
Optik und ihre Phänomene

Michael Vollmer

Optik und ihre Phänomene

Lichtspiele in der Natur: von
Luftspiegelungen und Himmelsfarben bis
in die Weiten des Alls

3. Auflage

Michael Vollmer
FB Technik
Brandenburg University of Applied Sciences
Brandenburg an der Havel, Deutschland

ISBN 978-3-662-69308-7 ISBN 978-3-662-69309-4 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-69309-4>

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 2005, 2019, 2024

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, 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.

Springer Spektrum 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.

Vorwort Optik: Grundlagen und Phänomene in Natur und Umwelt (Stand 04.04.2024)

In einer meiner frühesten Kindheitserinnerungen bin ich etwa 4 oder 5 Jahre alt. Ich stand eines Morgens in der Küche und blickte aus dem Fenster Richtung Osten. Dort sah ich eine glutrote Sonne aufgehen und war dermaßen fasziniert (warum ist sie so tiefrot?), dass ich diese Erinnerung noch heute vor Augen habe. Und jetzt, über 60 Jahre später, schreibe ich ein Buch über Optik und optische Phänomene.

Ohne die durch Strahlung von der Sonne zur Erde transportierte Energie gäbe es kein Leben auf der Erde. Ein großer Bruchteil dieser zur Erde gestrahlten Energie ist Licht, d. h. vom menschlichen Auge wahrnehmbar. Den für das Auge unsichtbaren Rest der Sonnenenergie nennen wir schlicht Strahlung.

In der Wissenschaft ist Optik das Gebiet der Physik, das sich mit der Wechselwirkung von Licht, teils aber auch von für das Auge unsichtbarer Strahlung, mit Materie beschäftigt.

Die so definierte Optik ist gerade für Nichtwissenschaftler eines der faszinierendsten Teilgebiete der Physik, denn Optik hat viel mit Licht und dieses mit dem Sehen zu tun. Ein großer Teil aller Sinneswahrnehmungen des Menschen gelangt über das Auge ins Gehirn. Das Sehen bestimmt unser alltägliches Leben sicherlich in weitaus größerem Maß als alle anderen Sinneswahrnehmungen hören, tasten, riechen oder schmecken. Viele optische Phänomene werden im Alltag beobachtet und ihre ästhetischen Anblicke können erfreuen und auch zum Nachdenken anregen.

Allerdings können zwei Menschen exakt dasselbe beobachten und doch etwas völlig verschiedenes sehen. J.W. von Goethe hat das Dilemma sicher nicht als erster, aber treffend formuliert: *Man erblickt nur, was man schon weiß und versteht.* Im Sinne von H.J. Schlichting müssen wir deshalb gerade in der Optik *Sehen lernen, was offen vor unseren Augen liegt.* Damit meint er die fundamentale Differenz zwischen physikalischer und lebensweltlicher Sehweise. *Wir sehen in dem Sinne, dass unsere Netzhäute von den optischen Eindrücken der betrachteten Gegenstände belichtet werden. Solange aber keiner hinten ihnen steht und das Gesehene als das und das interpretiert, bleibt das Gesehene unbewusst und trägt nicht zur Vermehrung der Erkenntnis bei.* Und so hat auch Marcel Minnaert in seinem berühmt gewordenen Buch *Licht und Farbe in der Natur* empfohlen: *Alles, was Sie tun müssen, ist Ihre Augen mit dem Zauberstab zu berühren, der da heißt: Wissen, worauf ich achten muss!*

Die Physik kann dieser Zauberstab sein. Wie jedes Gebiet der Physik – so wird auch die Optik durch zwei grundlegende Fragen geleitet, **wie** und **warum**. Die Frage **wie** führt zu einer Beschreibung. Wie verhält sich Licht, wenn es auf ein großes Hindernis trifft? Wie wird Licht durch ein Prisma abgelenkt? Oder wie breitet sich Licht hinter einem sehr engen Spalt aus? Eine Beschreibung der entsprechenden Fakten führt zwar zu angesammeltem Wissen, die Physik sucht aber darüber hinaus gehend immer nach grundlegenden Zusammenhängen, nach Ursachen. Warum ergibt sich hinter einem großen beleuchteten Hindernis ein scharfer Schatten? Warum entsteht ein breitgefächertes buntes Farbspektrum hinter einem Prisma? Warum breitet sich Licht hinter einem schmalen Spalt nichtgeradlinig in viele Richtungen aus? Optische Phänomene sehen und katalogisieren ist das eine, die Physik möchte sie aber in einen größeren Zusammenhang stellen und ihre Ursachen verstehen – und daraufhin versuchen auch die schwerste Frage von allen in der Optik zu beantworten: was ist Licht? Das vorliegende Buch wird sich hinsichtlich optischer Phänomene mit den Fragen **wie** und **warum** beschäftigen und

sie nutzen um viele einfache und auch komplizierte Erscheinungen zu beschreiben und auch zu verstehen.

Ein inhaltsbezogener Leitgedanke ist, die vielfältigen optischen Wahrnehmungen unserer Umwelt nach wissenschaftlichen Prinzipien zu untersuchen und zu erklären. Da (fast) alle Menschen über ihre Augen die Umwelt wahrnehmen, betrifft uns die Wahrnehmung optischer Phänomene alle persönlich. Und im Gegensatz zu den meisten anderen Gebieten der Physik können bereits mit dem eigenen Sinnesorgan Auge als Detektor viele Experimente durchgeführt werden.

Die Herangehensweise an Inhalte orientiert sich an einem didaktischen Leitfaden. Im Gegensatz zum historischen Weg des Erkenntnisgewinns, der mal geradlinig, mal auch in steilen beschwerlichen Serpentin, und manchmal auch auf deutlichen Umwegen erfolgte, soll die Behandlung der Optik hier von grundlegenden Ideen und Konzepten ausgehen. Dieser Bezug auf übergeordnete Prinzipien offenbart eine Eleganz der Beschreibung, die uns immer wieder staunen lässt, ob der (auf höherem Erkenntnisniveau) einfach erscheinenden grundlegenden naturwissenschaftlichen Gesetze.

Aus der klassischen Elektrodynamik, genauer den Maxwell-Gleichungen und den sie ergänzenden Materialgleichungen, folgt die Existenz elektromagnetischer Wellen. Deren Gesetzmäßigkeiten führen zur Wellenoptik einerseits und unter passender Näherung – immer dann wenn die Wellenlänge klein gegen Objektdimensionen ist – zur geometrischen Optik andererseits, den beiden tragenden Säulen der klassischen Optik. Offensichtlich sind schon einfache optische Fragestellungen z. B. Abbildungen mit einer Linse oder Nahfeldbeugung an einer Blende aber nur unter großen Mühen direkt aus den Maxwellgleichungen mit passenden Randbedingungen lösbar.

Hier helfen jedoch zwei Näherungen, die – obgleich eigentlich eine Folge der allgemeinen Wellentheorie – gerne als fundamentale Prinzipien der Optik bezeichnet werden. Diese sind das Huygensprinzip der Wellenoptik und das Fermatprinzip der geometrischen Optik für die Ausbreitung von Licht. Wir werden in diesem Buch ausgehend von diesen zwei Prinzipien, das Gebäude der klassischen Optik behandeln. Ähnlich werden wir häufig eine klassische Näherung für die Wechselwirkung von Licht mit Materie ansetzen, die auf klassischer Elektrodynamik und spezieller Relativitätstheorie beruht: beschleunigte Ladungen strahlen elektromagnetische Wellen ab. Diese Beschreibungen der Optik werden zwar nicht immer, aber doch manchmal zu Widersprüchen mit Ergebnissen der modernen Quantenphysik führen. Deren wesentliche für die Optik relevanten Ergebnisse werden in einem eigenen Kapitel präsentiert.

