Unterrichtsmaterialien zu:

Michael Barth: Mit Geschichte über Erkenntnisprozesse lernen.

Urteilen und Einschätzen im historischen Kontext.

In: NiU Physik 24 (2013), Heft 134, S. 44–48.

Auf den folgenden Seiten finden sie die Texte A–L, auf die sich die Aussagen im Artikel beziehen. Außerdem sind jeweils zusätzliche Informationen ergänzt, die die Einordnung und Nutzung im Unterricht erleichtern sollen.

Darüber hinaus finden Sie Klausuraufgaben, die während oder nach entsprechenden Unterrichtseinheiten gestellt wurden. Sie wurden in anderen Kursen auch als Lernaufgaben genutzt.

Den Originalartikel „Brechungsgesetz/Lichtmodell“ aus Praxis der Naturwissenschaften Physik 41 (2009), Heft 8 finden sie unter: http://www.nibis.de/~sts-hi/seminare-fach/phys/documents/BarthUnterrichtseinheitBrechungsgesetzLichtmodell.pdf bzw. #.doc.

Die Texte A–L sind ergänzt, nicht aber die Klausuraufgaben. In der doc-Datei ist der Artikeltext mit den Texten A–L im Anhang verlinkt.

Gerne erhalte ich Rückmeldungen und Kritik zur Nutzung von Zugang, Texten und Aufgaben.
Michael Barth Mi.Barth@t-online.de

Übersicht über die Materialien

Hinweis des Verlages: Alle Texte und Materialien sind im Folgenden ohne weitere redaktionelle Bearbeitung genau so wiedergegeben, wie sie vom Autor im Unterricht eingesetzt wurden.

<u>Informationen zu </u>Text A: *Renè Descartes, La Dioptrique*, Leiden 1637
<u>Informationen zu </u>Text B: *René Descartes,* La Dioptrique, Leiden 1637

In diesem Text stellt Descartes sein Lichtmodell vor, im folgenden Text B leitet er daraus das Brechungsgesetz her. Es ist sein Ziel, dem Leser zu zeigen, dass seine rationale Philosophie fruchtbar ist: Ausgehend von unzweifelhaften Grundannahmen wird Erkenntnis (hier das bis dato nicht bekannte Brechungsgesetz) durch rein rational logisches Argumentieren und ohne experimentell-empirische Methoden gewonnen, ein wesentliches Hilfsmittel ist dafür die Mathematik.

Diese seine rationale Methode stellt Descartes im „Discours de la méthode“ von 1637 vor, der Anhang „Dioptrique“ ist einer der drei Schriften (neben „Les Météores“ und „La Géométrie“), an denen er die Wirksamkeit seiner neuen Methode vorführen will. Er lebte zu dieser Zeit bereits in den politisch und religiös toleranten Niederlanden.

Descartes (1596-1650) rationale Philosophie steht im Gegensatz zur empirisch fundierten Philosophie von Francis Bacon (1561-1626) Auch wenn dieser Gegensatz tatsächlich nicht ganz so hart ist, wie bisweilen herausgestellt, stellen die beiden Zugänge doch zwei deutlich unterschiedliche naturwissenschaftliche Herangehensweisen dar, die im Laufe des 17.Jahrhunderts die (bereits modifizierte) Aristotelischen Naturwissenschaften ablösen. Dabei prägt der Descartessche Zugang eher die kontinentalen Naturwissenschaften, vor allem in Frankreich, der Baconische eher die britischen Naturwissenschaften. Eine Synthese bildete sich dann im 19.Jahrhundert heraus.

Das Brechungsgesetz wurde bereit vor Descartes empirisch aufgefunden (Harriott ca. 1601, Snellius ca. 1618), die Ergebnisse lagen allerdings nur in Manuskripten vor, waren aber diversen Wissenschaftlern bekannt. Ob Descartes diese Manuskripte kannte, ist nicht klar.

Die Suche nach einem Gesetz für die Brechung wurde nach Einführung des Fernrohrs zu Beginn des 17.Jahrhunderst immer wichtiger, da es Voraussetzung für die Konstruktion von Linsen war, die einen präzisen Brennpunkt aufwiesen und damit die Unschärfe in Fernrohrabbildungen verhinderten. So entwickelte Kepler mit diesem Ziel nicht nur die geometrische Optik, sondern suchte auch nach dem Brechungsgesetz; er blieb aber erfolglos, weil er historische empirische Messwerte verwendete, die für große Einfallswinkel zu ungenau waren (vergl. auch die Aufweitung des Lichtstrahls in heutigen Experimente). Descartes folgerte aus seinem Brechungsgesetzte, dass die Linsenfläche für präzise Brennpunkte ellipsoidisch oder hyperboloidisch sein musste (anaklastische Fläche), was aber die zeitgenössischen Schleifmethoden überforderte. Man war daher für scharfe Bilder noch lange danach auf enge Fernrohrblenden angewiesen, mit entsprechend lichtschwachen Bildern. Dies und die chromatischen Fehler bewogen Newton später, ein Spiegelteleskop zu konstruieren.

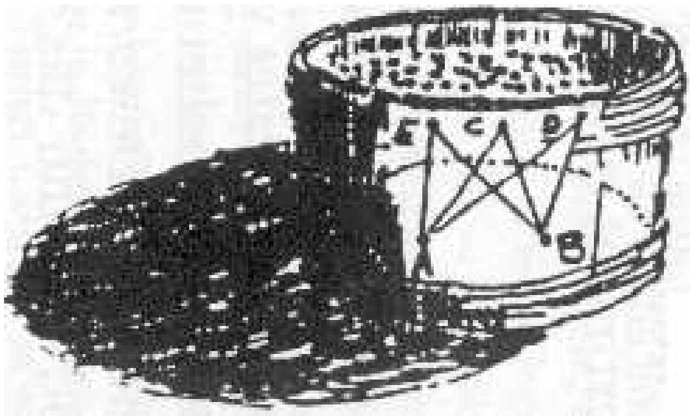
Descartes Argumentation mit Verhältnissen von Streckenlängen ist zeittypisch, auch für Geschwindigkeiten etc.: Das Aufstellen von Quotienten oder Produkten aus Größen unterschiedlicher Art (z.B Weg und Zeit) wurde als sinnlos angesehen, da man derartige Größen nicht dividieren oder multipliziueren kann, diese Operatione machen nnur Sinn für gleichartigen Größen etwa bei Flächenberechungen. Auchin Text F wird dieses Vorgehensweise erkennbar.

Text A: *Renè Descartes, La Dioptrique*, Leiden 1637
(Übersetzung G.Leisegang: Descartes Dioptrik, Meisenheim/Glan 1954)

AUFGABENSTELLUNG AUF SEITE 3 AM ENDE DES TEXTES

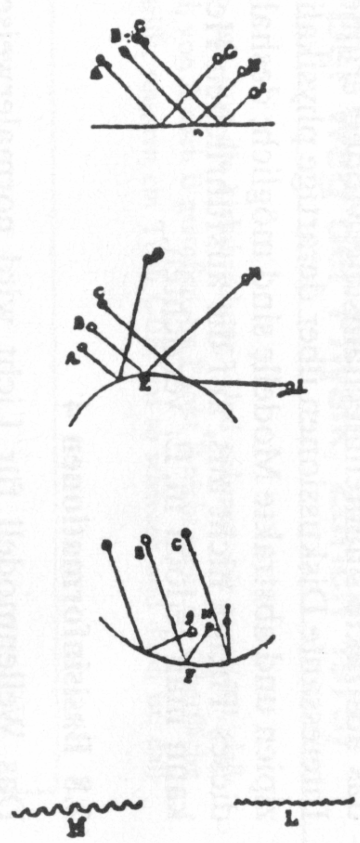
Da ich nun hier keine andere Veranlassung habe. vom Licht zu sprechen, als nur die, zu erklären, wie seine Strahlen in das Auge eintreten und wie sie durch die verschiedenen Körper, denen sie begegnen, abgelenkt werden, brauche ich nicht auf die wahre Natur den Lichtes einzugehen, und ich 1
glaube, dass es genügt, wenn ich mich zweier oder dreier Vergleiche bediene, die dazu verhelfen, sie so zu verstehen, wie es mir am bequemsten erscheint, um von allen Eigenschaften des Lichten die zu erklären, die uns das Experiment erkennen lässt. Daraus sollen dann alle die anderen Eigenschaften abgeleitet werden, die nicht so leicht zu beobachten sind. Ich gehe dabei so vor, wie die Astronomen. Wenn auch ihre Annahmen (über die Natur der Sterne) fast alle falsch oder unsicher sind, so gestatten sie es doch jedenfalls da, wo sie sich auf einzelne Beobachtungen beziehen, die sie gemacht haben, aus diesen eine Anzahl von ganz richtigen und sicheren Schlüssen zu ziehen.

Es ist Ihnen sicher schon einmal vorgekommen, dass Sie nachts ohne Licht durch ein schwieriges Gelände gingen und sich dabei eines Stockes zur Führung bedienten. Sie konnten dann bemerken, dass sie durch die Vermittlung des Stockes die einzelnen Gegenstände ihrer Umgebung fühlen konnten. Sie waren sogar imstande, zu unterscheiden, ob Sie Baum oder Stein, Sand oder Wasser, Gras oder Schmutz oder sonst etwas Ähnliches vor sich hatten. Dieses Gefühl ist allerdings für den, der keine Übung darin hat, ein wenig wirr und undeutlich. Doch beobachten Sie einmal Menschen, die von Geburt an blind sind. Sie bedienen sich des Stockes ihr ganzes Leben lang und man kann beobachten wie vollkommen und genau sie, man könnte geradezu sagen 'mit den Händen sehen'. Der Stock ist ihnen in Ermanglung des Gesichtes geradezu ein sechster Sinn geworden. Hier wollen wir nun einen Vergleich ziehen. Denken Sie sich, das Licht eines leuchtenden Körpers sei nichts anderes als eine gewisse Bewegung oder eine sehr schnelle und lebhafte Regung, die unser Auge durch die Vermittlung der Luft und anderen durchsichtiger Körper ebenso erreicht, wie Bewegung oder Verharren der Körper dem Blinden durch die Vermittlung den Stocken bekannt werden. Dadurch wird es Ihnen sofort nicht mehr merkwürdig erscheinen, dass das Licht seine Strahlen in einem Augenblick von der Sonne zur Erde ausbreiten kann. Denn Sie wissen, dass die Bewegung, in die man das eine Ende des Stockes versetzt, in einem Augenblick auf das andere Ende übertragen wird, selbst wenn ein so großer Abstand wie der von der Erde zum Himmel dazwischen ist. Es wird Ihnen ebenfalls nicht mehr seltsam erscheinen, dass wir hierdurch alle Arten von Farben sehen 2
können. Sie können es sich vielleicht vorstellen. dass die Farben der bunten Körper nichts anderen sind als die verschiedenen Arten, auf die die Körper das Licht empfangen und in unser Auge zurückstrahlen. Wenn Sie erwägen, dass dem Blinden die Unterschiede, die er zwischen Baum, Stein, Wasser und ähnlichen Dingen mittels seines Stockes bemerkt, nicht geringer erscheinen als uns die Unterschiede zwischen rot, gelb. grün und allen anderen Farben. [.1.]. Daraus lässt sich schließen, dass es nicht nötig ist anzunehmen, dass irgendetwas Materielles von den Gegenstände in sein Auge kommt, um uns Farbe und Licht sehen zu lassen. Ja es braucht an den Gegenständen nichts zu geben, was unseren Vorstellungen oder Wahrnehmungen, die wir von ihnen haben, ähnlich ist. Es geht ja auch nichts von den Körpern aus, die der Blinde mit Hilfe seinen Stockes fühlt.[.2.] Sie können jetzt leicht die von ihnen erörterte Frage entscheiden, von wo die Bewegung ausgeht, die die Gesichtsempfindung hervorruft. Unser Blinder fühlt die Körper, die ihn umgeben, nicht nur durch die Bewegung der Körper selbst, wenn sie sich vor dem Stock bewegen, sondern auch durch die Bewegung der Hand, wenn die Körper dem Stock widerstehen. So muss man annehmen, dass die vom Auge wahrgenommenen Gegenstände nicht nur durch ihre eigene Bewegung zum Auge hin, sondern auch durch die von den Augen ausgehende und sich auf sie richtende Bewegung wahrgenommen werden können. Auch diese ist nichts anderes als das Licht. Jedoch muss man dazu bemerken, dass sie nur bei solchen Augen existieren, die während der Dunkelheit sehen können, wie die der Katzen. Der Mensch dagegen ist für gewöhnlich nur fähig, durch die Bewegung zu sehen, die von den Gegenständen ausgeht, denn die Erfahrung zeigt uns, dass die Gegenstände und nicht unsere Augen leuchtend oder beleuchtet sein müssen, um von uns gesehen zu werden.



