nennt. Danach lodert im Auge die *opsis*, ein internes Feuer, das aus dem Auge des Betrachters auf das betrachtete Objekt trifft. Damit wird der Sehvorgang analog zum Tastsinn als vom Betrachter ausgehend – extramitiert – betrachtet. Und „leuchten“ nicht auch die Augen der Katze im Dunkeln? Vielleicht erinnert Sie die Extramission auch an die kindliche Vorstellung, dass man unsichtbar wird, wenn man sich die Augen zuhält. Allerdings war schon damals diese Theorie eines aktiven Sehvorgangs nicht unumstritten. Warum etwa können wir im Dunklen nicht sehen?

Die zweite Theorie des Sehvorgangs kehrt die Richtung der Aktion um. Sie gründet sich auf die Schule der Atomisten, Leucippus und Democritus folgend. Überliefert ist sie durch Theophrastus' *De sensibus*. Ihre Verteidigung durch Epicurus' *De natura* gegen Attacken von Plato und Aristoteles kennen wir wiederum aus der Doxografie von Lucretius *De rerum natura*. Es lebe die

Doxografie! Nach dieser Theorie lösen sich von den Objekten unaufhörlich kleine Bildchen, *eidolon* genannt, und begeben sich auf die Reise, an deren Ende sie in unser Auge eintreten. Sie bestehen in der Tat aus dünnen Schichten der Atome, aus denen nach den Atomisten die Materie besteht. Es ist die Farbe der Objekte, die für die Emission der *eidola* verantwortlich ist. Da sie ins Auge eintreten, wird diese Denkrichtung auch als Intromissionstheorie bezeichnet. Ein Argument dafür sahen die Anhänger in der Tatsache, dass man im Auge eines Gegenübers ein verkleinertes Bild der Umgebung gespiegelt sieht. Unklar bleibt, wo *eidola* bleiben, die nicht auf unser Auge treffen. Und wie Bildchen von großen Objekten in unser kleines Auge passen. Und natürlich auch, warum die Aussendung bei Dunkelheit ausbleibt.

Empedocles in Sizilien und Plato in Athen boten im 5. und 4. Jahrhundert v. u. Z. eine Synthese dieser verschiedenen Denkansätze an. Empedocles kennen Sie vielleicht als den Verfechter der vier Elemente – Luft, Feuer, Wasser und Erde – aus seiner *Physica*. Plato mag Ihnen wegen seiner in der Schule viel besprochenen Gleichnisse erinnerlich sein. In seiner *Politeia* erklärt er seine Erkenntnistheorie anhand der Linien-, Höhlen- und Sonnengleichnisse. Im Letzteren steht die Sonne als Sinnbild des allem anderen übergeordneten Guten. Im siebten Buch werden vier Lehrfächer zum Studium der Philosophie vorgeschrieben, die noch im Mittelalter das *Quadrivium* der damaligen Universität bilden: Arithmetik, Geometrie, Harmonielehre und Astronomie. Im *Timaeus*-Dialog assoziiert Plato die Elemente mit den regelmäßigen Polyedern: das Tetraeder mit dem Feuer, das Oktaeder mit der Luft, das Ikosaeder mit dem Wasser und schließlich das Dodekaeder mit dem Universum als Ganzes.

Der Sehvorgang resultiert nach dieser Theorie aus dem Zusammenwirken dreier Feuer: dem „reinen Feuer“ des Tageslichts, dem internen Feuer des Auges und dem externen Feuer, das die Objekte aussenden. Alle drei strömen zusammen – Gleiches zu Gleichem – verschmelzen und bilden einen homogenen Körper zwischen dem Auge und dem Objekt. Dem Sonnenlicht fällt dabei die Rolle des Auslösers zu. Farbeindrücke werden ausgelöst durch Teilchen verschiedener Größe im Feuer. Sie sehen, das Denken wird komplexer.