Die Optik ist eines der ältesten Teilgebiete der Physik – und sicherlich gab es in den letzten Jahrhunderten und verstärkt den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl hervorragender Lehrbücher zum Thema (siehe z. B. unten eine Auswahl einiger guter Optiklehrbücher). Warum möchte ich diesen ein weiteres hinzuzufügen? Dies kann nicht losgelöst gesehen werden von der zur Zeit misslichen Situation naturwissenschaftlicher Allgemeinbildung und dem Adressatenkreis dieses Buchs.

Leider wird Optik – obgleich eines der alltagsnächsten und daher stark motivierenden Gebiete der Physik – in den Curricula der Schulen immer weiter herausgestrichen, in einigen Bundesländern gar kaum noch unterrichtet. Und so verwundert nicht, dass optisches Grundlagenwissen in der Bevölkerung immer weiter zurückgeht, ja kaum noch existiert. Ähnlich wie an den Schulen sieht es leider auch in den meisten allgemeinbildenden Veranstaltungen technischer und naturwissenschaftlichen Studiengänge an den Hochschulen aus. Die Optik wird in Anfängervorlesungen der Experimentalphysik häufig nur als ein kleiner Teil der klassischen Physik behandelt, meist unter großem Zeitdruck am Ende des 2. Semesters. Für ein umfassendes Verständnis der Optik reichen diese wenigen Wochen Lehre im 2. Semester, die zudem nicht auf Schulwissen aufbauen können, bei weitem nicht aus.

Erfreuliche Ausnahmen an den Hochschulen sind Studiengänge mit mehr Optikbezug, z. B. Augenoptik oder optische Gerätetechnik, Licht- und Beleuchtungstechnik sowie verstärkt in den beiden letzten Jahrzehnten optische Technologien, Laser- und Quantenoptik, Optoelektronik und Photonik, die mit unterschiedlichen Bezeichnungen als grundständige Bache-

lor- oder aufbauende Masterstudiengänge angeboten werden. Die thematisch der Physik nahestehende Meteorologie hat ebenfalls große Optikbezüge und auch die Astronomie arbeitet mit optischer Gerätetechnik wie Teleskopen und Spektrometern.

Unabhängig davon, welche modernen optischen Themen für Industrie oder Forschung wichtig sind oder welche optischen Phänomene in Natur und Umwelt verstanden werden sollen: ein gutes Grundwissen und Verständnis der klassischen Optik ist immer hilfreich.

Ich selbst habe Optik vor über 40 Jahren als Spezialvorlesung im Rahmen eines normalen Physikstudiums an der Universität Heidelberg im 6. Studiensemester gehört (damals noch ohne die heutzutage starke Regulierung der leider weitgehend verschulden BA und MA Studiengänge). Grundlage war die erste Auflage des mittlerweile nahezu unumstrittenen Standardlehrbuchs der Optik von Hecht (damals noch mit dem Koautoren Zajac). Seit dieser Zeit hat mich die Optik zeitlebens begleitet, im Berufsleben auch durch etwa 30 Jahre Lehre anfangs in Physik- und Optikvorlesungen an Universitäten, später in Vorlesungen, Übungen und Laboren an der Technischen Hochschule in Studiengängen der physikalischen Technik, technischen Physik optischen Technologien und auch Augenoptik. Und dabei habe ich Dutzende von Physik- und Optiklehrbüchern studiert und Teile ihrer Inhalte genutzt.

In den traditionellen Optiklehrbüchern ist häufig entweder eine am Curriculum oder Vorlieben der Autoren orientierte Auswahl an grundlegenden Themen der Optik zu finden (letztere Beschreibung trifft natürlich auch auf das vorliegende Buch zu) oder aber es wird versucht das Thema dermaßen umfassend darzustellen, dass Werke mit weit über 1000 Seiten entstehen. Klarerweise sind daher manche Details der Optik in dem einen, andere in einem anderen Buch bereits exzellent beschrieben oder hergeleitet.

Leider behandeln viele dieser Lehrbücher nur physikalische Optik oder nur technische Optik. Viele lassen zudem einige wichtige für die Praxis relevanten Themen fast oder vollständig außen vor. Dazu zählen physikalische Funktionsweise von Lichtquellen und Detektoren, quantitative Beschreibung von Licht durch Radiometrie und Photometrie oder auch eine Beschreibung von Farbe. Ebenso wird einerseits zwar meistens etwas Quantenoptik eingeführt, andererseits aber eine ihrer praxisnahen Hauptanwendungen, die Spektroskopie, nur randständig erwähnt.

Abgesehen davon werden Lernende, die sich dem Thema Optik zum ersten Mal nähern, meines Erachtens von sehr umfangreichen und stark spezialisierten Werken, die nur wenige Anwendungen aus Alltag und Technik oft oberflächlich einführen, eher abgeschreckt. Um dem Abhilfe zu verleihen versucht dieses Buch insofern einen Spagat als zweigeteiltes Lehrbuch. Einerseits will es eine Einführung in die Grundlagen der klassischen Optik präsentieren (Kap. 1, 2, 3, 4, 5, und 6), andererseits einen ausführlichen Überblick und eine tiefergehende physikalische Diskussion einer Vielzahl optischer Phänomene in der Natur (Kap. 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, und 14).

Zielgruppen des 1. Lehrbuchteils sind natürlich erstens alle Studierenden naturwissenschaftlicher BA-Studiengänge in Einführungsveranstaltungen der Experimentalphysik, die das Buch begleitend zu den ausgewählten Vorlesungsinhalten, aber insbesondere auch weiterführend nutzen können.

Zweitens kann in Bezug auf konkrete Lehrveranstaltungen der erste Teil ausgiebiger genutzt werden von allen Studierenden der oben genannten optiknahen Bachelor- und Master-Studiengänge. Drittens bieten sich beide Teile an für thematisch passende einführende Veranstaltungen der Master-Studiengänge Meteorologie und Astronomie.

Der zweite Lehrbuchteil wiederum ist geeignet für alle diese Gruppen, insbesondere aber auch für alle naturwissenschaftlich interessierten Laien, die sich an der Faszination optischer Naturerscheinungen erfreuen und diese auch verstehen wollen.

Schon im Lehrbuchteil finden sich viele Anwendungsbeispiele von Fensterreflexionen über Lichtwellenleiter und Smartphoneobjektive bis hin zu modernen Beamern. Im Gegensatz zu üblichen Lehrbüchern, bei denen die Angabe weiterführender Literatur eher die Ausnahme ist und sich am Ende des Buchs, wenn überhaupt, auf wenige Seiten beschränkt, wird hier kapitelweise eine große Zahl von Originalarbeiten zitiert. Zudem werden als Novum bewusst auch

jeweils eine Vielzahl von themenbezogenen Veröffentlichungen aus den je zwei führenden didaktisch orientierten Physikzeitschriften auf Hochschulniveau (Bachelor/Master) *American Journal of Physics (AJP)* und *European Journal of Physics (EJP)* sowie denen auf etwas tieferem Niveau (höheres Schulniveau bis Beginn Bachelor) *The Physics Teacher* und *Physics Education* gelistet. Letztere sind größtenteils auch für naturwissenschaftlich interessierte Laien geeignet.