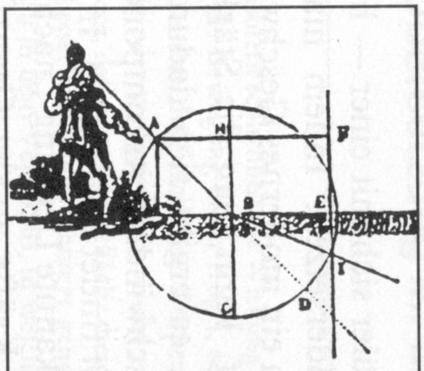
Da aber doch ein zu grosser Unterschied zwischen dem Stock des Blinden und der Luft oder anderen durchsichtigen Körpern besteht, durch deren Vermittlung wir sehen, muss ich mich jetzt eines anderen Vergleichen bedienen. Stellen Sie sich eine Kufe zur Zeit der Weinlese vor, die völlig mit halb zertretenen Trauben angefüllt Ist (Bild 1). In ihrem Boden befinden sich ein oder zwei Löcher A und B, durch die der Most ausfliessen kam. Bedenken Sie, was von fast allen Philosophen bestätigt wird, dass es nichts Leeres In der Natur gibt. Trotzdem haben sämtliche Körper unserer Umgebung viele Poren, wie es das Experiment zeigt. Diese Poren müssen mit einer feinen dünnflüssigen Materie angefüllt sein, die sich ohne Lücken von den Sternen bis zu uns ausbreitet. Dieser feine Stoff kann mit dem Wein in der Kufe verglichen werden, und die grösseren weniger feinen Teile wie die Luft und andere durchsichtige Körper entsprechen den Trauben, die dazwischen liegen. Sie werden verstehen, dass die Teile des Weines, die sich zum Beispiel bei C
befinden, das Bestreben haben, auf einer Geraden zum Loch A oder B hinabzufliessen, sobald diese 3
geöffnet sind. Die Teile des Weines die sich bei E und D befinden, streben zur gleichen Zeit ebenfalls danach, durch diese beiden Löcher auszufliessen ohne dass eine dieser Bewegungen durch die andere oder durch den Widerstand der Trauben, die sich in der Kufe befinden, gestört wird. Abgesehen davon, dass die Beeren eine durch die andere gehalten werden, bemühen sie sich durchaus nicht, nach den Löchern A und B hinabzusinken wie der Wein, selbst dann nicht, wenn sie dabei auf verschiedene andere Arten durch die, die sie treten, bewegt werden. So streben alle Teilchen der feinen Materie, die mit der Seite der Sonne in Verbindung stehen, die uns zugekehrt ist, auf einer Geraden nach unserem Auge, sobald es geöffnet ist, ohne sich gegenseitig zu hindern und auch ohne durch die grossen Teile der durchsichtigen Körper gehindert zu werden, die sich dazwischen befinden. [.3.] Dabei muss man zwischen der Bewegung und der Regung oder Neigung zu Bewegung unterscheiden. Denn es lässt sich verstehen, dass die Teile des Weines, die sich bei C befinden, sowohl nach A wie nach B streben, obgleich sie sich zu gleichen Zeit nicht nach zwei verschiedenen Seiten bewegen können, und dass sie danach streben, sich genau auf einer Geraden nach A und B zu bewegen, obgleich sie sich nicht so genau auf einer Geraden bewegen können, weil die Beeren der Weintrauben sich dazwischen befinden. Bedenken Sie nun, dass es nicht so sehr die Bewegung der leuchtenden Körper ist, als vielmehr die Tendenz zur Bewegung, die man als ihr Licht betrachten muss, so können Sie sich denken, dass die Strahlen dieses Lichtes nichts anderen sind, als die Richtung dieser Tendenz. [.4.] Die Lichtstrahlen muss man sich immer so lange genau gradlinig denken, wie sie durch einen einzigen durchsichtigen Körper hindurch gehen, der in sich völlig homogen ist. Wenn sie jedoch einem anderen Körper begegnen, werden sie abgelenkt oder absorbiert, genau so wie die Bewegung eines Balles oder Steines, wenn er in die Luft geworfen wird, von den Körpern beeinflusst wird, denen er begegnet. Denn es liegt nahe anzunehmen, dass die Regung oder Neigung zu Bewegung von der ich sagte, dass man sich unter ihr das Licht zu denken habe, hierbei denselben Gesetzen folgen muss wie die Bewegung selbst.

Bevor ich diesen dritten Vergleich näher erläutere bedenken Sie: Die Körper, denen ein Ball begegnen kam, wenn er durch die Luft fliegt, sind entweder hart oder weich oder flüssig. Sind die Körper weich, so halten sie seine Bewegung an oder vernichten sie ganz Das ist der Fall. wenn ihn gegen ein Tuch, in den Sand oder Schlamm wirft. Sind die Körper dagegen hart, so werfen sie den Ball nach einer anderen Richtung zurück, ohne ihn anzuhalten. Das kann auf mehrere verschiedene Arten vor sich gehen. Die Oberfläche der Körper kam entweder ganz glatt und gleichmassig sein, oder sie ist rauh und ungleichmässig. Ist sie glatt, so ist sie entweder eben oder gekrümmt. Ist die Oberfläche dagegen ungleichmäßig so kann die Ungleichmässigkeit darin bestehen, dass sie sich aus mehreren gekrümmten Flächen zusammensetzt, von denen jede einzelne jedoch glatt ist. Oder aber sie besitzt ausserdem noch verschiedene Kanten und Spitzen oder Teile .[.5.]Treffen nun mehrere Bälle von der gleichen Seite auf einen Körper mit völlig ebener und gleichmässiger Oberfläche, so werden sie auch gleichmässig in derselben Anordnung zurückgeowrfen und behalten nach dem Rückstoss den gleichen Abstand voneinander, den sie vorher hatten. Ist die Fläche jedoch nach innen oder aussen gekrümmt, so nähern oder entfernen sich die Bälle voneinander in der Anordnung, die der Grösse der Krümmung entspricht. Sie sehen hier die Bälle ABC die Oberflächen der Körper DEF treffen. Sie werden noch GHI zurückgeworfen (Bild 2). Treffen die Bälle auf eine ungleichmässige Oberfläche wie L oder M, so werden sie nach verschiedenen Seiten zurückgeworfen Je nach der Lage der Stelle der Oberfläche, die sie gerade treffen [.6.] Bedenken Sie weiterhin: Wenn ein Ball sich schräg zu Oberfläche eines flüssigen Körpers bewegt durch den er mehr oder minder leicht hindurchgehen kam, als durch den, aus dem er gerade kommt, so wird er beim Eindringen in die Flüssigkeit abgelenkt und änderten seine Richtung (Bild 3). Der Ball befinde sich zum Beispiel in der Luft im Punkte A. Man schickt ihn von da nach B, und er fliegt auf einer Geraden bis B, wenn nicht sein Gewicht oder eine andere Ursache ihn daran hindern. Den Punkt B nehme ich auf der Oberfläche den Wassern CBE an. Ist der Ball bis zu ihm gekommen, so wird er abgelenkt und bewegt sich auf einer Geraden nach I.



(Bild 2)

4



(Bild 3)

<u>Aufgabe: (arbeitsteilig in 3 Gruppen)</u>

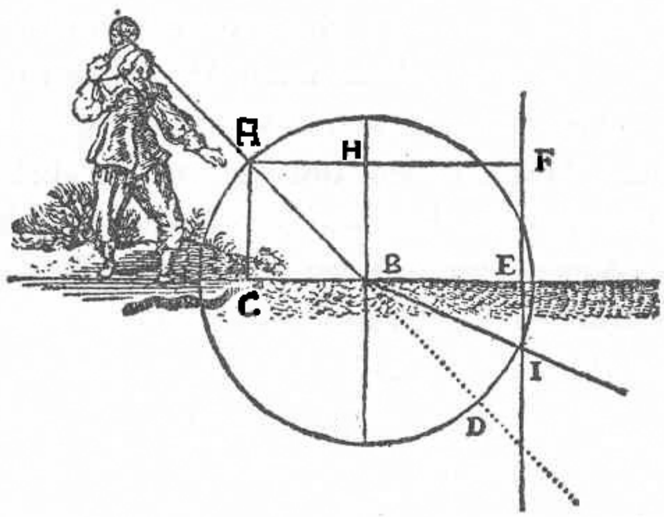
In Text A befasst sich DESCARTES mit den Eigenschaften von Licht, Block 1 ist seine Einleitung, die alle Gruppen erarbeiten sollen. Die drei weiteren Blöcke 2, 3 und 4 erarbeiten wir arbeitsteilig.

Aufgabe ist es, zuerst den Inhalt der Aussagen von DESCARTES in einem Kurzvortrag darzustellen, anschließend sollen Vermutungen über die Gründe angestellt werden, die ihn zu diesen Aussagen über das Licht bewegt haben. Abschließend werden wir diskutieren, ob bzw. inwieweit wir seinen Aussagen zustimmen können oder wollen.

Text B: ***René Descartes,*** **La Dioptrique, Leiden 1637 (Übersetzung M. Moser, aus:** ***Shmuel Sambursky,*** **Der Weg der Physik, Zürich 1975)**

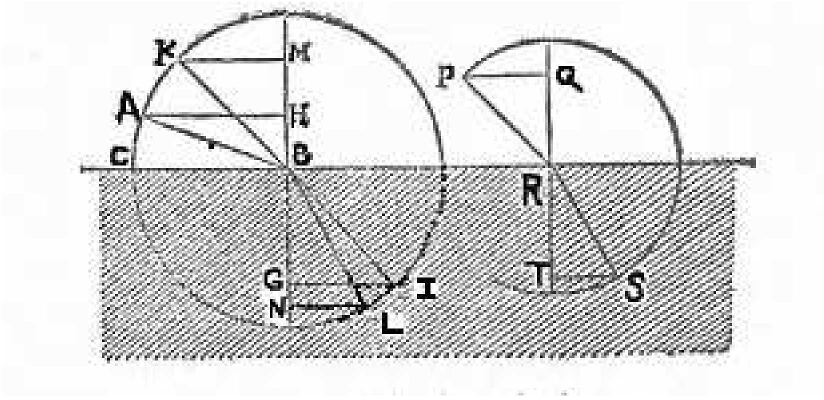
Auslassungen sind durch [.1.] gekennzeichnet   Die schlecht faksimilierten Abbildungen wurden überarbeitet

Betrachten wir nun die Lichtbrechung. Und nehmen wir zuerst an. daß eine Kugel, von A nach B gestoßen, im Punkt B nicht mehr die Oberfläche der Erde trifft, sondern ein Tuch CBE, das so schwach und dünn ist, daß diese Kugel die Kraft hat, es zu zerreißen und ganz hindurch zu dringen, dabei nur einen Teil ihrer Geschwindigkeit verlierend, nämlich, zum Beispiel, die Hälfte. Wenn dies angenommen ist, wollen wir, um zu wissen, welchen Weg sie verfolgen muß, sogleich bedenken, daß ihre Bewegung sich völlig von ihrer Tendenz, sich eher gegen eine Seite als gegen eine andere zu bewegen, unterscheidet, woraus folgt, daß ihre Größe getrennt untersucht werden muß. Und bedenken wir auch, daß von den beiden Teilen, von welchen man sich vorstellen kann, daß diese Tendenz daraus zusammengesetzt ist, mit der, welcher die Kugel von oben nach unten tendieren läßt, in irgend einer Art durch das Auftreffen auf das Tuch geändert werden kann, und daß, was jenen betrifft, der ihn nach rechts tendieren ließ, er immer derselbe bleiben muß. der er gewesen ist, weil dieses Tuch ihm keineswegs in dieser Richtung im Wege steht. Nachdem wir dann vom Mittelpunkt B aus den Kreis AFD beschrieben haben und in rechten Winkeln zu CBE die drei Geraden AC, HB, FE so gezogen haben, daß es zwischen FE und HB einen zweimal so großen Abstand gibt wie zwischen HB und AC, werden wir sehen, daß diese Kugel gegen den Punkt I hin tendieren muß. Denn, da sie die Hälfte ihrer Geschwindigkeit verliert, indem sie durch das Tuch CBE hindurchgeht, muß sie zweimal mehr Zeit brauchen um darunter von Punkt B bis zu irgend einem Punkt des Umfanges des Kreises AFD zu gelangen, als sie es darüber getan hat, um von A nach B zu kommen. Und da sie gar nichts verliert von der Tendenz. die sie hatte, sich gegen die rechte Seite hin fortzubewegen, in zweimal der Zeit, die sie brauchte, um von der Geraden AC bis zu HB zu gelangen, muß sie zweimal mehr Weg in Richtung dieser Seite zurücklegen und folglich irgend einen Punkt der Geraden FE erreichen, in demselben Augenblick da sie auch irgend einen Punkt auf dein Umfang des Kreises AFD erreicht. Was unmöglich wäre, wenn sie nicht in Richtung I ginge, umsomehr, als dies der einzige Punkt unterhalb des Tuches CBE ist, in welchem der Kreis AFD und die Gerade FE sich schneiden. [.1.]



DIESEN TEIL DES TEXTES UNKENNTLICH MACHE ODER ENTFERNEN, WENN DER FEHLER IN DER ZEICHNUNG VON DER LERNGRUPPE ENTDECKT WERDEN SOLL.

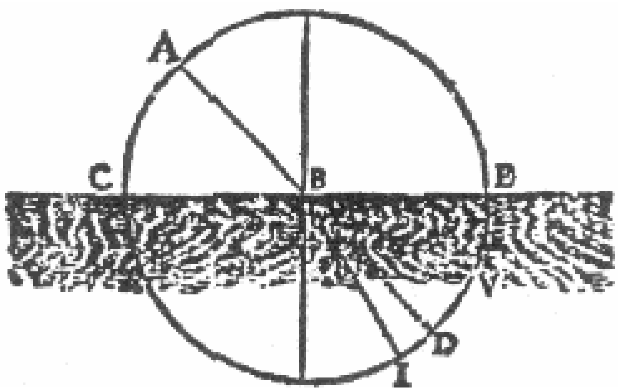
[2.] Und man kann hierbei noch beachten, dass der Ball umso mehr von der Oberfläche des Wassers oder der Leinwand abgelenkt wird, je schräger er auftrifft. Trifft er senkrecht auf, so als wäre er von H nach B geschlagen worden, muss er auf einer Geraden nach G hindurchgehen, ohne irgendwie abgelenkt zu werden. Wird der Ball jedoch auf einer Geraden AB geschlagen, die stark zur Oberfläche des Wassers oder zur Leinwand CBE geneigt ist, schneidet die Gerade FE, wenn man sie ebenso wie früher zieht, den Kreis nicht mehr. Dieser Ball wird die Oberfläche überhaupt nicht mehr durchdringen, sondern er wird im Punkte B In die Luft zurückreflektiert. Diese Erfahrung musste man leider einmal machen als man nur zum Vergnügen Kanonen in der Richtung auf den Grund eines Flusses abfeuerte und dabei die Leute verwundete, die auf der anderen Seite am Ufer stunden.