Und damit nicht genug, legte Aristoteles noch eins drauf, indem er sich im Detail mit dem Medium beschäftigt, das zwischen Beobachter und Objekt vermittelt. Nach seinem Werk *De anima* ist das reine Licht „weder ein Feuer noch überhaupt ein Körper, noch Ausfluss irgendeines Körpers, sondern die Anwesenheit von Feuer oder etwas Derartigem“ in potenziell transparenten Körpern. „Reines Licht“ ist dabei meine Wortwahl, nicht die des Aristoteles. *Potenziell* transparent sind z. B. der alles durchdringende Äther, Wasser, Luft und gewisse Kristalle. Sie werden *tatsächlich* transparent gemacht, indem das reine Licht sie im Ganzen in einen transparenten Zustand versetzt. Nicht

etwa allmählich, Schritt für Schritt, sondern im Ganzen, so wie nach seiner Vorstellung ein Eimer Wasser nicht sukzessive gefriert, sondern plötzlich und überall gleichzeitig. Bei Gegenständen wirkt das reine Licht ähnlich: Sie werden von einem *potenziell* illuminierten Zustand in einen *aktuell* illuminierten Zustand versetzt, durch die pure Anwesenheit einer Lichtquelle. Licht bewegt sich also nicht von A nach B, kann kein Teilchen sein, weil im Äther kein Platz dafür ist, auch kein Veränderungsprozess (*kinesis*) oder dessen Verwirklichung (*energeia*). Vielmehr löst es eine positive Vervollkommnung der potenziellen Transparenz aus. Licht als der große Ermöglicher, der Form oder Qualität eines Objekts sichtbar macht.

Wenn Ihnen diese Erklärung, wie das reine Licht funktioniert, zu komplex und weit hergeholt erscheint, so mag das am Begriff des Äthers liegen, auf den wir noch gar nicht eingegangen sind. Seine Annahme ist allen antiken Theorien vom Licht zu eigen und wirkt bis in die Neuzeit nach, wie wir noch sehen werden. Es handelt sich um eine meist nicht näher spezifizierte Substanz, die den Raum ausfüllt, ja die den Raum definiert. Raum ohne Inhalt, Vakuum, ist in der Antike nicht vorstellbar. In Platons *Thimaueus* wird den vier irdischen Elementen ein fünftes hinzugefügt: „Ebenso gibt es viele Arten der Luft, die reinste, welche mit dem Namen Äther, und die trübste, welche Nebel und Gewölk benannt wird, und noch andere, welche keinen besonderen Namen führen“. Aristoteles verwendete den Begriff zwar nicht, unterschied aber ein unwandelbares und zeitloses „erstes Element“, das die himmlische Sphäre oberhalb des Mondes ausfüllt, von den vier irdischen, wandelbaren Elementen. Nach ihm kann der Äther sich nicht linear bewegen wie die übrigen Elemente, sondern nur kreisförmig. Er teilt mit den irdischen Elementen keinerlei Eigenschaften, ist weder heiß noch kalt, weder feucht noch trocken. Licht wird durch lokale Rotationen des Äthers übertragen. Er hält die Himmelskörper an ihrem Platz.

Es mag Sie auch stören, dass hier Ingredienzien einer Theorie hinzugefügt werden, um Lücken in der Kette von Argumenten zu füllen oder Ungeheimheiten zu beheben. Das widerspricht einer gewissen wissenschaftlichen Ideologie, die heute viele Menschen teilen. Es handelt sich um die reduktionistische Forderung, dass eine bessere Theorie mehr Phänomene mit weniger Zutaten erklären sollte. Damit würde wissenschaftlicher Fortschritt durch eine immer weitergehende Reduktion der Elemente und Kräfte gekennzeichnet sein. Auch ich hänge dieser Ideologie an. Wenn Sie Näheres wissen wollen, finden Sie Argumente in meinem Buch *Particles, Fields, Space-Time* [600] über die Entwicklung der Teilchenphysik. Bedenken Sie aber, dass Ideologien in der Wissenschaft nichts zu suchen haben.

Abschweifung: Aristoteles' Physik der Bewegung

Der Physik des Aristoteles und seiner Peripatos-Schule kann man nicht vorwerfen, dass sie heute übermäßig populär wäre. Vielmehr wird sie oft als nur intuitiv begründet oder schlicht falsch abqualifiziert. Darüber hinaus wird behauptet, sie habe eine Ideologie begründet, von der sich die Wissenschaft über tausend Jahre nicht befreien können. Ein Beispiel dieser gängigen Lehrmeinung liefert die ChatGPT von PocketAI auf meine Frage, ob die Physik des Aristoteles falsch sei:¹