Diese große Auswahl an Literaturangaben pro Kapitel ermöglicht erstens ein weiterführendes Selbststudium und zweitens viele mögliche Projekt- oder Seminararbeiten zum Thema. Drittens müssen dadurch auch nicht alle Sachverhalte im Buch abgeleitet werden. Ein weiterer vierter Aspekt: viele Lehrende an Hochschulen kennen nur Journale ihres eigenen Forschungsgebiets, aber nicht jene für die im Beruf gleichermaßen wichtige Hochschullehre, wie z. B. AJP und EJP. Viele Ideen solcher Artikel habe ich in meine eigene Lehre eingebunden – nachdem ich sie erst einmal gefunden hatte. Vielleicht, so meine Hoffnung, wird es dem einen oder der anderen Lehrenden ähnlich gehen.

Die Lesbarkeit des Buchs wird erhöht, indem nicht alle Zusammenhänge, die seit Jahrzehnten vielfach in Lehrbüchern präsentiert wurden, abgeleitet werden. Viele werden nur formelmäßig präsentiert um sodann ihre Konsequenzen ausführlicher zu diskutieren. Beispielsweise ist es für das Studium der Optik meines Erachtens nicht zwingend notwendig, die Wellengleichung aus den Maxwellgleichungen und daraus als Lösungen elektromagnetische Wellen selbst abzuleiten. Ebenso erscheint mir zum Beispiel wichtiger, die Bedeutung des Fresnel'schen Gleichungen zu verstehen und entsprechende optische Phänomene zu diskutieren, als sie selbst aus Randbedingungen an Grenzflächen abzuleiten.

Da der 1. Lehrbuchteil nicht nur für einführende Veranstaltungen sondern auch für Spezialveranstaltungen höherer Semester der Optik konzipiert ist, werden gelegentlich auch immer wieder Querbezüge zu Ergebnissen aus anderen Teilgebieten der Physik, so den Grundlagen der Festkörper- und Atomphysik sowie theoretische Grundlagen der Elektrodynamik, Quantenmechanik oder statistischer Physik gegeben. Anfänger können diese einfach als gegebene und nicht tiefer diskutierte oder gar abgeleitete Information nutzen und weiterlesen. Sind bei Lernenden höherer Semester jedoch solche Vorkenntnisse vorhanden, so ermöglichen die entsprechenden Erwähnungen im Text ein deutlich tiefer gehendes Eindringen in das Thema, als dies in wenigen Wochen am Ende des 2. Semesters möglich ist. Entsprechend werden viele Erklärungen in diesem Buch nicht bei Null starten. Manche Ergebnisse werden auch nur durch Plausibilitätsbetrachtungen oder anschauliche Vergleiche erläutert. Dies ist, wie schon die Nichtableitung aller Gleichungen, der Lesbarkeit geschuldet.

Ein weiteres wesentliches Merkmal des Buchs ist, dass alle Kapitel prinzipiell auch jeweils einzeln lesbar sind, d. h. nicht zwingend aufeinander aufbauen. Um dies zu ermöglichen, werden auch bewusst kleinere Wiederholungen von Inhalten in Form von Abbildungen oder Gleichungen in Kauf genommen. Für weiterführend Interessierte sind Querbezüge zu ausführlicheren Darstellungen in den entsprechenden anderen Kapiteln gegeben.

Der zweite Buchteil mit den Kap. 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, und 14 mit den Anwendungen optischer Naturphänomene basiert auf meinem populärwissenschaftlichen Buch *Lichtspiele in der Luft* von 2006 und kann daher auch als vollständig überarbeitete und großzügig ergänzte neue Auflage desselben angesehen werden. Er ist auch als Lehrbuch atmosphärischer Optik nutzbar, welches durch eine Vielzahl zusätzlicher Literaturangaben der relevanten Fachtagungen auch Monographie-Charakter hat. Grundsätzlich ist der Aufbau jedes Kapitels ähnlich. Nach dem Beobachten und Beschreiben eines Phänomens kommt die Erklärung und im Nachgang werden, die Erklärung stützende, Laborexperimente diskutiert. Gegenüber der ersten Auflage besticht hier vor allem der durchgängige Vierfarbdruck mit über 200 der jeweils besten Farbfotos vieler Bildautoren zur Visualisierung der Phänomene.

Im Detail ist das Buch wie folgt aufgebaut: In ersten Teil werden nach einer Einleitung (Kap. 1) Konzepte der klassischen Optik, ausgehend von einfachen Modellen der geometrischen Optik (Kap. 2) und Wellenoptik (Kap. 3) behandelt. Das Kapitel zu Quantenoptik und Struktur der Materie (Kap. 4) ermöglicht ein Verständnis der elementaren Absorptions-,

Emissions- bzw. Streuprozesse von Licht mit Materie. Ein grundlegendes Verständnis von Lichtquellen und Detektoren (Kap. 5) führt zu deren quantitativer Bewertung (Kap. 6) mit objektiven Messgeräten (Radiometrie) oder dem Auge (Photometrie). Nicht umsonst ist eine der sieben Basisgrößen des Internationalen Einheitensystems auf das menschliche Auge bezogen. Letztlich sehen fast alle Menschen farbige Bilder. Insofern soll zum Ende des ersten Teils in Kap. 6 auch eine kurze Einführung in die Theorie der Farben gegeben werden.

Im zweiten Teil des Buchs, der an die deutsche Lehrbuchtradition der meteorologischen Optik von Pernter und Exner (1922) bis hin zu Dietze (1957) anknüpfen möchte, werden sodann eine große Vielzahl optischer Phänomene in Natur und Technik beschrieben und diskutiert. Großen Raum nimmt dabei insbesondere die atmosphärische Optik von Luftspiegelungen (Kap. 8), Regenbögen (Kap. 9), Koronen und Glorien (Kap. 10) über Halos (Kap. 11), Himmelfarben (Kap. 12) und Sichtweiten (Kap. 13) bis hin zu Finsternissen im Sonnensystem (Kap. 14) ein. Diese werden zwar häufig in vielen Optiklehrbüchern nebenbei als „bunte Anwendung“ erwähnt, oft aber völlig unzureichend erklärt.

Dieses Buch konnte nur entstehen, weil eine große Zahl von Menschen geholfen und beigetragen hat. Mein sicher schon immer latent vorhandenes Interesse für natürliche optische Phänomene wurde maßgeblich vorangetrieben durch Kontakt mit der wissenschaftlichen Community der *Light and Color in the Open Air* Tagungen, deren Teilnehmer*innen alle derselben wissenschaftlichen Leidenschaft frönen. Seit 1997 bin ich Mitglied dieser nicht an der Karriere sondern an faszinierenden Phänomenen und entsprechenden physikalischen Erklärungen interessierten Community. Ich möchte hier stellvertretend insbesondere Robert Greenler und dem leider viel zu früh gestorbenen Eberhardt Tränkle danken sowie Stan Gedzelman und Joe Shaw, bei denen ich sabbaticals verbringen durfte.

Dieses Buch entstand während des Übergangs meines regulären Arbeitslebens an der TH Brandenburg in den Ruhestand, dessen eigentlicher Beginn sich jedoch zunächst durch eine Seniorprofessur der Wilhelm und Else Heraeus Stiftung noch etwas verzögert. Insofern geht ein großer Dank für Unterstützung an meine Hochschule und dortigen engen Kolleg*innen und insbesondere an die WEH Stiftung.