Insofern schließlich die Wirkung des Lichtes denselben Gesetzen gehorcht wie die Bewegung dieser Kugel, muß man sagen, daß, wenn seine Strahlen von einem durchsichtigen Körper schief auf einen andern fallen, der sie nicht oder weniger leicht als der erste aufnimmt, sie ihre Richtung dort so ändern, daß sie zur Oberfläche dieser Körper immer auf der Seite dessen, der sie besser aufnimmt, weniger geneigt sind als auf der des andern; und das genau in dem Verhältnis, in welchem er sie besser aufnimmt, als es der andere tut. Nur muß man beachten, daß diese Neigung mit der Größe der Geraden wie CB oder AH, und EB oder IG und ähnlichen im Vergleich miteinander, gemessen werden muß; nicht aber mit derjenigen der Winkel, wie ABH oder GBI und noch viel weniger mit der Größe DBI ähnlicher Winkel, die man Brechungswinkel nennt. Denn das Verhältnis oder die Proportion, die zwischen diesen Winkeln besteht, verändert sich mit all den verschiedenen Neigungen der Strahlen, während jenes, das zwischen den Geraden AH und IG oder ähnlichen besteht, dasselbe bleibt bei allen Brechungen, die durch dieselben Körper verursacht werden. Wenn, zum Beispiel, ein Strahl durch die Luft von A nach B geht und, im Punkt B die Oberfläche des Glases CBR treffend, sich in diesem Glas nach I wendet, und ein anderer von K nach B kommend, sich zu L hinwendet und ein anderer von P nach R gehend, sich zu S hinwendet, muß zwischen den Geraden KM und LN, oder PQ und ST das gleiche Verhältnis wie zwischen AH und IG bestehen, was nicht zutrifft für das Verhältnis der Winkel KBM und LBN, oder PRQ und SRT im Vergleich zu ABH und IBG

[.3.]

Vielleicht werden Sie aber, wenn Sie diese Experimente mache, mit Verwunderung feststellen, daß die Lichtstrahlen sich in der Luft mehr als im Wasser zur Oberfläche neigen, auf welcher ihre Brechung stattfindet, und noch mehr im Wasser als im Glas, ganz im Gegensatz zur Kugel, die sich im Wasser mehr neigt als in der Luft und in das Glas schon gar nicht eindringen kann. Denn, wenn es zum Beispiel eine Kugel ist, die in der Luft von A nach B gestoßen, im Punkt B die Wasseroberfläche CBE trifft, wird sie sich von B zu V hinwenden und wenn es ein Strahl ist, wird er ganz im Gegenteil von B nach I gehen. Das werden Sie freilich nicht mehr eigenartig finden, wenn Sie sich an die Natur erinnern, die ich dem Lichte zugeschrieben habe, als ich sagte, es sei nichts als eine bestimmte Bewegung oder eine von einer sehr subtilen Materie aufgenommene Aktivität, die die Poren der andern Körper erfüllt, und wenn Sie bedenken, daß, wie eine Kugel mehr von ihrer Beweglichkeit einbüßt, wenn sie auf einen weichen Körper aufstößt als auf einen harten, und sie weniger leicht auf einem Teppich als auf einem ganz bloßen Tisch rollt, auch die Aktivität dieser subtilen Materie durch die Teile der Luft, die, da sie weich und schlecht verbunden sind ihr nicht viel Widerstand leisten, viel mehr behindert werden kann als durch diejenigen des Wassers, die nicht widerstehen, und schließlich noch mehr durch diejenigen des Wassers als durch diejenigen des Glases oder Kristalls. So daß ein durchsichtiger Körper das Licht umso leichter hindurchdringen läßt als seine kleinen Teile härter und fester sind: denn dieses Licht muß keinen davon von seinem Platz vertreiben, wie eine Kugel die Teilchen des Wassers vertreiben muß, um zwischen ihnen einen Durchgang zu finden.



Informationen zu Text C Huygens Modell und Brechungsgesetz

Teil 1 Formulierung der Huygens Prinzipien
Teil 2 Anwendung der Huygens Prinzipien zur Begründung des Brechungsgesetzes
Teil 3 Herleitung des Brechungsgesetzes

Für einen **Einstieg** in das Huygensmodell ist der Teil 1 gedacht, er formuliert die Modellgrundlagen und die beiden Huygensprinzipien.

Als **Ergänzung** zeigt Teil 2 Huygens' Anwendung seiner Prinzipien auf das Phänomen Brechung, die Lerngruppe kann daraus das Brechungsgesetz mit der Sinusbeziehung formulieren. Simulationen des Ausbreitungsvorgangs (z.B. mit Applets von Walter Fend) sind ggf: hilfreich.

Teil 3 zeigt dann diese Formulierung

Auch die **Lektüre der „Vorrede"** (siehe Literatur) ist für die Einordnung der Traité hilfreich, Huygens macht dort deutlich, dass es sich um keine abgeschlossene Arbeit handelt und dass er keine mathematisch-theoretischen Beweise (er nennt sie „geometrisch") seines Wellenmodells liefern kann, sondern die Berechtigung aus der erfolgreichen Verwendung der Prinzipien in der Praxis ableitet (siehe auch am Ende des Teils 1). Die ist eine durchaus moderne hypothetisch-deduktive Begründung, dieser Stil war aber für seine Zeitgenossen ungewöhnlich. Es wird erst so verständlich, warum sein heute anerkanntes Modell mehr als 100 Jahre für die allgemeine Anerkennung brauchte. (Für die Problematik seiner Prinzipien siehe auch Michael Barth, „Huygens, Wellen und Prinzipien" in Naturwissenschaften im Unterricht Physik 22 (2011) Nr. 125 S.41-42]
Am Ende von Teil 1 erfährt man auch, dass Huygens die Wellenmodelle von Hooke und Pardies kannte und für sein eigenes Modell kritisch reflektierte (vergl. Michael Barth, „Huygens at Work:Annotations in his Rediscovered Personal Copy of Hooke's Micrographia" in Annals of Science Vol 52 Number 6 November 1995, pp. 601-613).

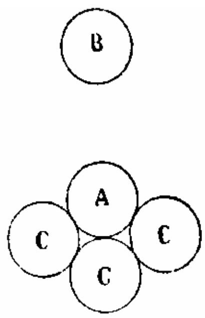
Weitere verwertbare Textpassagen finden sich zum Reflexionsgesetz (Kap. II) und zur Doppelbrechung (Kap.V, dazu ein weiterer Text in dieser Sammlung), am ende von Kap. III zeigt Huygens, dass seine Prinzipien äquivalent zum Fermatschen Minimalprinzip sind, in Kap.VI leitet er die Form durchsichtiger Körper her, die keine chromatische Aberarrtion aufweisen und befasst sich mit Brennlinien (Katakaustik) von spiegelnden Flächen.

Christiaan Huygens **Traité de la Lumière** Leiden 1690
deutsche Übersetzung E.Lommel aus Ostwalds Klassiker Nr. 20 Leipzig 1890
[Verfügbar ist auch ein Reprint der Bände 20 und 205 Ostw.Klass. 2011 (FFM Harri Deutsch)]

TEXT C, TEIL 1, zusammengestellt aus Traité Deutsch Kap.I S.20 - 24
Auslassungen sind durch [...] markiert, Ergänzungen durch {...}

[1]

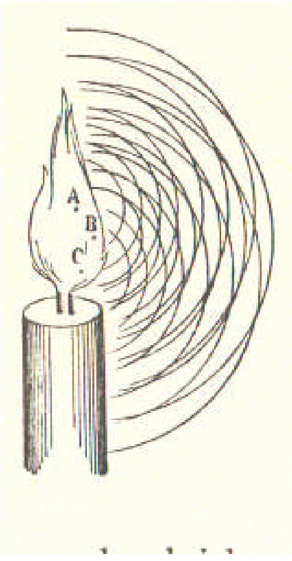
Setzt man dagegen Elasticität in der Aethermaterie voraus, so besitzen deren Theilchen die Eigenschaft, gleich rasch zurückzuschnellen, mögen sie stark oder schwach angestossen werden; und so wird das Fortschreiten des Lichtes immer mit gleicher Geschwindigkeit erfolgen. Hierbei ist noch zu bemerken, dass, obgleich die Aethertheilchen nicht so wie in unserer Kugelreihe in gerader Linie, sondern ohne Ordnung sich aneinander lagern, sodass eins von ihnen mehrere andere berührt, dieser Umstand doch nicht hindert, dass sie ihre Bewegung fortpflanzen und immer nach vorwärts ausbreiten. Hierbei ist ein Gesetz dieser Fortpflanzungsart zu beachten, das durch die Erfahrung bestätigt wird. Wenn nämlich eine Kugel, wie in beistehender Figur *A*, mehrere andere ihr gleiche *CCC* berührt, und wenn sie durch irgend eine andere Kugel *B* getroffen wird, sodass sie auf alle von ihr berührten *CCC* einen Stoss ausübt, so überträgt sie ihre ganze Bewegung, und bleibt hierauf unbeweglich wie auch die Kugel *B*. Auch ohne die Voraussetzung, dass die Aethertheilchen kugelförmig seien (denn ich sehe nicht ein, dass man sie so annehmen muss), begreift man sehr gut, dass diese Eigenschaft des Stosses zur Ausbreitung der Bewegung jedenfalls beiträgt. Die Gleichheit der Grösse der Theilchen scheint hierzu nothwendiger zu sein; denn anderen Falles, wenn die Bewegung von einem kleineren zu einem grösseren Theilchen überginge, müsste nach den Gesetzen des Stosses, welche ich vor einigen Jahren veröffentlicht habe, eine Reflexion der Bewegung nach rückwärts stattfinden.



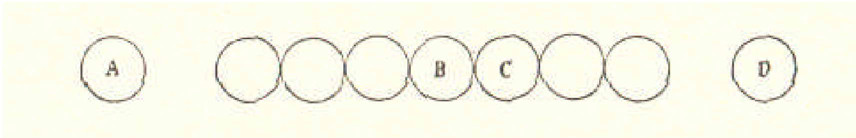
[2]

Ich habe also gezeigt, auf welche Weise man sich die allmähliche Ausbreitung des Lichtes durch kugelförmige Wellenvorstellen kann, und wie es möglich ist, dass diese Fortpflanzung mit einer so grossen Geschwindigkeit geschieht, wie die Versuche und die astronomischen Beobachtungen sie fordern. Hierzu muss jedoch noch bemerkt werden, dass, obgleich man die Aethertheilchen in beständiger Bewegung annimmt (hierfür gibt es nämlich sehr viele Gründe), die Fortpflanzung der Wellen dadurch nicht gehindert werden kann; denn sie besteht nicht in der Fortbewegung dieser Theilchen, sondern nur in einer geringen Erschütterung welche sie trotz der ganzen sie hin und her treibenden und ihre gegenseitige Lage, verändernden Bewegung auf die umgebenden Theilchen zu übertragen gezwungen sind

Es ist aber nöthig, den Ursprung dieser Wellen und die Art ihrer Fortpflanzung noch eingehender zu betrachten. Zunächst folgt nämlich aus den obigen Bemerkungen über die Erzeugung des Lichtes, dass jede kleine Stelle eines leuchtenden Körpers, wie der Sonne, einer Kerze oder einer glühenden Kohle, ihre Wellen erzeugt, deren Mittelpunkt diese Stelle ist. Sind demnach in einer Kerzenflamme *A, B, C* verschiedene Punkte, so stellen die um jeden dieser Punkte beschriebenen concentrischen Kreise die Wellen dar, welche von ihnen ausgehen. Ebenso muss man sich solche Kreise um jeden Punkt der Fläche und eines Theiles des Inneren der Flamme beschrieben denken.