„Die Physik des Aristoteles, insbesondere sein Konzept der Bewegung, ist weitgehend ersetzt worden durch die Newton'sche Mechanik, die die Basis der modernen Physik bildet. Mit Fortschritten in experimenteller Technik und wissenschaftlicher Erkenntnis sind die meisten von Aristoteles' Konzepten ersetzt oder modifiziert worden. Daher kann die Physik des Aristoteles im Kontext moderner Wissenschaft generell als falsch angesehen werden.“

Der von mir hoch geschätzte Physiker und geniale Autor Carlo Rovelli ist vollkommen anderer Meinung. In einem Artikel von 2015 [560] (den Sie unbedingt lesen sollten!) verteidigt er vehement die aristotelische Lehre von der Bewegung. Wir fassen einige ihrer Lehrsätze kurz zusammen, wie man sie in Aristoteles' Schriften *Physica*, *De caelo* und *De generatione et corruptione* findet. Aristoteles unterscheidet zwischen natürlicher und erzwungener Bewegung. Mit natürlicher Bewegung streben die Elemente und Körper ihrem natürlichen Ort zu. Für den Äther ist diese Bewegung kreisförmig um ein Zentrum herum, das sich im Mittelpunkt der kugelförmigen Erde befindet. Für die übrigen Elemente ist die natürliche Bewegung vertikal und strebt ihrem natürlichen Platz im Kosmos zu. Die Elemente sind schalenförmig angeordnet, beginnend mit der sphärischen Erde, umgeben von den Sphären des Wassers und der Luft, und zuletzt mit der des Feuers. Alles in allem sind diese irdischen Sphären aber viel kleiner als die des Äthers, der die Gestirne trägt. Feste Körper streben der Erde zu, ihrem natürlichen Platz. Ebenso das Wasser, das aus den Wolken herunterfällt. Luft steigt im Wasser dagegen auf, weil ihr natürlicher Platz darüber liegt. Dass Feuer in der Luft nach oben strebt, kann man an jeder Flamme beobachten.

¹*Aristotle's Physics, particularly his concept of motion, has been largely superseded by the theories of Newtonian mechanics, which form the basis of modern physical science. With advances in experimentation and scientific knowledge, most of Aristotle's conceptions have been replaced or modified. Therefore, in the modern scientific context, Aristotle's Physics can be considered generally wrong.*

Die aristotelische Physik ist nicht quantitativ, sondern qualitativ ausgerichtet und begnügt sich mit relativen Eigenschaften der Phänomene. So ist die natürliche Fallbewegung schwerer Körper nach ihm schneller als die von leichteren. Und gleiche Körper fallen langsamer in dichteren Medien, also etwa in Wasser verglichen mit Luft. Nun weiß natürlich jeder Viertklässler, dass alle Körper nach Newton gleich schnell fallen! Also ist die aristotelische Theorie falsch? Nein, das ist sie nicht. Sie beruht auf Augenschein und Erfahrung auf unserer Erde. Machen Sie einen Versuch mit einer Münze aus Metall und einer gleich großen aus Plastik, wie Sie sie im Schloss Ihres Einkaufswagens benutzen können. Ja, die Metallmünze fällt schneller. Beider Bewegung ist bei näherer Betrachtung nicht gleichförmig. Nach einer recht kurzen Phase von Beschleunigung stellt sich aufgrund des Luftwiderstandes eine konstante Geschwindigkeit ein, die in der Tat für schwerere Objekte größer ist als für leichte. Sie haben das beim Unterschied von Regentropfen und Hagelkörnern vielleicht schon bemerkt. Gäbe es keinen Luftwiderstand, wären Regentropfen in der Lage, ein Loch in Ihren Schirm zu reißen. Gott sei Dank bremsen die Reibungskräfte der Luft kleine Tropfen auf etwa 5 km/h. Kleine Hagelkörner sind etwa doppelt so schnell, große können bis zu 60 km/h schnell sein und Ihr Autodach verbeulen. Und dass Gegenstände in Wasser (Dichte ungefähr 1000 kg/m^3) langsamer fallen als in Luft (Dichte ungefähr 1 kg/m^3), ist Ihnen sicher auch schon aufgefallen.