Ich fotografiere zwar auch selbst, da ich aber nicht nur normale sondern wirklich schöne Fotos optischer Phänomene zeigen will, habe ich oft Kolleg*innen, Bekannte und manchmal auch mir unbekannte Fotograf*innen angeschrieben und um Erlaubnis der Nutzung ihrer Fotos gebeten. Mein besonderer Dank für Überlassung jeweils einer größeren Zahl von Fotos geht an Claudia und Wolfgang Hinz, Joe Shaw und Pekka Parviainen. Weitere wunderschöne Aufnahmen und auch einige Simulationen darf ich mit freundlicher Genehmigung nutzen von (in alphabetischer Reihenfolge) M. Carrieri, L. Cowley, T. Credner, M. Engler, E. Frappa, S. Gedzelman, R. Greenler, A. Haussmann, Th. Jäger, C. Kampf, O. Karaschewski, D. Karstädt, P. Klak, G. und A. Können, S. Kohle, Ph. Laven, G. Maschek, A. Mustard, P. Neiman, J. Peschl, J. Piikki und URSA, W. Scheider, H. Segars, E. Seidenfaden, H.-J. Schlichting, R. Schulz, R. Störmer, W. Tape, M. Theusner, E. Tränkle, L. Wawrzyszko, A. Wolf, und A. Young.

Für eine kritische Durchsicht des 1. Buchteils danke ich Leoni Rath, für kleinere Teile des 14. Kapitels Karl- Heinz Lotze. Ebenso habe ich in den 2. Buchteil viele Hinweise eingearbeitet, die mir in den letzten 18 Jahren nach Erstauflage meines Buchs zur atmosphärischen Optik zuzugingen. Vielen Dank für alle Rückmeldungen, verbunden mit der Bitte an alle Leser*innen, mir auch für dieses Buch ausgiebige Rückmeldungen zu senden.

Natürlich möchte ich auch dem Springer-Verlag für die Produktion dieses Buchs danken. Hier seien insbesondere Frau Stefanie Adam und Frau Gabriele Ruckelshausen genannt, die mich jederzeit unterstützt haben.

Last not least geht der Dank natürlich auch an meine Frau Ute, die mich während der, wegen Corona deutlich verzögerten, Abgabephase des Manuskripts immer unterstützte. Sie und auch meine Kinder Anna und Paul zaubern mir immer ein Lächeln auf die Lippen, wenn sie die Natur beobachten und mich dann, selbst fasziniert, auf optische Naturphänomene aufmerksam machen.

Eine kleine Auswahl der mich prägenden Lehrbücher zur Optik (alphabetisch)

- M. Born, *Optik*, Originalausgabe 1932, Nachdruck, 3. Auflage, Springer 1972
- F.S. Crawford, Jr., *Berkeley Physik Kurs Band 3, Schwingungen und Wellen*, Vieweg (1974)
- D.S. Falk, D.R. Brill, D.G. Stork, *Seeing the Light, Optics in Nature, Photography, Color, Vision, and Holography*, Harper and Row (1986); deutsch: *Ein Blick ins Licht*, Birkhäuser, Springer 1990
- R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison Wesley 1965, insb. Band 1, Kap. 26–36 und Band 2, Kap. 19–22 und 32; z. B. bilingual ed. Oldenbourg Verlag (1973)
- R.D. Guenther, *Modern Optics*, Wiley (1990)
- H. Haferkorn, *Optik*, 3. Aufl., J.A. Barth Verlag, Leipzig (1994)
- E. Hecht, *Optics*, 5th ed., Pearson 2017; deutsch *Optik*, 7. Aufl. de Gruyter (2018)
- I. Newton, *Opticks*, Erstausgabe 1704, Dover Publ. Reprint 1979
- *OSA Handbook of Optics* Vol 1,2, Eds. M. Bass, E.W.v Stryland, D.R. Williams, W.L. Wolfe, McGraw Hill 1995
- F.L. Pedrotti, L.M. Pedrotti, L.S. Pedrotti, *Introduction to Optics*, 3rd ed. Cambridge UP 2017., deutsch: F.L. Pedrotti, L.M. Pedrotti, W. Bausch, H. Schmidt, *Optik, für Ingenieure*, 4. Aufl., Springer (2008)
- R.W. Pohl, *Einführung in die Physik, 3. Band, Optik und Atomphysik*, Springer (1954)
- H. Römer, *Theoretische Optik*, VCH Weinheim 1994

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Was ist Sehen	2
1.2	Was ist Licht	3
1.3	Beschreibung von Licht als elektromagnetische Welle	4
1.3.1	Maxwellgleichungen und Wellengleichung	4
1.3.2	Lösung von Wellengleichungen	5
1.3.3	Beschreibung elektromagnetischer Wellen	7
1.3.4	Ausbreitungsgeschwindigkeit und Brechungsindex	8
1.3.5	Energiefluss und Poyntingvektor	8
1.3.6	Newton: Dispersion, Wellenlängen und wahrgenommene Farbe	9
1.3.7	Spektrum elektromagnetischer Wellen	10
1.4	Beschreibung von Licht als Teilchen	10
1.5	Gültigkeitsbereiche der Beschreibungen durch geometrische Optik oder Wellenoptik	11
1.6	Vereinfachte Beschreibungsprinzipien der Optik	12
1.6.1	Fermat-Prinzip der geometrischen Optik	13
1.6.2	Huygens-Prinzip der Wellenoptik	15
1.7	Interpretation und Anwendungen des Huygens'schen Prinzips	17
1.7.1	Einschub: Beschleunigte Ladungen strahlen	17
1.7.2	Strahlungsemission eines Hertz'schen Dipols	19
1.7.3	Ausbreitung von Licht in Materie	20
1.7.4	Interpretation des Fermat'schen Prinzips	21
1.7.5	Von Reflexion zu diffuser Streuung: der Einfluss von Oberflächenrauigkeit	22
1.8	Kurzer Abriss der Wissenschaftsgeschichte der Optik	23
	Verständnisfragen und Übungsaufgaben	25
	Literatur	26
2	Geometrische Optik	27
2.1	Einführung	28
2.2	Reflexion, Brechung und Totalreflexion	28
2.2.1	Einfallsebene, Zeichenebene, Winkel	29
2.2.2	Reflexionsgesetz	30
2.2.3	Brechungsgesetz	30
2.2.4	Totalreflexion	32
2.3	Dispersion	33
2.4	Anwendung von Prismen	35
2.4.1	Umlenkprismen	35
2.4.2	Prismen in Spektrometern	35

2.5	Optische Abbildungen und Spiegel	38
2.5.1	Definition optischer Abbildungen	38
2.5.2	Ebene Spiegel und Winkelspiegel	39
2.5.3	Nichtebene Konkav- und Konvexspiegel	41
	a) Abbildungsgleichung sphärischer Spiegel und Bildkonstruktion	42
	b) Mathematische Beschreibung und Vorzeichenkonventionen	44
	c) Beispiele und einfache Experimente	46
	d) Ausgewählte Anwendung: Nutzung der Sonnenenergie	48
	e) Anwendungen im Alltag: Reflexion von Fenstern und Fensterfronten	50
	f) Der neue Trend: Freiflächenspiegel	51
2.6	Abbildungen mit Linsen	51
2.6.1	Abbildung durch einmalige Brechung	52
2.6.2	Abbildung durch zweimalige Brechung: dünne Linsen	52
	a) Beschreibende Größen und Vorzeichenkonventionen	53
	b) Linsentypen	54
	c) Bildkonstruktionen	56
	d) Beispiel und einfache Experimente	57
2.6.3	Abbildungsfehler	59
	a) Chromatische Aberration	60
	b) sphärische Aberration	61
	c) weitere Aberrationen	62
2.6.4	Abbildung durch Linsenkombinationen	63
2.6.5	Dicke Linsen	64
2.6.6	Spezielle Linsen	66
	a) Fresnellinsen	66
	b) Gradientenindexlinsen	67
2.7	Einfache optische Geräte	67
2.7.1	Auge und Brille	67
	a) Standardauge	67
	b) Fehlsichtigkeiten	68
	c) Bildorientierung und Wahrnehmung	68
2.7.2	Lupe und Mikroskop	68
2.7.3	Teleskope und Strahlaufweiter	70
	a) Linsenteleskope	70
	b) Spiegelteleskope	71
	c) Strahlaufweiter	72
2.7.4	Lochkameras	72
2.7.5	Linsenkameras: von Spiegelreflexkameras zu Smartphone-Systemen	75
	a) Gesichtsfeldwinkel und Detektoren	75
	b) Blendenzahl	76
	c) Smartphone-Objektive	76
2.7.6	Projektionsgeräte	77
	a) Analoge Geräte: Overheadprojektoren	78
	b) Digitale Projektoren	79
2.7.7	Lichtleiter	80
	a) Einführung und einfache Experimente	80
	b) Lichtausbreitung in Stufenindexfasern	81
	c) Modendispersion: zeitliche Verschmierung	83
	d) Ausbreitung in inhomogenen Medien: Gradientenindexfasern	84
	e) Verluste bei Biegung von Lichtleitern	86
	f) Schwächung in Fasern: das db-Maß	87