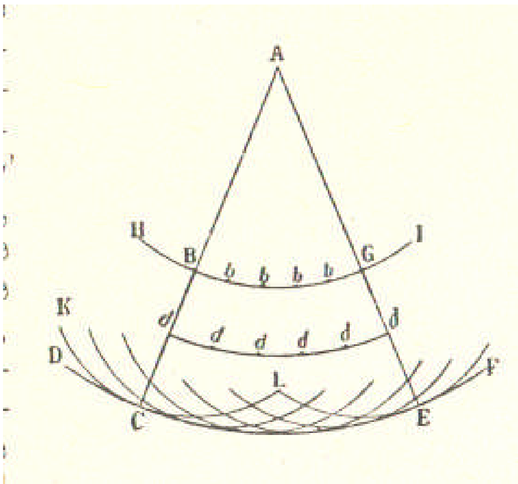


Da aber die Stösse im Mittelpunkte dieser Wellen nicht in regelmässiger Reihenfolge stattfinden, so braucht man sich auch nicht vorzustellen, dass die Wellen selbst in gleichen Abständen auf einander folgen; und wenn diese Enfernungen in der nebenstehenden Figur so erscheinen mag, so hat dies vielmehr den Zweck, das Vorrücken einer und derselben Welle in gleichen Zeiten anzudeuten, als um mehrere von demselben Centrum ausgegangene Wellen darzustellen.Es braucht übrigens eine solche ungeheure Menge von Wellen,welche sieh ohne Störung durchkreuzen, und ohne sich egenseitig aufzuheben, nicht unbegreiflich zu erscheinen, da bekanntlich ein und dasselbe Stofftheilchen mehrere Wellen fortpflanzen kann, welche von verschiedenen oder sogar von entgegengesetzten Seiten kommen, nicht nur, wenn dasselbe durch nahe nacheinander folgende, sondern sogar auch, wenn es durch Stösse getroffen wird, welche in demselben Augenblick darauf einwirken. Der Grund hierfür ist die allmählich fortschreitende Bewegung. Es lässt sich dies durch die oben erwähnte Reihe gleicher Kugeln aus hartem Stoffe nachweisen; Denn wenn man gegen dieselbe von den beiden entgegengesetzten Seiten in demselben Moment ähnliche Kugeln *A* und *D* stößt, so wird man jede mit derselben Geschwindigkeit, welche sie beim Aufprall hatte, zurückschnellen und die ganze Reihe an ihrer Stelle verharren sehen, obgleich die Bewegung vollständig und zwar zweimal durch sie hindurchgegangen ist. Wenn aber die einander entgegengesetzten Bewegungen sich gerade in der mittelsten Kugel *B* oder in irgend einer anderen *C* treffen, so muss sie sich auf beiden Seiten einbiegen und zurückschnellen und so in demselben Augenblick zur Fortpflanzung beider Bewegungen dienen.



[3]

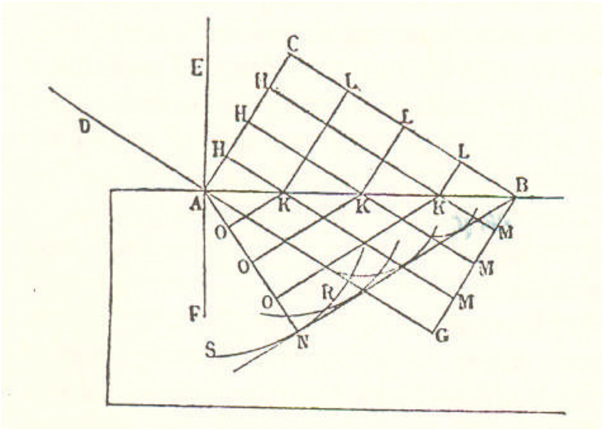
Hinsichtlich der Fortpflanzung dieser Wellen ist ferner noch zu bedenken, dass jedes Theilchen des Stoffes, in welchem eine Welle sich ausbreitet, nicht nur dem nächsten Theilchen, welches in der von dem leuchtenden Punkte aus gezogenen geraden Linie liegt, seine Bewegung mittheilen muss, sondern nothwendig allen übrigen davon abgiebt, welche es berühren und sich seiner Bewegung widersetzen. Daher muss sich um jedes Theilchen eine Welle bilden, deren Mittelpunkt dieses Theilchen ist. Wenn also *DCF* eine Welle ist, welche von dem leuchtenden Punkte *A* als Centrum ausgegangen ist, so wird das Theilchen B, das zu den von der Kugel *DCF* umschlossenen gehört, seine die Welle *DCF* in *C* berührende besondere Welle *KCL* in demselben Augenblicke gebildet haben, in welchem die von *A* ausgesandte Hauptwelle in *DCF* angelangt ist; und es ist klar, dass die Welle *KCL* die Welle*DCF* eben nur in dem Punkte *C* berührt, d. h. in demjenigen, welcher auf der durch *AB* gezogenen Geraden liegt. Auf dieselbe Weise bildet jedes andere Theilchen innerhalb der Kugel *DCF,* wie *bb, dd* u. s. w., seine eigene Welle. Jede dieser Wellen kann indessen nur unendlich schwach sein im Vergleich zu der Welle *DCF*, zu deren Bildung alle übrigen beitragen mit demjenigen Theil ihrer Oberfläche, welcher von dem Mittelpunkte *A* am weitesten entfernt ist.



Man sieht ferner, dass die Welle *DCF* bestimmt wird durch die äusserste Grenze der Bewegung, welche von dem Punkte *A* in einem gewissen Zeitraume ausgegangen ist; denn jenseits dieser Welle findet keine Bewegung statt, wohl aber in dem von ihr umschlossenen Raume, nämlich in denjenigen Theilen der besonderen Wellen, welche die Kugel *DCF* nicht berühren. Man darf nicht etwa meinen, dass alles dies zu spitzfindig und allzu gesucht sei; denn man wird in der Folge sehen, dass alle Eigenschaften des Lichtes und alles, was auf seine Zurückwerfung und Brechung Bezug hat, sich hauptsächlich aus dieser Anschauung erklärt. Gerade dieser Punkt ist denjenigen entgangen, welche angefangen haben, das Licht als Wellenbewegung zu betrachten, wie Hooke in seiner Mikrographia und Pater Pardies, der in einer Abhandlung, von der er mir einen Theil gezeigt hat und die er wegen seines kurz darauf erfolgten Todes nicht vollenden konnte, die Erschienungen der Spiegelung und Brechung durch solche Wellen zu erklären unternommen hatte.

TEXT C, Teil 2 zusammengestellt aus Traité Deutsch Kap. III S.36 - 38

Um nun die Erscheinungen nach meinen Principien zu erklären, nehme ich an, dass die Gerade AB, welche eine Ebene darstellt, die durchsichtigen Körper begrenzt, welche nach C und N hin sich erstrecken. Wenn ich von einer Ebene spreche, so soll dies nicht eine vollkommene Ebene bezeichnen, sondern eine solche, wie sie oben bei der Besprechung der Reflexion gedacht worden Ist, and zwar aus demselben Grunde.



Die Linie AC möge einen Theil einer Lichtwelle darstellen, deren Mittelpunkt so entfernt angenommen wird, dass dieser Theil als eine gerade Linie angesehen werden kann. Die Stelle C der Weile AC wird nun in einem gewissen Zeitraume bis zur Ebene AB längs der Geraden CB gelangt sein, welche von dem leuchtenden Centrum ausgehend zu denken ist und darum AC rechtwinklig schneidet. In derselben Zeit würde nun die Stelle A längs der CB gleichen und parallelen Geraden AB in G angelangt sein, während der ganze Wellentheil AC In GB sein würde, wenn die Materie des durchsichtigen Körpers die Wellenbewegung ebenso schnell übertragen würde, wie diejenige- des Aethers. Nehmen wir jedoch an. dass sie diese Bewegung weniger schnell fortpflanze, beispielsweise um ein Drittel. Dann wird sich von dem Punkte A aus in dem Stoffe des durchsichtigen Körpers Bewegung ausgebreitet haben bis zu einer Erstreckung, welche ist 2/3 ist von CB, indem sie gemäß der früheren Auseinandersetzung ihre kugelförmige Einzelwelle bildet. Diese Welle wird demnach durch den Kreis SNR dargestellt, dessen Mittelpunkt A und dessen Halbmesser gleich 2/3 CB Ist. Betrachtet man nunmehr die übrigen Stellen H der Welle AC, so ist klar, dass sie in derselben Zeit, in welcher die Stelle C nach B gelangt ist, nicht nur bis zu der Fläche AB durch die mit CB parallelen Geraden HK gelangt sein, sondern auch noch um die Mittelpunkte K Einzelwellen in dem durchsichtigen Körper erzeugt haben werden, welche hier durch Kreise dargestellt sind, deren Halbmesser gleich 2/3 der Linien KM sind, d. h. gleich 2/3 der Verlängerung der {Linie}HK bis zu der Geraden BG; denn diese Halbmesser würden den ganzen Strecken KM gleich gewesen sein, wenn die beiden durchsichtigen Mittel die nämliche {gleiche} Fortpflanzungsfähigkeit besässen.

Alle diese Kreise haben nun zur gemeinschaftlichen Tangente die Gerade BN, d.h. dieselbe, welche von B aus als Tangente an den zuerst betrachteten Kreis SNR gezogen ist. Denn es ist leicht einzusehen, dass alle übrigen Kreise ebenfalls BN berühren und zwar von B an bis zum Berührpunkte N, welcher zugleich der Fusspunkt des Lothes AN auf BN ist.

Die Gerade BN also, welche gleichsam von kleinen Bogentheilchen dieser Kreise gebildet wird, begrenzt die Bewegung, welche die Welle AC an den durchsichtigen Körper mitgetheilt hat, und auf ihr ist diese Bewegung in grösserem Betrage vorhanden als überall sonstwo. Und darum ist diese Linie, wie bereits wiederholt dargelegt worden, die Fortsetzung der Welle AC in dem Augenblicke, in welchem ihre Stelle C in B angekommen ist. Denn es giebt unterhalb der Ebene AB keine andere Linie, welche wie BN die gemeinschaftliche Tangente aller jener Einzelwellen wäre. Will man wissen, wie die Welle AC allmählich nach BN gelangt ist, so braucht man in derselben Figur nur die Geraden KO parallel zu BN und alle mit AC parallelen Linien KL zu ziehen. Die Welle CA wird also, wie man sieht, aus der Geraden in alle LKO nacheinander gebrochen und wird In BN wieder gerade. Da dies nach den früheren Darlegungen schon klar ist, bedarf es einer weiteren Erklärung nicht.

Zieht man nun in derselben Figur die Linie EAF, welche die Ebene AB im Punkt A rechtwinklig schneidet, und fällt man auf die Welle AG die Senkrechte AD, so wird DA den einfallenden Lichtstrahl und die auf BN senkrecht stehende AN den gebrochenen Strahl darstellen ; denn die Lichtstrahlen sind nichts anderes als die geraden Linien, längs welcher die Theile der Wellen sich fortpflanzen.
Hieraus erkennt man leicht die Haupteigenschaft der Brechung, nämlich dass der Sinus des Winkels DAE stets das nämliche [gleiche] Verhältniss zum Sinus des Winkels NAF hat, welches auch die Neigung des Strahles DA sein mag, und dass dies Verhältniss dasselbe ist, wie dasjenige der Geschwindigkeit der Wellen in dem gegen AE liegenden durchsichtigen Mittel zu ihrer Geschwindigkeit in dem durchsichtigen Mittel gegen AF. Denn betrachten wir AB als den Radius eines Kreises, so ist BC der Sinus des Winkels BAC und AN der Sinus des Winkels ABN Der Winkel ABC ist aber gleich DAE; denn jeder von ihnen bildet, zu CAE hinzugefügt, einen rechten Winkel; und der Winkel ABN ist gleich NAF; denn jeder von ihnen bildet mit BAN einen rechten Winkel. Der Sinus des Winkels DAE verhält sich also zu dem Sinus des Winkels NAF wie BC zu AN. Aber das Verhältniss von BC zu AN war dasselbe wie das der Lichtgeschwindigkeiten in den gegen AE und gegen AF hin gelegenen Materien; folglich muss sich auch der Sinus des Winkels DAE zum Sinus des Winkels NAF verhalten wie die genannten Lichtgeschwindigkeiten.

<u>Informationen zu </u>TEXT D Newton Brechungsgesetz und Beugung aus Principia

Sir Isaac Newton's Mathematical Principles (Motte's Translation (1729) , revised by Cajori)
Berkeley (Univ.of California Press) 1962

Newton formuliert das Brechungsgesetz nicht in seinen Opticks von 1704, sondern in der Pricncipia von 1686 als Lösung eines mechanischen Problems: Ein Körper bewegt sich geradlinig in eine Zone, in der Kräfte senkrecht zu einer Grenzfläche wirken, also aus heutiger Sicht in eine homogenes, begrenztes Kraftfeld. Es ergibt sich eine Parabelbahn (vergl. Wurfbewegung), deren Richtungswinkel von Einfalls- und Ausfallstangente dem Brechungsgesetz genügen.
Newton beweist die Gültigkeit des Brechungsgesetzes für diesen Fall, dafür benutzt er eine rein geometrische Argumentation (wie auch sonst in der Principia), deren Grundlagen nicht mehr zum üblichen mathematischen Handwerkszeug gehören dürften. Der Beweis lässt sich mit heutigen Methoden auch algebraisch bzw. analytisch-geometrisch führen, ist aber durchaus komplex.

Die Totalreflexion ergibt sich aus diesem Ansatz zwanglos, abschließend thematisiert Newton die Parallele zu optischen Erscheinungen, die ihm ebenso wie das Brechungsgesetz von Descartes wohlvertraut sind.

In den Opticks verweist er dann für das Brechungsgesetz auf diese Herleitungen der Principia.

Die Ausführungen zu Beugung basieren konsequent ebenfalls auf Kraftwirkungen, müssen aber qualitativ bleiben. Daran ändert sich auch nichts in seinen späteren Ausführungen in den Opticks.

TEXT D Newton Brechungsgesetz und Beugung aus Principia

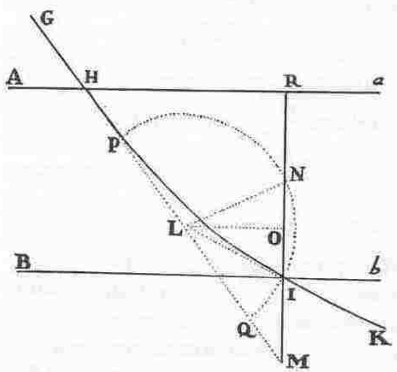
SECTION XIV

The motion of very small bodies when agitated by centripetal forces tending to the several parts of any very great body.