Mit den Werkzeugen der Antike war es nicht möglich, den anfänglichen Beschleunigungsvorgang zu beobachten. Geschwindigkeiten waren nur vergleichbar über lange Strecken und gleichzeitige Vorgänge. Läufer im Stadion waren schneller oder langsamer im selben Wettkampf. An aufeinanderfolgenden Tagen wurde der Vergleich schon eher subjektiv. Die Länge von Strecken war gut messbar, das *stadion* eine gängige Maßeinheit von etwa 150 m. Aber Zeitmessung für schnelle Vorgänge war nicht möglich. Sonnen- oder Wasseruhren geben nicht einmal Minuten an, geschweige denn die hundertstel Sekunden aus den heutigen Sportberichten. Mithin beschreibt Aristoteles seine natürliche Bewegung – also den freien Fall in Luft und Wasser – qualitativ korrekt.

Ein interessanter Aspekt der natürlichen aristotelischen Bewegung ist, dass sie im Vakuum unendlich schnell verlaufen sollte. Der Grund ist, dass ein perfektes Vakuum keine Materie enthält, also Dichte null hat. Damit sollte die natürliche Fallgeschwindigkeit im Vakuum unendlich groß werden. Aristoteles schloss daraus, dass es das Vakuum nicht geben kann.

Die erzwungene Bewegung ist vielfältiger. Als Beispiel mag uns die Wurfbewegung dienen, die natürlich auch in der Antike interessiert hat. Nach Aristoteles bewirkt mein Arm beim Wurf eine Bewegung des Steins, die

nicht seiner natürlichen Bewegung entspricht. Wenn meine Aktion endet, kehrt der Stein allmählich zu seiner natürlichen Bewegung zurück, er beginnt zu fallen. Erzwungene Bewegung endet, wie Aristoteles behauptet. Wieder ein Erfolg, natürlich unter den realen Bedingungen seiner Beobachtung, nicht unter den idealisierten unseres Schulunterrichts, die die Wurfparabel als Flugbahn ergeben. Allerdings hatte Aristoteles eine sehr wortreiche, aber wenig überzeugende Erklärung dafür, dass der Übergang von erzwungener zu natürlicher Bewegung beim Wurfgeschoss allmählich und nicht abrupt erfolgt. Irgendwie sollte die verdrängte Luft die erzwungene Bewegung verlängern.

Wir werden auf die Parallelen zwischen Bewegungskategorien bei Aristoteles, Newton und Einstein noch eingehen. Wir halten aber hier schon mit Rovelli fest, dass die natürliche Bewegung beim einen und die Trägheitsbewegung bei den anderen durchaus konzeptuelle Parallelen aufweisen. Die Tatsache, dass man eine Kraft aufwenden muss, um aus der natürlichen in die erzwungene Bewegung zu kommen, überlebt ebenfalls. Mit Rücksicht auf den qualitativen Charakter antiker Physik kann man also – wieder mit Rovelli – durchaus sagen, dass die aristotelische Physik unter alltäglichen Bedingungen eine nützliche Approximation von Newtons Bewegungstheorie enthält. Die Nützlichkeit erklärt ihre Langlebigkeit, nicht etwa ein dogmatischer Charakter.

Hellenistische Optik

In dem entweder von Aristoteles selbst oder seinem Schüler Theophrastus verfassten Werk *De coloribus* wird Farbe als diejenige Eigenschaft von Stoffen beschrieben, die das Sehen ermöglicht. So sind Luft und Wasser weiß, Feuer und Sonne gelb, Rauch schwarz. Dunkelheit ist die Abwesenheit von Licht, schwarze Objekte reflektieren entweder „schwarzes Licht“ oder gar keines. Darum ist der Schatten schwarz. Transmutationen wie Verbrennung oder Verrottung führen Farbe in Dunkelheit über. Wenn Ihnen hier Erinnerungen an Goethes Farbenlehre aufscheinen, haben Sie recht. Goethe war von dem Werk tief beeindruckt und hat es in seinem Werk *Zur Farbenlehre* [40] Wort für Wort übersetzt.

Die Extramissionstheorie ist aber damit nicht etwa erledigt. Euklid war der große Lehrmeister der nach ihm benannten Geometrie in *Stoikheia* (Elemente), auf die wir noch zurückkommen müssen, wenn wir über antike mathematische Werkzeuge sprechen. In seiner *Optika* aus dem 3. Jahrhundert verfeinert er die Extramissionstheorie, indem er den Sehstrahl einführt (*radius visualis*), der in gerader Linie vom Auge aus das Objekt abtastet. Damit trug er