2.8	Blenden in optischen Strahlengängen (weiterführendes Thema)	88
2.8.1	Aperturblenden, Pupillen und abbildender Strahlengang	89
2.8.2	Feldblenden, Luken und bildbegrenzender Strahlengang	91
2.9	Ray Tracing und Optiksoftware	92
	Verständnisfragen und Übungsaufgaben	95
	Reflexion und Brechung, Strahlverläufe, Dispersion, Prismen	95
	Spiegel	96
	Linsen und optische Geräte, Blenden	98
	Literatur	100
3	Wellenoptik	103
3.1	Einführung	104
3.2	Materialeigenschaft Brechungsindex	105
3.2.1	Einfaches mikroskopisches Modell für den Brechungsindex	105
	a) Brechungsindex von 1-atomigen Gasen und Dielektrika durch elektronische Polarisierung	106
	b) Warum dominiert für sichtbares Licht die elektronische Polarisierung?	108
	c) Vergleich des klassischen mit dem quantenmechanischen Ergebnis	109
	d) Brechungsindex von Metallen	109
3.2.2	Abschwächung von Strahlung in Materie	110
3.2.3	Übersicht ausgewählter optischer Materialien	110
	a) Gase	111
	b) Flüssigkeiten	111
	c) Dielektrische Festkörper	112
	d) Metalle	114
3.3	Lineare Polarisierung	116
3.3.1	Einfache Polarisatoren und Gesetz von Malus	116
3.3.2	Linearpolarisierung durch Reflexion: Brewsterwinkel	118
3.4	Reflexion und Transmission an Grenzflächen	120
3.4.1	Fresnel-Gleichungen für nichtmagnetische Dielektrika	120
3.4.2	Winkelabhängige Reflexion und Transmission transparenter Materialien	121
	a) Reflexionsgrad von Glas bei senkrechtem Einfall: Einfluss der Dispersion	121
	b) Reflexionsgrade für den Luft-Glas-Übergang als Funktion des Einfallswinkels	122
	c) Transmission planparalleler Platten	122
3.4.3	Ergebnisse für absorbierende Materialien	124
3.4.4	Etwas unsichtbar machen: sind Tarnkappen möglich?	126
3.5	Optische Anisotropie, Doppelbrechung und Polarisierung	126
3.5.1	Mikroskopische Begründung der Anisotropie	127
3.5.2	Konsequenz der Anisotropie für die Ausbreitung von Licht	129
	a) Optisches Phänomen Doppelbrechung	129
	b) Mikroskopische Begründung des optischen Phänomens	130
3.5.3	Phasenverschiebungen und allgemeine Beschreibung der Polarisierung von Licht	132
3.5.4	Doppelbrechende optische Komponenten	134
3.6	Wellenphänomene bei Totalreflexion.	135
3.6.1	Totalreflexion und evaneszente Wellen	135
3.6.2	ATR Spektroskopie	136

3.6.3	Nichtgeradlinige Lichtausbreitung in optisch inhomogenen Medien	137
3.6.4	Wellenoptische Phänomene in Lichtleitern	138
3.7	Interferenz und Beugung	139
3.7.1	Interferenzphänomene	140
	a) Interferenz zweier ebener Wellen	140
	b) Doppelblende	141
	c) Doppelspalt	142
	d) Vielfachspalte und Gitter	143
	e) Anwendung Gitterspektrometer	144
	f) Anwendung Zweistrahlinterferometer	146
	g) Anwendung dielektrische Beschichtungen	147
3.7.2	Beugung	149
	a) Fraunhoferbeugung am Spalt: einfache Bestimmung der Minima (und Maxima)	151
	b) Fraunhoferbeugung für beliebige Blenden, Rechteck-, Loch- und Kreisringblenden	153
	c) Fraunhofer-Beugung an Doppelspalt, Mehrfachblenden und Gitter	157
	d) Prinzip von Babinet: komplementäre Blenden	159
	e) Beugungsobjekte vorgegebener Symmetrie mit statistischer räumlicher Verteilung	160
	f) Fourieroptik : das Array Theorem	161
	g) Lochblende oder Kugel: 2-dimensionale Beugung oder 3-dimensionale Streuung	163
3.7.3	Kohärenz	164
	a) Zeitliche Kohärenz:	165
	b) Räumliche Kohärenz:	167
3.7.4	Bildentstehungstheorie und Auflösungsvermögen optischer Instrumente	168
	a) Inkohärente Punktlichtquellen im Unendlichen	168
	b) Kohärente Punktlichtquellen im Unendlichen	170
	c) Abbe'sche Abbildungstheorie, Auflösungsvermögen Mikroskop und räumliches Filtern	170
3.7.5	Ausblick: Metalinsen und linsenlose Abbildungen	174
	Verständnisfragen und Übungsaufgaben	174
	Literatur	176
4	Wechselwirkung von Strahlung mit Materie: Quantenoptik	181
4.1	Einleitung	181
4.1.1	Beginn der Quantenphysik	181
4.1.2	Welle-Teilchen-Dualismus	183
4.1.3	Vom Bohr-Modell zur Schrödingergleichung	184
4.2	Quantisierte Energieniveaus	185
4.2.1	Atome	185
4.2.2	Moleküle	188
	a) Elektronische Energieniveaus	188
	b) Vibrations- und Rotationsanregungen	189
	Moleküle mit mehr als zwei Atomen	190
4.2.3	Energieniveaus in Festkörpern	191
	a) Kristalline Festkörper	191
	b) Amorphe Körper/Fluide, insbesondere Wasser	193