PROPOSITION XCIV. THEOREM XLVIII

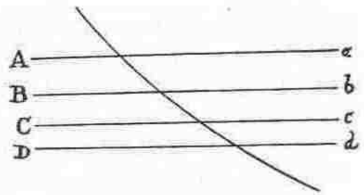
If two similar mediums be separated from each other by a space terminated on both sides by parallel planes, and a body in its passage through that space be attracted or impelled perpendicularly towards either of those mediums, and not agitated or hindered by any other force; and the attraction be everywhere the same at equal distances from either plane, taken towards the same side of the plane: I say, that the sine of incidence upon either plane will be to the sine of emergence from the other plane in a given ratio.

CASE 1. Let A*a* and B*b* be two parallel planes, and let the body light upon the first plane A*a* in the direction of the line GH, and in its whole passage through the intermediate space let it be attracted or impelled towards the medium of incidence, and by that action let it be made to describe a curved line HI, and let it emerge in the direction of the line IK. Let there be erected IM perpendicular to B*b* the plane of emergence, and meeting the line of incidence GH prolonged in M, and the plane of incidence A*a* in R; and let the line of emergence KI be produced and meet HM in L. About the centre L, with the radius LI, let a circle be described cutting both HM in P and Q, and MI produced in N; and, first, if the attraction or impulse be supposed uniform, the curve HI (by what *Galileo* hath demonstrated) will be a parabola, whose property



is that of a rectangle under its given latus rectum, and the line IM equal to the square of HM; and moreover the line HM will be bisected in L. Hence if to MI there be let fall the perpendicular LO, then MO, OR will be equal; and adding the equal lines ON, OI, the wholes MN, IR will be equal also. Therefore since IR is given, MN is also given, and the rectangle $MI \cdot MN$ is to the rectangle under the latus rectum and IM, that is, to HM^2 in a given ratio. But the rectangle $MI \cdot MN$ is equal to the rectangle $MP \cdot MQ$, that is, to the difference of the squares ML^2, and PL^2 or LI^2; and HM^2 hath a given ratio to its fourth part ML^2; therefore the ratio of $ML^2 - LI^2$ to ML^2 is given, and by conversion the ratio of LI^2 to ML^2, and its square root, the ratio of LI to ML. But in every triangle, as LMI, the sines of the angles are proportional to the opposite sides. Therefore the ratio of the sine of the angle of incidence LMR to the sine of the angle of emergence LIR is given. Q.E.D.

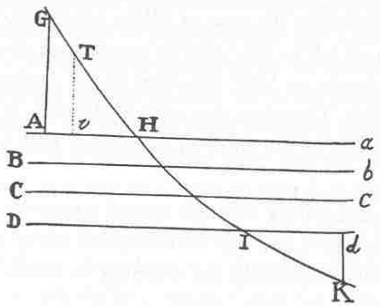
CASE 2. Let now the body pass successively through several spaces terminated with parallel planes A*ab*B, B*bc*C, &c., and let it be acted on by a force which is uniform in each of them separately, but different in the different spaces; and by what was just demonstrated, the sine of the angle of incidence on the first plane A*a* is to the sine of emergence from the second plane B*b* in a given ratio; and this sine of incidence upon the second plane B*b* will be to the sine of emergence from the third plane C*c* in a given ratio; and this sine to the sine of emergence from the fourth plane D*d* in a given ratio; and so on *in infinitum;* and, by multiplication of equals, the sine of incidence on the first plane is to the sine of emergence from the last plane in a given ratio. Let now the intervals of the planes be diminished, and their number be infinitely increased, so that the action of attraction or impulse, exerted according to any assigned law, may become continual, and the ratio of the sine of incidence on the first plane to the sine of emergence from the last plane being all along given, will be given then also. Q.E.D.



PROPOSITION XCV. THEOREM XLIX

The same things being supposed, I say, that the velocity of the body before its incidence is to its velocity after emergence as the sine of emergence to the sine of incidence.

Make AH and I*d* equal, and erect the perpendiculars AG, *d*K meeting the lines of incidence and emergence GH, IK in G and K. In GH take TH equal to IK, and to the plane A*a* let fall a perpendicular T*v*. And (by Cor. II of the Laws of Motion) let the motion of the body be resolved into two, one perpendicular to the planes A*a*, B*b*, C*c*, &c., and another parallel to them. The force of attraction or impulse, acting in directions perpendicular to those planes, does not at all alter the motion in parallel directions; and therefore the body proceeding with this motion will in equal times go through those equal parallel intervals that lie between the line AG and the point H, and between the point I and the line *d*K; that is, they will describe the lines GH, IK in equal times. Therefore the velocity before incidence is to the velocity after emergence as GH to IK or TH, that is, as AH or I*d* to *v*H, that is (supposing TH or IK radius), as the sine of emergence to the sine of incidence.[1] Q.E.D.



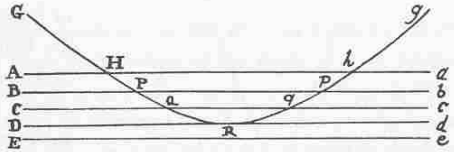
PROPOSITION XCVI. THEOREM L

The same things being supposed, and that the motion before incidence is swifter than afterwards: I say, that if the line of incidence be inclined continually, the body will be at last reflected, and the angle of reflection will be equal to the angle of incidence.

For conceive the body passing between the parallel planes A*a*, B*b*, C*c*, &c., to describe parabolic arcs as above; and let those arcs be HP, PQ, QR, &c. And let the obliquity of the line of incidence GH to the first plane A*a*

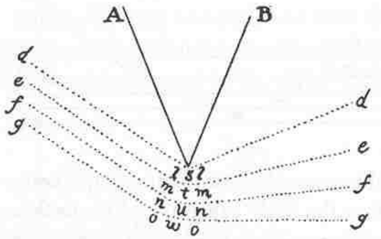
[[1] Appendix, Note 26.]

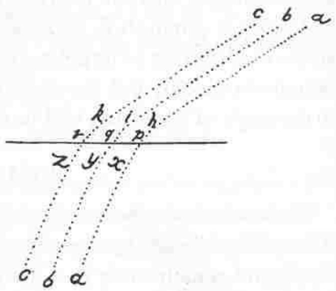
be such that the sine of incidence may be to the radius of the circle whose sine it is, in the same ratio which the same sine of incidence hath to the sine of emergence from the plane D*d* into the space D*de*E; and because the sine of emergence is now become equal to the radius, the angle of emergence will be a right one, and therefore the line of emergence will coincide with the plane D*d*. Let the body come to this plane in the point R; and because the line of emergence coincides with that plane, it is manifest that the body can proceed no farther towards the plane E*e*. But neither can it proceed in the line of emergence R*d*; because it is perpetually attracted or impelled towards the medium of incidence. It will return, therefore, between the planes C*c*, D*d*, describing an arc of a parabola QR*q*, whose principal vertex (by what *Galileo* hath demonstrated) is in R, cutting the plane C*c* in the same angle at *q*, that it did before at Q; then going on in the parabolic arcs *qp*, *ph*, &c., similar and equal to the former arcs QP, PH, &c., it will cut the rest of the planes in the same angles at *p*, *h*, &c., as it did before in P, H, &c., and will emerge at last with the same obliquity at *h* with which it first impinged on that plane at H. Conceive now the intervals of the planes A*a*, B*b*, C*c*, D*d*, E*e*, &c., to be infinitely diminished, and the number infinitely increased, so that the action of attraction or impulse, exerted according to any assigned law, may become continual; and, the angle of emergence remaining all along equal to the angle of incidence, will be equal to the same also at last. Q.E.D.



SCHOLIUM

These attractions bear a great resemblance to the reflections and refractions of light made in a given ratio of the secants, as was discovered by *Snell;* and consequently in a given ratio of the sines, as was exhibited by *Descartes.* For it is now certain from the phenomena of Jupiter's satellites, confirmed by the observations of different astronomers, that light is propagated in succession, and requires about seven or eight minutes to travel from the sun to the earth. Moreover, the rays of light that are in our air (as lately was discovered by *Grimaldi*, by the admission of light into a dark room through a small hole, which I have also tried) in their passage near the angles of bodies, whether transparent or opaque (such as the circular and rectangular edges of gold, silver, and brass coins, or of knives, or broken pieces of stone or glass), are bent or inflected[1] round those bodies as if they were attracted to them; and those rays which in their passage come nearest to the bodies are the most inflected, as if they were most attracted; which thing I myself have also carefully observed. And those which pass at greater distances are less inflected; and those at still greater distances are a little inflected the contrary way, and form three fringes of colors. In the figure *s* represents the edge of a knife, or any kind of wedge A*s*B; and *gowog, fnunf, emtme, dlsld* are rays inflected towards the knife in the arcs *owo, nvn, mtm, lsl*; which inflection is greater or less according to their distance from the knife. Now since this inflection of the rays is performed in the air without the knife, it follows that the rays which fall upon the knife are first inflected in the air before they touch the knife. And the case is the same of the rays falling upon glass. The refraction, therefore, is made not in the point of incidence, but gradually, by a continual inflection of the rays; which is done partly in the air before they touch the glass, partly (if I mistake not) within the glass, after they have entered it; as is represented in the rays *ckzc, biyb, ahxa,* falling upon *r, q, p,* and inflected between *k* and *z, i* and *y, h* and *x*. Therefore because of the analogy there is between the propagation of the rays of light and the motion of bodies, I thought it not amiss to add the following Propositions for optical uses; not at all considering the nature of the rays of light, or inquiring





[1 Appendix, Note 27.]

whether they are bodies or not; but only determining the curves of bodies which are extremely like the curves of the rays.

Weitere umfangreiche Experimente und Theorien zur Beugung in Newton „Opticks" 3rd book

Sir Isaac Newton's MATHEMATICAL PRINCIPLES

OF NATURAL PHILOSOPHY AND HIS SYSTEM OF THE WORLD

Translated into English by Andrew Motte in 1729. The translations revised, and supplied with an historical and explanatory appendix, by

FLORIAN CAJORI

Volume One: The Motion of Bodies

Informationen zu TEXT E FERMAT:

Fermat argumentiert rein mathematisch, er beschäftigte sich mit den mathematischen Standardproblemen der Zeit: Bestimmung von Bogenlängen, Steigungen und Flächen/Volumenbestimmungen bei krummlinigen Kurven oder Körperbegrenzungen. Dies ist verkoppelt mit der Analyse von nicht-gleichförmigen Bewegungen und Extremalproblemen führte im 17.Jahrhundert zur Entwicklung der Differentialrechung.

Die Nutzung von Extremalprinzipien war dabei ein bekannter möglicher Zugang, für die Natur wurde dabei schon lange eine Art „ökonomisches Verhalten" unterstellt, also ein Minimalprinzip. Dieses wurde schon lange zur Begründung des Reflexionsgesetzes, auch in der Optik, angewendet (vergl. Text F).

Fermat lehnte Descartes "künstliche Annahmen" in Text A und B ab, insbesondere sah er die Argumentation mit Geschwindigkeitskomponenten als unzulässig an, da die Geschwindigkeit eine einheitliche Größe ist. Tatsächlich ist das zu Grunde liegende Unabhängigkeitsprinzip ein Axiom und nicht beweisbar. Deshalb hielt er das Sinusgesetz für fehlerhaft. Zu seiner Überraschung lieferte sein Ansatz ebenfalls ein Sinusgesetz, wenn auch mit entgegengesetzt großen Geschwindigkeiten. Huygens zeigte später in den Traite, dass das Minimalprinzip äquivalent zu einem Wellenansatz ist.

Wenn man die Lösung im Mittelteil abdeckt, kann das Wegproblem als Extemwertaufgabe verwendet werden. Fermat löste es auf vergleichbare Weise, mit zeitgenössischen infinitesimalen Methoden, wenn auch natürlich nicht mit modernem Kalkül.

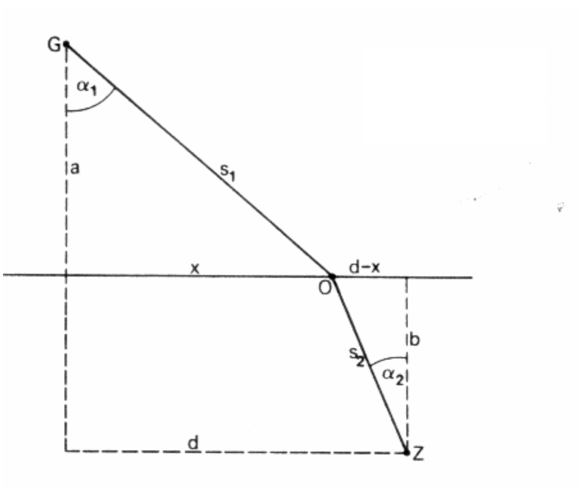
TEXT E FERMAT:
Ein Kritiker von Descartes schlägt eine andere Erklärung der Lichtausbreitung vor .... und findet damit (fast) das gleiche Brechungsgesetz

(überarbeitet nach LIND)

Das Prinzip, dass das Licht dem *schnellsten* Weg folge, erschien FERMAT sehr einleuchtend. War nicht die Annahme, dass in der Natur alles auf die einfachste und ökonomischste Weise vonstatten ging, viel naheliegender als die künstlichen Modellvorstellungen, die DESCARTES vorgeschlagen hatte? FERMAT sah deshalb sein Forschungsproblem darin, aus diesem Prinzip das richtige Brechungsgesetz herzuleiten.
Außerdem war er der Ansicht, dass das Brechungsgesetz nicht die gleiche Form wie bei Descartes mit Sinusfunktionen haben könne.
Seine Problemstellung war also die folgende: Gegeben zwei Punkte G und Z in verschiedenen Medien, in denen das Licht die Geschwindigkeiten v_l und v_2 hat: Gesucht ist dann der Lichtweg zwischen G und Z, der die kürzeste Zeit benötigt, am *schnellsten* durchlaufen wird.
Es sei t_1 die Zeit, die das Licht benötigt, um von G zu einem Punkt 0 (dessen Lage noch zu bestimmen ist) auf der Grenzfläche zwischen beiden Medien zu gelangen, und t_2 die Zeit, die das Licht benötigt, um von 0 nach Z zu gelangen, die Funktion $f(t_1,t_2) = t_1 + t_2$ liefert die gesamte Laufzeit des Lichtes, je nach Lage des Punktes O hat die Funktion f andere Funktionswert. Gesucht ist also das Minimum von f.
Mit Hilfe der Differentialrechung ist dieses Problems leicht lösbar: Man drückt zunächst die Zeiten t_1 und t_2 durch die Wege s_1 und s_2 aus und führt diese auf eine <u>einzelne</u> Variable x (vergl. Abb. unten) zurück. Dies ergibt eine Funktion f(x) mit <u>einer</u> Variable, deren Ableitung man berechnen kann. Aus der Nullstelle der Ableitung df(x)/dx erhält man Extremstellen. Dass der erhaltene Extremwert nur ein Minimum und kein Maximum sein kann, ist physikalisch unmittelbar einleuchtend bzw. kann mit f“ nachgerechnet werden.