4.3	Wechselwirkung von Licht mit Materie: Resonante Übergänge	194
4.3.1	Atome	194
4.3.2	Moleküle	196
	a) Vibrationen isoliert	196
	b) Rotationen isoliert	197
	c) Schwingungs-Rotationsbanden	198
	d) Übergänge zwischen elektronischen Zuständen:	
	Franck-Condon-Prinzip	198
	e) Übersicht Molekülspektren	200
4.3.3	Beispiele: gelöste Farbstoffe, Olivenöl und gasförmige Jodmoleküle . . .	200
	a) Farbstoffmoleküle in der Technik	200
	b) Farbstoffmoleküle in Nahrungsmitteln	201
	c) Spektren elektronisch angeregter molekularer zweiatomiger Gase: das Beispiel I_2	202
4.3.4	Nichtmetallische Festkörper	203
4.3.5	Metalle	205
4.4	Wechselwirkung von Licht mit Materie: nichtresonante Anregung	205
4.4.1	Elastische Streuung an Objekten mit $\varnothing_{Obj} \ll \lambda$	206
	a) Rayleighstreuung an Atomen und Molekülen	206
	b) Streuung durch Dichtefluktuationen in Flüssigkeiten	207
	c) Seitliche Streuung in Gasen, Flüssigkeiten und transparenten Festkörpern	207
	d) Quantenmechanische Beschreibung der Rayleigh-Streuung	208
4.4.2	Inelastische Streuung an Molekülen: Ramanstreuung	209
4.4.3	Streuung an Objekten mit $\varnothing_{Obj} \cong / \gg \lambda$: Mie-Streuung	209
	a) Einführung	209
	b) Theorie	211
	c) Ausgewählte Ergebnisse	212
	Verständnisfragen und Übungsaufgaben	215
	Literatur: Nützliche Lehrbücher/Monographien	216
5	Detektoren und Lichtquellen	219
5.1	Detektoren	220
5.1.1	Einführung	220
5.1.2	Thermische Detektoren	220
	a) Thermoelement/Thermosäule	220
	b) Bolometer	221
	c) Pyroelektrische Sensoren	221
5.1.3	Fotoelektrische Detektoren	222
	a) Äußerer Fotoeffekt und Fotomultiplier	222
	b) innerer Fotoeffekt: Photodioden	223
5.2	Beispiele für den Einsatz von Detektoren	225
5.2.1	Einzeldetektoren in Spektrometern	225
	a) Beispiel Sonnenlichtspektren mit Gitterspektrometer	225
	b) Detektoren in verschiedenen Spektrometertypen	226
	c) Beispiel: Analyse derselben Lichtquelle mit Gitterspektrometer bei zwei Blazewellenlängen	227
5.2.2	Flächenhafte Detektoren: focal plane arrays	227
	a) Spektrale Empfindlichkeiten	227
	b) Räumliche Auflösung	227
	c) Probleme messender Systeme: Non-uniformity Korrekturen	229

5.3	Lichtquellen	229
5.3.1	Temperaturstrahler	230
	a) Schwarzkörperstrahlung	230
	b) Reale Temperaturstrahler und Emissionsgrad	231
	c) Glüh- und Halogenlampen	231
5.3.2	Entladungsbasierte Lichtquellen	234
	a) Gasentladungslampen	234
	b) Spektrallampen	234
	c) Leuchtstofflampen	235
	d) Hoch- und Höchstdrucklampen	235
5.3.3	Leuchtdioden	237
	a) Prinzip	237
	b) Aufbau	237
	c) Materialien	238
	d) LEDs für weißes Licht	239
	e) Temperaturabhängige Emission	240
5.3.4	Laser	240
	a) Prinzip und Eigenschaften	240
	b) Aufbau und Unterteilung	241
	c) Beispiel Helium-Neon-Laser: Polarisierung, longitudinale Moden und Linienbreiten	243
	d) Beispiel Halbleiterlaser	245
	e) Beispiel grüner Laserpointer	247
5.3.5	Laserstrahlen und Augensicherheit	249
	a) Laserklassen	249
	b) Abschätzung typischer Bestrahlungsstärken von Sonne und Lasern	250
	Verständnisfragen und Übungsaufgaben	251
	Literatur	251
6	Visuelle Wahrnehmung	255
6.1	Einleitung	256
6.1.1	Quantitative Wahrnehmung mit dem Auge	258
6.1.2	Additive Farbmischung	259
6.1.3	Lichtdetektion im Auge	261
6.2	Subjektive Helligkeitswahrnehmung: von der Radiometrie zur Fotometrie	262
6.2.1	Einleitung	262
6.2.2	Begriffe und Einheiten der Radiometrie	264
6.2.3	Lambertstrahler	266
6.2.4	Entfernungsgesetz	267
6.2.5	Radiometrisches Grundgesetz: Strahlungstransport von einer Quelle zu einem Empfänger	267
6.2.6	Radiometrie bei Sonne und Mond	267
	a) Sonne	267
	b) Mond	268
6.2.7	Begriffe und Einheiten der Fotometrie	268
6.2.8	Helligkeit und Leuchtdichte	269
6.2.9	Leuchtdichte, Lichtstrom und Beleuchtungsstärke in Natur und Umwelt	270
6.2.10	Lichtausbeute und Effizienz von Lichtquellen	271
6.3	Quantitative Beschreibung von Farbe: Farbmetriken	273
6.3.1	Empfindlichkeitskurven der Sehzellen	273
6.3.2	Farbmischung: Normspektralwerte, Spektrallinienzug und CIE1932 Farbdigramm	274

6.3.3	Praktische Berechnung von Farborten mithilfe der Normspektralwertkurven	277
6.3.4	Besonderheiten des Farbdiagramms und empfindungsgemäße Farbsysteme	279
6.3.5	Farbwiedergabeindex	281
6.3.6	Farbsysteme in der Praxis für digitale Bildverarbeitung und Farbdruck	281
6.4	Entstehung von Farben in Technik und Natur	282
6.4.1	Einleitung	282
6.4.2	Vergleich von additiver und idealer subtraktiver Mischung	283
6.4.3	Reale Kombination von additiver und subtraktiver Mischung in der Umwelt	284
	Verständnisfragen und Übungsaufgaben	287
	Literatur	289
7	Licht und die Atmosphäre der Erde	291
7.1	Bestandteile der Atmosphäre	291
7.1.1	Gasförmige Bestandteile der Atmosphäre	291
	a) Trockene Luft	291
	b) Wasserdampf	292
	c) Ozonschicht und geladene Teilchen	293
7.1.2	Wassertropfen	295
	a) Entstehung und typische Größen	295
	b) Tropfenformen	298
	c) Fallgeschwindigkeiten	298
7.1.3	Eiskristalle	299
	a) Entstehung	299
	b) Formen und Größen	300
	c) Orientierungen und Fallgeschwindigkeiten	301
7.1.4	Aerosole	302
	a) Ursprung	303
	b) Größenverteilungen und Verweildauern	303
7.2	Der vertikale Aufbau der Atmosphäre	304
7.3	Physikalische Prozesse des Lichts mit den Bestandteilen der Atmosphäre	305
7.4	Klassifikation der Phänomene atmosphärischer Optik	305
7.4.1	Einteilung nach theoretischen Modellen	306
7.4.2	Einteilung nach Bestandteilen der Atmosphäre	306
7.4.3	Praktische Einteilung nach Phänomenen	307
	Literatur	307
8	Luftspiegelungen: Oasen, Seeungeheuer und weitere Spielereien der Fata Morgana	309
8.1	Luftspiegelungen in Kultur und Gesellschaft	310
8.2	Die astronomische Refraktion und Flimmern der Sterne	311
8.3	Verwandte Wahrnehmungstäuschungen	315
	8.3.1 Abplattung des Himmelsgewölbes	315
	8.3.2 Mondillusion	315
8.4	Luftspiegelungen: Qualitative Beschreibung und Beobachtungen	317
8.4.1	Untere Luftspiegelungen	317
	a) qualitative Erklärung	317
	b) Beobachtungen	319
8.4.2	Obere Spiegelungen	321
	a) Qualitative Erklärung	321
	b) Beobachtungen	322