<u>Ein anschauliches Beispiel dazu</u>:

In der Abb17 soll der Bereich oberhalb der waagerechten Linien ein Sandstrand, der Bereich unterhalb das Meer sein. Wenn in Z eine Person durch einen Wadenkrampf untergeht, läuft ein Lebensretter im Punkt G los: Sinnvollerweise wird er nicht den direkten Weg von G nach Z einschlagen, sondern einen, der einem Weg von G über einen geeigneten Punkt O nach Z ähnelt. **Warum?**



Lösung:

$$f = t_1 + t_2 = \frac{s_1}{v_1} + \frac{s_2}{v_2} \qquad \frac{1}{v_1}\sqrt{a^2 + x^2} + \frac{1}{v_2}\sqrt{(d-x)^2 + b^2} = f(x)$$

f’(x) = ... f’(x)= 0

$$\frac{x}{v_1\sqrt{a^2+x^2}} - \frac{d-x}{v_2\sqrt{(d-x)^2+b^2}} = 0$$

$$\frac{x}{v_1 s_1} - \frac{d-x}{v_2 s_2} = 0$$

$$\frac{\sin\alpha_1}{v_1} - \frac{\sin\alpha_2}{v_2} = 0$$

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

[FERMAT ging anders vor, da die Differentialrechung in dieser Form noch nicht vorhanden waren.]
Aus einem Brief von FERMAT an C. de la Chambre vom 1.1.1662 (zitiert nach Simonyi 1990, S.232):

„Der Lohn meiner Bemühungen war so sonderbar, so unerwartet und beglückend, wie nur irgend möglich. Nachdem ich mich nämlich durch die Gleichungen, Multiplikationen, Antihesen und die übrigen Operationen meiner Methode durchgearbeitet hatte und endlich zum Abschluss meines Problems gelangt war, ... fand ich, dass mein Prinzip der Lichtbrechung zu genau derselben Proportion führte, die auch Herr Descartes aufgestellt hatte. Dieses völlig unvorhergesehene Ergebnis hat mich derart überrascht, dass ich vor Verwunderung kaum zu mir kam.“

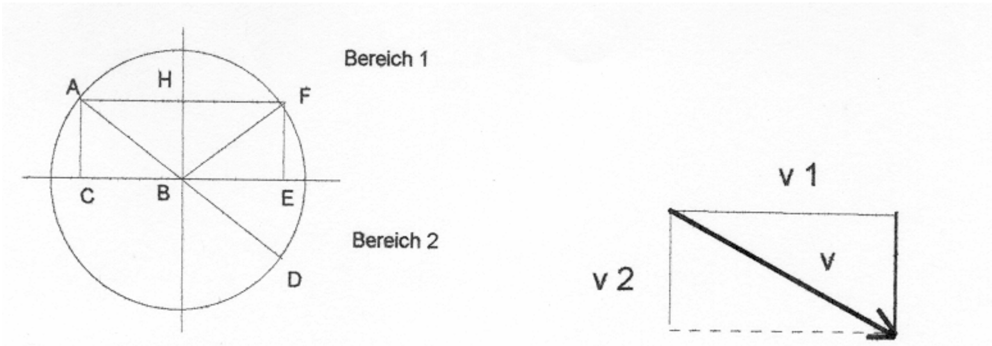
<u>FERMAT hat tatsächlich nicht „die gleiche Proportion“ gefunden: Wo liegt der Unterschied zu DESCARTES Gesetz?</u>

Informationen zu TEXT F Reflexionsgesetz

Das Reflexionsgesetz ist ein historisch sehr lange bekanntes, sicher auch nahe liegendes Gesetz. Es wurde auch schon früh über ein Minmalprinzip hergeleitet und erlaubt die Erklärung und Konstruktion von diversen Spiegeln, auch Hohl- und Wölbspiegeln.

Eine theoretische Übertragung auf das Brechungsgesetz ist nicht ohne weiteres möglich, Ansätze finden sich aber bereits im arabischen Sprachraum, dort wurden bereits Linsens- und Spiegelformen mathematisch analysiert (Ihn Stahl 984), dafür wurde zwar offensichtlich das Brechungsgesetz verwendet, aber nicht explizit formuliert. Anders als später in Europa war dabei nicht die Optimierung von optischen Geräten Anlass, sondern ein das dahinter liegende mathematische Problem.

TEXT F Teil 1 Reflexionsgesetz nach DESCARTES

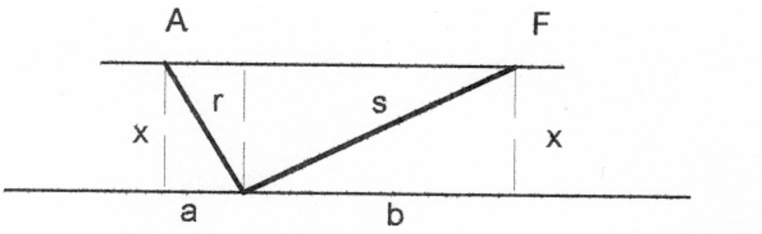


Voraussetzungen:

1. Die Geschwindigkeit v ist im Bereich 1 konstant
2. v ist zusammengesetzt aus v_1 und v_2, wobei sich v_1 und v_2 nicht gegenseitig beeinflussen
3. Nur v_2 ändert sich bei der Reflexion

Wenn Licht (ein Ball) sich von A nach B bewegt, muß nach der Reflexion irgendein Punkt *auf dem Kreis* erreicht werden [wegen 1.], d.h. die Zeit $t_{A\text{-}B}$ und $t_{B\text{-}P}$ sind gleich groß. Ferner gilt [wegen 3], daß die Zeiten $t_{A\text{-}H}$ und $t_{H\text{-}P}$ ebenfalls gleich groß sind, da v_1 unverändert bleibt. Damit gibt es nur noch zwei mögliche Punkte auf dem Kreis, nämlich F und D. Da D nach Voraussetzung nicht erreichbar ist, bewegt sich das Licht (ein Ball) nach F.
Damit sind aber Einfallswinkel und Reflexionswinkel gleich groß.
Beachte: Es werden keine Aussagen über die Umkehrung der Richtung von v_2 gemacht !
Die moderne Vektorschreibweise rechts wäre **nicht** im Sinne von Descartes.

TEXT F Teil 2 Reflexionsgesetz nach FERMAT (moderne Herleitung mit Differentialrechnung)



Fermat lehnte Descartes' Herleitung ab, da er keinen Grund für die unveränderliche Geschwindigkeitskomponente v_1 sah. Er nahm dagegen an, daß Licht einen möglichst kurzenWeg nimmt, denn die geradlinige Ausbreitung von Licht steht damit in Einklang. Bei einer reflektierenden Fläche, d.h. einer Grenzlinie zu einem Bereich, in dem keine Ausbreitung möglich ist, hilft dieses Prinzip ebenfalls weiter:
Das Licht werde auf seinem Weg von A nach F reflektiert, wobei wir ohne Beschränkung der Allgemeinheit A und F im gleichen Abstand zur reflektierenden Fläche wählen können. Der Auftreffpunkt des Lichtes wird als unbekannt angenommen.

Voraussetzungen:

1. $a+b = c =$ konst , aber a,b variabel
2. $x =$ konst

Es gilt: $x^2+ a^2= r^2$ und $x^2+b^2= s^2$, also $r^2+s^2=2x^2+a^2+b^2=2x^2+a^2+(c-a)^2$.
Damit definieren wir die Funktion $f(a) := r^2+s^2=2x^2+a^2+b^2=2x^2+a^2+(c-a)^2$, sie gibt das Quadrat der Länge des Lichtwegs von A über die reflektierende Grenzfläche bis F an. Wir erhalten als 1.Ableitung $f'(a) = 2a -2(c-a)$ [Beachte Voraussetzung 1]. Setzen wir $f'(a) = 0$, so erhalten wir die Bedingung $a= 1/2\ c$. Da die zweite Ableitung positiv ist, liegt ein Tiefpunkt an der Stelle $a= 1/2\ c$ vor. Mit $a = 1/2\ c$ folgt aber $b = 1/2\ c$ und damit $r = s$. Das liefert gleichen Einfalls- und Reflexionswinkel.

Informationen zu TEXT G Brechung und Dispersion

Newton stellte seine Theorie der Prismenfarben 1672 in der Royal Society vor, sie basierte auf diversen optischen Experimenten, die er seit ca. 1664 durchgeführt hatte. Kurz vorher hatte er dort das Modell eines Spiegelteleskops vorgeführt, wohl um nicht als Theoretiker zu erscheinen, was nicht im Sinne der Statuten der Society gewesen wäre. Das Teleskop und seine „New Theories on Light an Colours“ macht den bis dato nur wenige bekannten Mathematiker Newton auf einen Schlag bekannt, beides wurde zuerst enthusiastisch aufgenommen, aber bald darauf von Robert Hooke, dem einflussreichen Sekretär der Society, in einem Gutachten hart kritisiert.

Tatsächlich folgt Newtons Annahme von Farben in weißem Licht nicht zwingend aus seinen Experimenten und: Hooke hatte 1665 ein ganz anderes Lichtmodell in der „Micrographia“ publiziert (siehe in diesem Heft im Magazin). Der Streit eskalierte schnell, da die beiden Beteiligten entsprechend aggressive und von sich selbst sehr überzeugte Personen waren. Newton war dennoch sehr getroffen von dieser Kritik und wendete sich vom Arbeitsgebiet Optik ab, schrieb die „Principia“, um es erst nach Hookes Tod wieder aufzunehmen, was in die Publikation er „Opticks“ 1704 mündete. Mit Bezug auf die Herleitung eines Gesetzes in der Principia (vergl. Text D) entwickelt er dort seien Korpuskularmodell weiter, d.h. er nimmt „Licht-Globuli“ an, die je nach Farbe unterschiedlich sind und bei der Brechung farbabhängig unterschiedliche Kräfte erfahren. Die auf den ersten Blick verführerische Annahme, dass die Kräfte in der Grenzfläche Gravitationskräfte sind und die Globuli je Farbe eine andere Masse besitzen, ist allerdings unsinnig: Dann würde es keine unterschiedliche Ablenkung in der Grenzschicht geben, ebenso wenig, wie die Form einer Wurfparabel von der Masse des bewegten Körpers abhängt. Diese fehlerhafte Interpretation findet sich bisweilen in der Literatur, Newton selbst ist ihr nicht aufgesessen, er geht von speziellen Kräften und korrespondierenden Eigenschaften der Globuli aus.

1. Wie sich die Lichtstrahlen hinsichtlich ihrer Brechbarkeit unterscheiden, so unterscheiden sie sich auch in ihrer Fähigkeit, diese oder jene besondere Farbe zu zeigen. Die Farben sind keine Eigenschaften des Lichts, die sie, wie allgemein angenommen, durch Brechung oder Reflexion an natürlichen Körpern erhalten, sondern ursprüngliche und angeborene Eigenschaften, die bei verschiedenen Strahlen verschieden sind. Einige Strahlen besitzen die Eigenschaft, rote Farbe zu zeigen und keine andere, einige gelbe Farbe und keine andere, einige grüne Farbe und keine andere und so fort. Es gibt nicht nur für die wichtigeren Farben eigene spezielle Strahlen, sondern auch für alle dazwischenliegenden Abstufungen.

2. Zu demselben Brechungsgrad gehört immer dieselbe Farbe und zu derselben Farbe immer derselbe Brechungsgrad. Die am geringsten brechbaren Strahlen haben alle die Eigenschaft, rote Farbe hervorzurufen, und umgekehrt sind alle Strahlen, welche die Eigenschaft, rote Farbe hervorzurufen, besitzen, die am geringsten brechbaren. Gleichermaßen besitzen die Strahlen größter Brechbarkeit die Anlage, dunkelviolette Farbe hervorzurufen, und umgekehrt gehören alle, die solche violette Farbe hervorrufen können, zu den am stärksten brechbaren. Ebenso gehören zu allen Zwischenfarben in stetiger Folge Zwischenstufen der Brechbarkeit. Diese Analogie zwischen Farbe und Brechbarkeit ist vollkommen genau und streng, so daß die Strahlen entweder in beiden Eigenschaften genau übereinstimmen oder sich in beiden in gleichem Verhältnis unterscheiden.