8.5	Quantitative Beschreibung von Luftspiegelungen	325
8.5.1	Brechungsindexverlauf in der Atmosphäre	325
8.5.2	Geradlinige und gekrümmte Lichtstrahlen in der Atmosphäre	326
8.5.3	Ducts: Lichtleiter in der Atmosphäre	329
8.5.4	Strahlverfolgungsmethoden: ein ausgewähltes Ergebnis	331
8.6	Simulationsexperimente von Luftspiegelungen	332
8.6.1	Sichtbarmachung der Luftunruhe	332
8.6.2	Untere Spiegelungen	334
8.6.3	Obere Spiegelungen	334
	Literatur	337
9	Regenbögen	341
9.1	Bemerkungen zur Kulturgeschichte des Regenbogens	342
9.1.1	Regenbogen im Christentum	342
	a) Friedenszeichen	342
	b) Das Jüngste Gericht	343
	c) Symbol der Verherrlichung	343
9.1.2	Das Brückensymbol	343
9.1.3	Das Glückszeichen	344
9.1.4	Der Unglücksbote, Unglücksbringer	344
9.1.5	Darstellungen in der Kunst	345
9.1.6	Regenbogensymbole im 20. Jahrhundert	345
9.2	Beobachtungen zum Regenbogen	346
9.3	Einfache Erklärung des Regenbogens mithilfe der geometrischen Optik	350
9.3.1	Regentropfen	350
9.3.2	Der primäre Regenbogen	352
	a) Leuchterscheinung beim Regenbogenwinkel	352
	b) Die Farben des Regenbogens und räumliche Ausdehnung	355
	c) Andauerndes Wechselspiel	356
9.3.3	Der sekundäre und höhere Regenbögen	356
9.4	Besonderheiten bei Regenbögen durch die Wellennatur des Lichts	359
9.4.1	Polarisation des Regenbogens	359
9.4.2	Überzählige Bögen und Farben im Regenbogen	360
9.4.3	Weißer Nebelbögen	363
9.4.4	Vollständige Beschreibung mithilfe der Elektrodynamik: Mie-Theorie	363
9.4.5	Weitere Besonderheiten	365
9.5	Einfache Experimente	367
9.5.1	Experimente mit weißem Licht	367
	a) Wassertropfen aus dem Gartenschlauch	367
	b) „Regenbogen“ von einer großen Glaskugel	367
	c) Minimalablenkung an der Glaskugel im Experiment	368
	d) „Regenbogen“ von einem einzelnen Wassertropfen	369
	e) Polarisation des Regenbogens	369
9.5.2	Experimente mit einfarbigem Licht	369
	a) Demonstration der Airy-Ringe bei einfarbiger Beleuchtung	369
	b) Ausmessung der Winkelverteilungen der Ringsysteme	370
	c) Lichtwege im „Tropfen“ und höhere Regenbögen	371
	d) Regenbögen anderer Flüssigkeiten und weitere Experimente	371
9.6	Übersicht über die Wissenschaftsgeschichte des Regenbogens	372
	Literatur	375

10 Koronen, Glorien und verwandte Erscheinungen	379
10.1 Vorbemerkungen	380
10.2 Koronen	380
10.2.1 Beschreibung des Phänomens	380
10.2.2 Koronaerscheinungen in der Kultur und die Bezeichnungsweise von Koronen	382
10.2.3 Grundlegende Erklärung der Korona	382
a) Qualitative Erklärung durch Beugung	383
b) Beugung von Licht an kreisförmigen Hindernissen	383
c) Entstehen des Phänomens in der Natur	384
10.2.4 Details der Erklärung von Koronen	385
a) Entstehen farbiger Ringe	385
b) Öffnungswinkel der Ringe und Tropfengröße	385
c) Vergleich der Beugungstheorie mit Mie-Theorie	387
d) Breite der Tropfengrößenverteilung	387
e) Tropfengrößenbereich für Entstehen von Koronen	389
10.2.5 Koronen ohne Wassertropfen	389
a) Beobachtungen an Wolken mit Eiskristallen	389
b) Pollenkoronen	390
10.2.6 Irisierende Wolken	392
10.2.7 Bishop'scher Ring	392
10.2.8 Einfache Experimente	395
a) 2-dimensionale einzelne Kreisblende	395
b) 2-dimensionale statistische Verteilung vieler Kreisblenden	395
c) 2-dimensionale Verteilung Blenden mit pollenähnlicher Geometrie	396
d) 3-dimensionale Proben: Bärlappsporen	397
e) Beschlagene Scheiben	398
10.3 Das Brockengespenst und weitere Glorienerscheinungen	399
10.3.1 Beschreibung des Phänomens	399
10.3.2 Inspiration eines Nobelpreises	401
10.3.3 Grundlegende Erklärung der Glorien	402
a) Glorie als Beugungsphänomen: Die Hypothese von Van de Hulst	402
b) Probleme der Interpretation durch die Beugungstheorie	403
c) Bestätigung der Erklärung durch die Mie-Theorie	405
d) Ausgewählte Ergebnisse der Mie Theorie	406
10.3.4 Details der Erklärung von Glorien	406
a) Farbe der Ringe	406
b) Öffnungswinkel der Ringe und Tropfengröße	406
c) Breite der Tropfengrößenverteilung	408
d) Polarisierung	409
e) Glorien an Eiskristallen	409
10.3.5 Beobachtung von Glorien	409
a) Erdgebundene Beobachtungen	409
b) Beobachtungen aus dem Weltraum	410
10.3.6 Einfache Experimente	410
a) Nachweis leuchtender Kreisringe in Rückwärtsrichtung	410
b) Beugungsexperimente	411
c) Künstliche farbige Glorienbeobachtungen	412
Literatur	413

11 Haloerscheinungen am Himmel: Natürliche Ursache oder göttliche	
Warnung?	417
11.1 Mythen und Aberglauben	418
11.2 Beschreibung typischer Beobachtungen	419
11.3 Eiskristalle in der Atmosphäre	421
11.3.1 Geometrien	421
11.3.2 Orientierungen	421
11.4 Haloerscheinungen durch Lichtbrechung in Eiskristallen	422
11.4.1 Lichtablenkung durch zweimalige Brechung in Eiskristallen	422
11.4.2 Nebensonnen	423
a) Sonne am Horizont (Sonnenhöhe 0°)	423
b) Sonne am Himmel (Sonnenhöhe $> 0^\circ$)	426
11.4.3 Ringhalos	427
a) 22° -Ringe	427
b) 46° -Ringe	429
c) Gibt es auch Nebensonnen zum 46° -Halo?	429
11.4.4 Zirkumzenital- und Zirkumhorizontalbogen	430
11.4.5 Umschriebener Halo und Berührungsbögen	433
11.5 Haloerscheinungen durch Reflexionen an Eiskristallen	433
11.5.1 Horizontalkreis	433
11.5.2 120° -Nebensonnen	434
11.5.3 Untersonnen und Sonnensäulen	435
11.6 Haloerscheinungen durch Kombinationen von Brechung und Reflexion	438
11.7 Überblick über in mittleren Breiten häufig beobachtbare Haloerscheinungen	439
11.8 Seltene oder komplexe Haloerscheinungen und Himmelsarchäologie	440
11.9 Computersimulationen	443
11.10 Experimente	444
11.10.1 Drehbares Glasprisma: Bestimmung des Minimalwinkels	445
11.10.2 Rotierendes Glasprisma: Nebensonnen und Horizontalkreis	445
11.10.3 Rotierendes Hexagon: Nebensonnen, Horizontalkreis, Untersonne und Unternebensonnen	446
11.10.4 Demonstration des oberen Berührungsbogens	447
11.10.5 Demonstrationen von Ringhalos	448
Literatur	449
12 Lichtstreuung und Himmelsfarben	453
12.1 Eigenschaften des Himmels für eine molekulare Atmosphäre	454
12.1.1 Geschichtliches	454
12.1.2 Rayleigh-Streuung und Blauer Himmel	455
a) Farbabhängigkeit der Rayleigh-Streuung: das Blau des klaren Himmels	456
b) Polarisation des Himmelslichts	457
c) Schwächung des Lichts durch die Atmosphäre: die optische Dicke	460
d) Schwächung des Lichts als Funktion der Zenitdistanz: Air-Mass	463
e) Weißer Horizont und Helligkeiten des Himmels bei Rayleigh-Streuung	464
f) Blaue Berge	466
g) Welche Farbe hat der Nachthimmel?	468
12.2 Himmelsfarben realer Atmosphären: von Pastellfarben und glutrotem Himmel	468
12.2.1 Kultur und Geschichte	469
12.2.2 Ergebnisse der Mie-Streuung erläutert an Beispielen	470
a) Farbabhängigkeit der Mie-Streuung: blaue Sonne, blauer Mond	470