3. Die zu einer bestimmten Strahlenart gehörige Farbe und Brechbarkeit ist weder durch Brechung oder Reflexion an Körpern noch durch irgendeine andere bisher von mir beobachtete Ursache abzuändern. Wenn irgendeine Strahlenart von den anderen sauber getrennt worden war, behielt sie ihre Farbe danach hartnäckig bei, so sehr ich mich auch bemühte, sie zu ändern. Ich ließ sie durch Prismen brechen und an Körpern, die bei Tageslicht andere Farben zeigen, reflektieren; ..[es folgen weitere Beispiele]

9. Wenn man dieses alles beachtet, so wird auch klar, auf welche Art die Farben durch das Prisma erzeugt werden. Denn die Strahlen, aus denen sich das einfallende Licht zusammensetzt, müssen, da sich die verschiedenfarbigen durch entsprechend verschiedene Brechbarkeit unterscheiden, wegen ihrer ungleichen Brechung getrennt und in eine längliche Figur auseinandergezogen werden, und zwar in einer geordneten Folge von dem am wenigsten gebrochenen Scharlachrot bis zu dem am stärksten gebrochenen Violett. Aus diesem gleichen Grunde erscheinen auch die Gegenstände farbig, wenn sie durch ein Prisma betrachtet werden. Denn dieses lenkt die verschiedenartigen Strahlen durch ihre verschiedene Brechbarkeit zu verschiedenen Stellen der Netzhaut hin, wo sie farbige Bilder der Gegenstände erzeugen, so wie sie in dem früheren Versuch das Sonnenbild auf der Wand hervorriefen. Diese ungleiche Strahlenbrechung bewirkt auch, daß die Gegenstände nicht nur farbig, sondern auch sehr unklar und unscharf erscheinen.

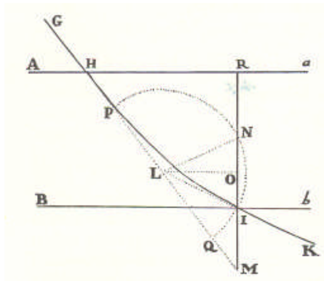
Aus einem Brief Newtons an die Royal Society vom 6.2.1672 /Übers. Lohne u. Sticker)

Zur Deutung der farbabhängigen Brechung schlägt NEWTON um 1700 vor,in seinem Modell Kugeln unterschiedlicher „Größe" anzunehmen was oft als „Masse" oder „Gewicht" interpretiert wurde.

TEXT G Brechung und Dispersion

PROPOSITION XCIV THEOREM XLVIII

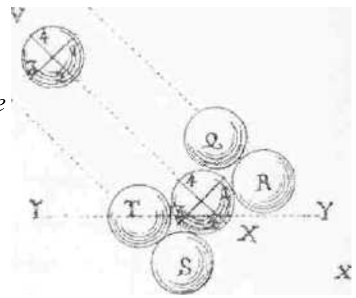
Wenn zwei ... Medien voneinander durch einen Raum getrennt sind, der an beiden Seiten durch parallele Ebenen begrenzt wird, und ein Körper beim Durchgang durch diesen Raum senkrecht in Richtung auf eines dieser Medien angezogen ... wird, ... und wenn die Anziehung [skraft] überall die gleiche ... ist: Ich behaupte, daß der Sinus des Einfalls [winkels] auf eine der Ebenen mit dem Sinus des Ausfalls [winkels] in festem Verhältnis steht.



[Beweis]
... Seien Aa und Bb zwei Ebenen, und falle der Körper auf die Ebene Aa ein in Richtung der Linien GH, und auf seiner ganzen Bewegung durch den Zwischenraum werde er angezogen ... in Richtung auf das Einfallsmediuni, und durch diesen Einfluß beschreibe er eine krumme Linie HI, und verlasse er [den Zwischenraum] in Richtung der Linie IK , wenn die Anziehung[skraft] als konstant angenommen wird, wird die Kurve HI eine Parabel sein ... [Es folgt der komplette geometrische Beweis)] .... Deshalb ist das Verhältnis von Sinus des Einfallswinkels LMR zum Sinus des Ausfalls winkeis LIR konstant. QED

(Aus I.NEWTON Principia Philosophiae Mathematica (Übersetzung aus dem Lateinischen bzw. Englischen)

Descartes illustriert siene Korpuskeltheorie der Farbenenstehung in den Météores am Beispiel der Brechungin Wasser: „Die Kugel 1234 wurde in gerader Linie von V nach X gestoßen, ihre beiden Seiten 1 und 3 bewegen sich gleich schnell bis zur Wasseroberfläche YY, wo die Bewegung der Seite 3, die zuerst auftrifft, verzögert wird, während die der Seite 1 noch andauert. Folglich muss die Kugel unweigerlich sich zu drehen beginnen und zwar entsperchend der Zifferfolge 123." Rot entstünde duch schnellere Drehung als Gelb.



E.Lojacono, Rene Descartes, Spektrum Biografie 3/2001

Informationen zu TEXT H Newtons fit-Theorie

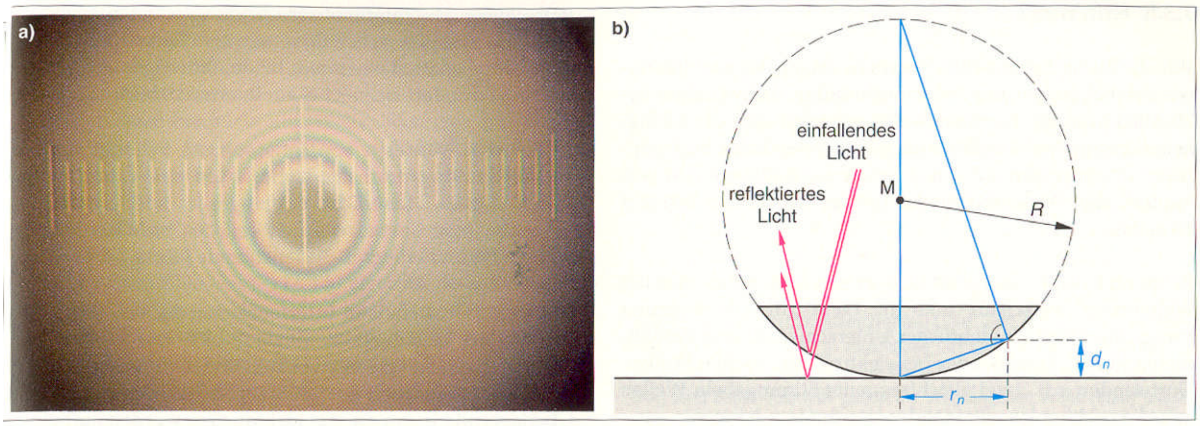
Aus NEWTON „Optics“ Book Two, p 280, NewYork (Dover Public.), 1952“, eigene Übersetzung

In den Optics gibt Newton seine Theorie der „fits“ an, damit lässt sich die gleichzeitige Reflexion und Brechung an einer Grenzfläche erklären, ebenso die Farben bei Newtonringen und an dünnen Schichten. Bei der ersten Publikation von Newtons Farbentheorie (siehe Text G) war es eine Kritikpunkt von Hooke, dass Newtons Theorie gerade diese Phänomene nicht erklären konnte, während Hookes eigene Theorie (siehe Magazin in dieser Ausgabe) dazu in der Lage war.
Durch diese Disposition erhalten Newtons Globuli letztlich wellenartige Eigenschaften, damit ist es nicht verwunderlich, dass Phänomene erklärt werden können, die aus heutiger Sicht auf Interferenz basieren. Insofern ist die fit-Theorie eine ad-hoc-Annahme.

Zur Übersetzung:
In der deutschen Ausgabe der Opticks wird „fit“ als „Anwandlung“ übersetzt, was danach in den deutschen wissenschaftlichen Sprachgebrauch überging als z.B. „Anwandlung leichten Durchgangs“ für „fit of easy transmission“. Dies erschient mir als Übersetzungsfehler: Zwar wird fit im Englischen als Ausdruck für Anwandlung, Anfall gebraucht z.B. „fit of laughter“ für Lachanfall), aber im Sinne von Newton wäre m.E. das deutsche Wort Fähigkeit oder Disposition sinnvoller gewesen. Dies ist ein gutes Beispiel für sinnentstellendes, tendenziell wörtliches Übersetzen.

TEXT H
Aus NEWTON „Optics“ Book Two, p 280, NewYork (Dover Public.), 1952“, eigene Übersetzung
Definition
Die periodisch wiederkehrende Disposition eines Strahles, reflektiert zu werden, will ich Fähigkeit leichter Reflexion nennen, die wiederholt eintretende Disposition, durchgelassen zu werden, Fähigkeit leichten Durchgangs, und den Zwischenraum zwischen einer Wiederkehr und der nächstfolgenden das Intervall der Fähigkeit.
„Ich untersuche hier nicht, worin ... diese Disposition besteht, ...ich begnüge mich einfach, gefunden zu haben, dass die Lichtstrahlen durch irgend eine Ursache ... in zahlreiche, wechselnde Aufeinanderfolgen die Fähigkeit oder die Neigung erhalten, reflektiert oder gebrochen zu werden“

Newton wendete diese Theorie zur Erklärung der Newton’schen Ringe an



307.1 Newton'sche Ringe an einer plankonvexen Linse: **a)** Interferenzbild. **b)** Die Ringe entstehen durch Interferenz in der dünnen Luftschicht zwischen Linse und Glasplatte.

Informationen zu TEXTSAMMLUNG I zur Polarisation

Die Polarisation zeigte sich am Doppelspat, einem in Island durch Bartholinus in den 1660er Jahren aufgefunden Kristall (daher im Englischen „Iceland Spar““, *nicht* spat), siehe Experimentierkarte in diesem Heft.

Das Phänomen war sehr problematisch für alle Lichtmodelle, es ist nur sinnvoll durch die Annahme von Transversalwellen zu lösen. Damit werden aber die Eigenschaften des Trägers für die Lichtwellen seltsam, da er eine gerichtete Verformung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung zulassen muss, also nicht Vergleichbare Eigenschaften wie eine Flüssigkeit mit longitudinalen Wellen haben kann. Überträgt man dies auf ein materiefreies Vakuum, so potenzieren sich die Schwierigkeiten, zumal der Träger auch noch extrem „hart“ sein muss, um eine so hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit wie die Lichtgeschwindigkeit zuzulassen. Dies ist der Grund, warum Young und Fresnel mit der Transversalität ihrer postulierten Lichtwellen so lange gehadert haben. Der Lichtwellenträger des 19.Jahrhunderts, der „Äther“ bekam so durchaus seltsame Eigenschaften, die erst zu Beginn des 20.Jahhrunderts durch eine voll entwickelte Feldtheorie durch Aufgabe eines materiellen Trägers überflüssig wurden.

Newtons Idee, den Licht-Globuli Pole wie einem Magneten zuzuschreiben, ist durchaus geschickt, auch wenn Fresnel sie in seiner Replik im text ablehnt. Damit bekommen diese Korpuskeln eine polare Ausrichtung, daher stammt auch der noch heute gültige Name „Polarisation“.

Fresnel kümmerte sich letztlich nicht mehr um die Eigenschaften des Trägers, sondern untersuchte die Polarisation als Phänomen experimentell und entwickelte so seine „Fresnelschen Formeln“, die Polarisationsrichtung und Intensität in Zusammenhang bringen und es erlauben, dadurch diverse Phänomene an Grenzfläche auch quantitativ zu erfassen. Sie sind auch heute noch mit geänderter Interpretation mit Feldstärkevektoren zutreffen.

TEXTSAMMLUNG I zur Polarisation

1. 1690 C.HUYGENS Traité de la Lumière S.80 [leicht gekürzt
[zum Experiment mit zwei Kalkspatkristallen]

„... so scheint man zu dem Schluss gezwungen zu sein, daß die Lichtwellen infolge des Durchgangs durch den ersten Kristall eine gewisse Gestalt oder Anordnung erlangen .... Wie das geschieht, dafür habe ich bis jetzt eine mich befriedigende Erklärung nicht gefunden“

2. 1704 I.NEWTON Opticks 3rd book Query 29 [gekürzt]
[zum Experiment mit zwei Kalkspatkristallen]

„Die ungewöhnliche Brechung im isländischen Kristall sieht sehr danach aus, als käme sie durch eine Art anziehende Kraft zu Stande, welche nach gewissen Seiten hin sowohl die Strahlen wie auch die Kristallteilchen besitzen ... Und weil der Kristall durch diese Fähigkeit oder Kraft nur dann auf die Strahlen wirkt, wenn eine ihrer Seiten ,,, nach einer solchen Seite [im Kristall] gerichtet ist, so folgt daraus eine diesen Seiten der Strahlen zugehörige Kraft oder Fähigkeit, welche der Seite des Kristalls ebenso entspricht oder mit ihr sympathisiert, wie die Pole zweier Magente einander entsprechen. ... Ich sage nicht, daß diese Kraft eine magnetische sei; sie scheint anderer Art zu sein; ich sage nur, was sie auch sein mag, daß es schwer zu begreifen ist, wie die Lichtstrahlen, wenn sie nicht aus Körperchen bestehen sollen, nach zwei Seiten hin eine dauernde Kraft besitzen können, die sie nach der anderen Seite nicht haben ...“

3. 1816 J.A.Fresnel Abh. über die Beugung S.35 [leicht gekürzt]

„Zwar hat die Polarisation des Lichtes im Wellensystem noch nicht ihre Erklärung finden können. Aber sind sie denn im Newtonschen erklärt worden? Die Erklärung, die dieser große Geometer ... gegeben hat, kann nur als eine einfache und bequeme Art und Weise betrachtet werden, die Tatsachen aufzuzeigen; denn mit ihm annehmen, daß die Lichtmoleküle Pole haben, das hieße, die Analogie zu weit treiben.“

4. 1817 T.YoungBrief an Arago [ein Freund von Fresnel]

„Und doch ist es möglich, in dieser Theorie [Wellentheorie des Lichtes] eine querlaufende Schwingung zu erklären, die sich ebenso in Richtung der Strahlen ausbreitet ... wobei die Bewegung der Teilchen in einer bestimmten festen Richtung bezüglich des Strahles erfolgt; und das ist eine Polarisation.“

5. 1818 J.A.Fresnel Oeuvre Complet S.630

„Erst seit einigen Monaten ... habe ich anerkennen müssen, daß es sehr wahrscheinlich ist, daß die oszillatorischen Bewegungen der Lichtwellen sich einzig entlang der Ebene dieser Wellen bewegen, für das direkte Licht wie für das polarisierte Licht.“

Informationen zu TEXT K Huygens Doppelbrechung

(Quelle: Christiaan Huygens, „Abhandlungen über das Licht“, Ostw.Klass. 20, Leipzig 1890 S. 54-57)

Das Phänomen ist seltsam und für SchülerInnen sehr überraschend, normalerweise auch kein Schulstoff, es wird in der Experimentierkarte in diesem Heft beschrieben. Entsprechende Kristall oder aus Kalkspat geschnittene Platten finden sich in älteren Physiksammlungen. In Tansania erhielt ich sehr gute klare Kristalle zu außerordentlich geringen Preisen; man teilte mir mit, dass sie in manchen Gegenden leicht zu finden seien.