	b) Teilchengrößenabhängigkeit bei der Mie-Streuung: durch Regen sehen	473
	c) Schwächung des Lichts durch Mie-Streuung: undurchsichtige Wolken	474
	d) Winkelabhängigkeit bei Mie-Streuung: der Staub im Zimmer	474
	e) Polarisierung bei Mie-Streuung: der tägliche Regenbogen in den Wolken	475
12.2.3	Übliche Farben von Sonne/Mond	476
	a) Farben bei klarer Atmosphäre: Rayleigh-Streuung	476
	b) Farben bei zusätzlicher Streuung an Aerosolen	479
12.2.4	Helligkeit und Farben der Atmosphäre	480
	a) Beleuchtungsstärke durch den Himmel	481
	b) Modell zum Verständnis der Farberscheinungen	481
	c) Entstehung der Farben in Horizontnähe bei reiner Rayleigh-Streuung	482
	d) Zusätzliche Streuung an Aerosolen	483
	e) Das Purpurlicht	485
	f) Himmelfarben bei Dämmerung in Zenitnähe	486
	g) Himmelfarben als Funktion der Winkeldistanz zur Sonne	489
12.2.5	Wolkenfarben	490
	a) Weiße Wolken	490
	b) farbige Wolken	492
12.2.6	Farbige Wasserreflexionen bei tief stehender Sonne	492
12.2.7	Computersimulationen der optischen Transmission der Atmosphäre	493
12.3	Experimente	494
	12.3.1 Abschätzung der Dicke der Atmosphäre	494
	12.3.2 Demonstrationsexperimente zu Rayleigh- und Mie-Streuung	495
	a) Reine Gase und Luft	495
	b) Blauer und weißer Rauch	497
	c) Flüssigkeiten	498
	d) Teilchen definierter Größe.	499
	e) Teilchenwachstum bei chemischen Reaktionen	500
	Literatur	502
13	Weitere Phänomene aufgrund von Lichtstreuung	505
13.1	Sichtweiten	506
	13.1.1 Geometrische Sichtweiten	506
	13.1.2 Erhöhung der Sichtweite durch Refraktion	507
	13.1.3 Sinnesphysiologie und Wahrnehmung	508
	13.1.4 Einfluss der Lichtstreuung in der Atmosphäre auf den Kontrast	509
	a) Rayleighstreuung an Luftmolekülen	509
	b) Absorption von Ozon und Stickoxiden	511
	c) Zusätzliche Streuung an Wassertropfen: kurze Sichtweiten	511
	d) Absorption und Streuung durch Aerosole	514
	e) Fernsicht jenseits geometrischer Grenzen bis 250 km	514
	f) Fernsicht jenseits 400 km: Kriterien und Beobachtungen.	518
	13.1.5 Erhöhung von Kontrast und Sichtweite im Infrarot	519
	13.1.6 Einfache Laborexperimente zu Sichtweiten	521
13.2	Beobachtbarkeit atmosphärischer Phänomene: Beispiel Halos und Regenbögen	522
13.3	Farben des Wassers	523
	13.3.1 Klares kaltes blaues Wasser	524
	13.3.2 Klares heißes farbiges Wasser	526

13.3.3	Wasserfarben und Sichtweiten bei Anwesenheit zusätzlicher Inhaltsstoffe	527
13.3.4	Bestimmung von Sichttiefen in Gewässern: Secchi-Scheiben	529
13.3.5	Von blauem Wasser zu blauem Eis	529
13.4	Das grüne Leuchten	530
13.4.1	Refraktion: die Atmosphäre als Prisma	531
13.4.2	Einfluss der Streuung und Winkelauflösung des Phänomens	532
13.4.3	Die Notwendigkeit von Luftspiegelungen	533
13.4.4	Physiologische Effekte	534
13.4.5	Grüne Säume bei Planetenbeobachtungen	534
13.5	Rückstreuung von rauen Oberflächen: Heiligenschein und <i>Opposition Effect</i>	535
13.6	Licht- und Schattenstrahlen in der Atmosphäre	537
13.6.1	Schatten durch Berge, Wolken und Bäume	537
13.6.2	Schattenstrahlen im Experiment	540
13.6.3	Das Rätsel des Spaceshuttle	541
	Literatur	542
14	Bis in die Stratosphäre und darüber hinaus	545
14.1	Blitze: Entladungen in der Atmosphäre und <i>air glow</i>	546
14.2	Polare stratosphärische Wolken und leuchtende Nachtwolken	551
14.3	Polarlichter	553
14.4	Kometen, Meteore und künstliche Himmelskörper	557
14.4.1	Kometen	557
14.4.2	Meteore	560
14.4.3	Beobachtung künstlicher Himmelskörper: ISS und Satelliten	562
14.5	Finsternisse im Sonnensystem	563
14.5.1	Definition von Finsternis und Transit	563
14.5.2	Ursachen von Sonnen- und Mondfinsternissen	564
14.5.3	Beobachtungen während totaler Sonnenfinsternisse	567
14.5.4	Farbe und Licht bei Mondfinsternissen	572
14.5.5	Transits	575
	a) Merkur und Venus vor der Sonne	576
	b) Monde vor dem Saturn	577
	c) Transits und Raumsonden	577
	d) Transits von Exoplaneten	577
14.5.6	Totale Sonnenfinsternisse bis 2045	578
14.5.7	Mondfinsternisse bis 2040	581
14.6	Wie viele Sterne sind für das Auge sichtbar?	582
14.6.1	Transmission der vertikalen Atmosphäre	582
14.6.2	Nachtsicht	582
14.6.3	Sternbeobachtungen mit dem Auge	582
14.6.4	Sichtweiten ins Weltall mit dem bloßen Auge	585
14.6.5	Lichtverschmutzung	586
14.6.6	Sternbeobachtungen durch interstellare Wolken und Nebel im nahen Infrarot	586
14.7	Wahrgenommene Farbe von Planeten, Monden und Sternen	587
14.7.1	Farbe von Planeten und Monden	588
	a) Gesteinsplaneten und Monde ohne Atmosphäre	588
	b) Gesteinsplaneten und Monde mit wenig Atmosphäre	588
	c) terrestrische Planeten und Monde mit Atmosphäre	589
	d) Gasplaneten	589
14.7.2	Farbe von Sternen	590

14.8	Warum ist es nachts überhaupt dunkel?	591
14.8.1	Warum es nachts taghell sein sollte!	592
14.8.2	Warum es nachts dunkel ist!	594
	a) Absorption durch Gas- und Staubwolken	594
	b) Nicht ausreichende, endliche Zahl von Sternen	594
14.8.3	Gravitationslinsen	596
	Epilog	599
	Literatur	599
	Stichwortverzeichnis	603