Weitere Polarisationsphänomene z.B. bei Streuung, Reflexion etc. wurden erst zu Beginn des 19.Jahrhunderst untersucht (von Malus, Brewster etc.). Sie fanden ihre empirische Erklärung schließlich mit den Fresnelschen Formeln.

Kapitel V.

Ueber die eigenthümliche Brechung des isländischen Spaths.

(Quelle: Christiaan Huygens, „Abhandlungen über das Licht“, Ostw.Klass. 20, Leipzig 1890 S. 54-57)

18. Da zwei verschiedene Brechungen vorhanden waren, so fasste ich den Gedanken, dass es auch zwei verschiedene Fortpflanzungen von Lichtwellen gäbe, und dass die eine in der im Krystallkörper verbreiteten Ätehrmaterie stattfinden könnte.

[...]

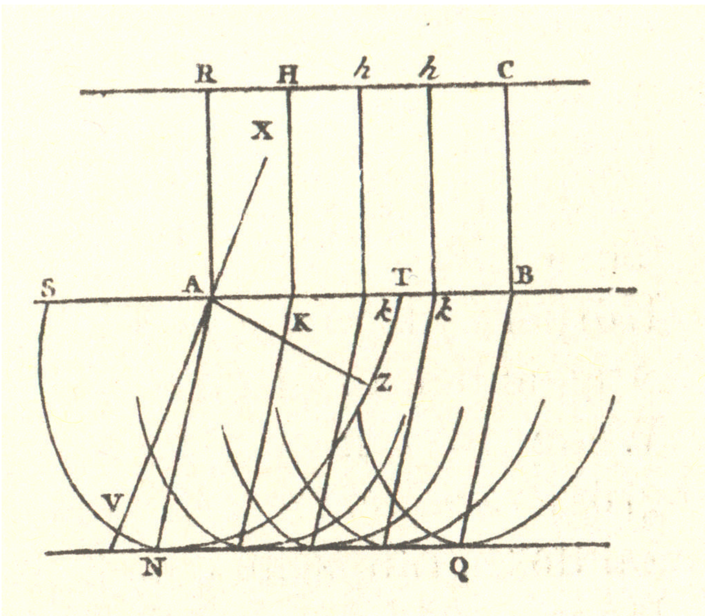
Ich schrieb diese Wellenausstrahlung der regelmäßigen Brechung zu, welche man bei diesem Steine [gemeint ist der Kristall] beobachtet; nimmt man nämlich diese Wellen wie gewöhnlich kugelförmig und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb des Krystalls als langsamer an wie ausserhalb, so geht daraus, wie ich gesagt habe, die Brechung hervor.

19. Was die andere Ausstrahlung anlangt, welche die unregelmässige Brechung hervorbringen sollte, wollte ich versuchen, wie, sich elliptische oder, besser gesagt, sphäroidische [ein Späroid ist ein Ellipsoid mit einer kreisförmigen Querschnittsfläche] Wellen verhalten würden; hierbei nahm ich an, dass dieselben gleichemaassen sowohl in der durch den Krystall verbreiteten Aethermaterie, als auch in den ihn bildenden Körpertheilchen sich fortpflanzten,

[...]

22. Indem ich also solche sphäroidische Wellen neben den kugelförmigen annahm, begann ich damit, zu prüfen, ob sie dazu dienen könnten, die Erscheinungen der aussergewöhnlichen Brechung zu erklären, und wie ich durch die Erscheinungen selbst die Form und die Lage der sphäroidischen Wellen würde bestimmen können. Ich erreichte auch schliesslich den gewünschten Erfolg, indem ich auf folgende Weise verfuhr.

23. Ich betrachtete zuerst die Wirkung der so gestalteten Wellen mit Rücksicht auf den Strahl, welcher senkrecht auf die ebene Fläche eines durchsichtigen Körpers trifft, in welchem sie sich in dieser Weise ausbreiten. Ich nahm *AB* als die freie Stelle der Oberfläche an. Da nun ein auf einer Ebene senkrechter und von einer sehr entfernten Lichtquelle kommender Strahl nach der vorstehenden Theorie nichts anderes als ein parallel zu dieser Ebene eintretender Wellentheil ist, so nahm ich an, dass die mit *AB* parallele und gleiche



Gerade *RC* ein Theil einer Lichtwelle sei, deren unendlich entfernte Stellen *RHhC* die Oberfläche *AB* in den Punkten *AKkB* treffen. Anstatt der halbkugeförmigen Einzelwellen also, welche nach unseren früheren Auseinandersetzungen über die Brechung in einem ordentlich brechenden Körper von einem jeden dieser letzten Punkte sich hätte ausbreiten müssen, müssten hier halbsphäroidische vorhanden sein, deren Axen oder vielmehr grösste Durchmesser nach meiner Annahme gegen die Ebene *AB* geneigt wären. [...] Für jetzt jedoch wollen wir, ohne die eine und die andere bestimmt zu bezeichnen, diese Sphäroide nur in ihren Schnitten betrachten, welche die Ellipsen in der Ebene der vorstehenden Figur liefern. Nimmt man nun einen bestimmten Zeitraum an, in welchem sieh die Weile *SVT* vom Punkte *A* aus fortgepflanzt hat, so müssen von allen anderen Punkten *KkB* aus in derselben Zeit gleiche und ähnlich wie *SVT* liegende Wellen sich gebildet haben. Die gemeinsame Tangente *NQ* aller dieser Halbellipsen wäre alsdann, nach der obigen Theorie, die Fortsetzung der Welle *RC* in dem durchsichtigen Körper, denn diese Linie begrenzt in einem und demselben Augenblick die Bewegung, welche von der auf *AB* treffenden Welle *RC* herrührt, und auf ihr ist die Bewegung in viel grösserer Menge vorhanden als überall anderswo, da sie von zahllosen Ellipsenbogen hervorgebracht wird, deren Mittelpunkte längs der Linie *AB* liegen.

24. Nun leuchtete ein, dass diese gemeinschaftliche Tangente mit *AB* parallel und von gleicher Länge war, aber ihr nicht in gerader Richtung gegenüberlag, [...]. Und so verstand ich, was mir sehr schwierig erschienen war, wie ein auf einer Fläche senkrechter Lichtstrahl beim Eintritt in den durchsichtigen Körper gebrochen werden konnte, indem ich sah, dass die an der Oeffnung *AB* angelangte Welle *RC* fortfuhr, sich von dort nach vorwärts zwischen den Parallelen *AN, BQ* fortzupflanzen, während sie selbst gleichwohl immer parallel zu *AB* blieb, so jedoch, dass hier das Licht nicht in Linien senkrecht zu seinen Wellen sich fortpflanzt, wie bei der gewöhnlichen Brechung , sondern diese Linien zu den Wellen schief stehen.

Informationen zu TEXT L Thomas Young

Thomas Young belebte in Grossbitannien die Wellentheorie des Lichtes am Ende des 18.Jahhunderts wieder, gegen den traditionell durch Newtons korpuskularen Zugang geprägten Trend. Er formulierte das Interferenzprinzip und gab damit eine Erklärung der Phänomene am Doppelspalt, den er für Vorlesungen einsetzte. Er entwickelte die noch heute im Unterricht verwendete Wellenwanne als Demonstrationsgerät.

Seine Nutzung des Interferenzprinzips ist beschränkt auf die Analyse von Beugungsminima und -.maxima und die damit mögliche Bestimmung einer Wellenlänge für Licht. Fresnel nutzte unabhängig davon auch die Prinzipien von Huygens und ermittelte experimentell und theoretisch die zu erwartenden Intensitäten im gesamten Beugungsbild von Doppelspalt und später auch Kante, Draht etc. Dies erfordert erhebliche mathematische Fertigkeiten, die er in seiner traditionell hochwertigen Ausbildung an französischen Schulen, auch militärischen erwarb. Nachdem er mit Young brieflich in Kontakt kam, entwickelte sich eine fruchtbare Zusammenarbeit. Über die Jahre wurde Fresnels mathematische Beugungstheorie und später die Theorie der transversalen Wellen so konsistent und überzeugend, dass es einer Bestätigung des Wellenmodells durch die Messungen der Lichtgeschwindigkeiten in einem Medium durch Foucault und Fizeau (1845) letztlich nicht mehr bedurfte bzw. dass diese Messungen nur noch eine letzte Bestätigung darstellten.

Der Text ist gut geeignet, SchülerInnen auch mit englischsprachigen Texten in Kontakt zu bringen. Ich nutze ihn auch, um das Interferenzprinzip einzuführen bwz. um eine entprechende Schüleridee zu bestätigen oder zu präziseren (z.B. nach dem Vorführen von Bereichen ohne Lautstärke bei zwei nebeneinaderstehenden Schallsendern)

TEXT L Thomas Young, Professor an der Royal Institution of Great Britain, zur Lichttheorie

1800
"How happens it that, whether the projecting force is the slightest transmission of electricity, the friction of two pebbles, the lowest degree of visible ignition, the white heat of a wind furnace, or the intense heat of the sun itself, these wonderful corpuscles are always propelled with one uniform velocity? For, if they differed in velocity, that difference ought to produce a different refraction."

"Why, of the same kind of rays, in every circumstance precisely similar, some should always be reflected and others transmitted, appears in this system [gemeint ist das Teilchenmodell von Newton] to be wholly inexplicable."

1802
„When two undulations from different origins coincide either perfectly or very nearly in direction, their joint effect is a combination of the motions belonging to them"

„The law is, that wherever two portions of the same light arrive at the eye by different routes, either exactly or very nearly in the same direction, the light becomes most intense when the difference of the routes is any multiple of a certain length, and least intense in the intermediate state of the interfering portions; and this length is.different for light of different colours."

1807
„In order that the effects of two portions of light may be thus combined, it is necessary that they be derived from the same origin and that they arrive at the same point by different paths, in directions not much deviating from each other. This deviation may be produced in one or both of the portions by diftraction, by reflection, by refraction or by any these effects combined; but the simplest case appears to be, when a beam of homogenious light falls on a screen in which there are two very small holes or slits, which may be considered as centres of divergence, from whence the light is diffracted in every direction. In this case, when the two newly formed beams are received on a surface placed so as to intercept them, their light is divided by dark stripes into portions nearly equal, but becoming wider as the surface is more remote from the apertures, at all distances, and wider also in the same proportion as the apertures are closer to each other."

(diffraction: Beugung, refraction: Brechung)

zitiert nach Weinmann, „Die Natur des Lichtes", Darmstadt (WBG) 1980

Beispielhafte Klausuraufgaben zum Thema „Lichtmodell“

Die Klausuren wurden in Leistungskursen (Kursen mit erhöhtem Anforderungsniveau) gestellt, teilweise auch mehrfach in unterschieldichen Jahren, im Unterricht wurden u.a. die in den Artikeln beschriebenen historischen Zugänge zum Lichtmodell behandelt.

Klausur 1997

Experimente mit Kalkspatkristallen und λ/4-*Plättchen wurden vorgeführt*

Aufgabe 3:a) Charakterisieren Sie das Phänomen "Doppelbrechung" mit Hilfe Ihrer Beobachtungen aus 1a) und 1b) und grenzen Sie es vom Phänomen "Brechung" ab.

b) In Text [= Text K gekürzt, siehe S.35 unten] liefert HUYGENS eine Deutung der Doppelbrechung: Geben Sie den Inhalt des Textes zusammenfassend wieder, erläutern Sie seine Deutung und arbeiten Sie heraus, inwieweit er im Rahmen seines ursprünglichen Modelles bleibt bzw. wo er dieses abändert.

c) Analysieren Sie, ob die Deutung von HUYGENS nach Text [] das Phänomen angemessen erfaßt. Schlagen Sie ggf. alternative Deutungsansätze vor (mit Begründung).

Aufgabe 4: a) Information : "*Schneidet man aus einem doppelbrechenden Kristall in geeigneter Weise eine planparallele Platte, wird auch der außerordentliche Strahl bei senkrechtem Einfall nicht gebrochen: Ordentlicher und außerordentlicher Strahl laufen nun im Kristall in gleicher Richtung, sie behalten alle ihre Eigenschaften bei, sind also insbesondere hinter der Platte senkrecht zueinander polarisiert. Im sog. "λ/4-Plättchens" haben die beiden Strahlen einen Gangunterschied von einer Viertelwellenlänge (λ/4). Die Strahlen sind nicht interferenzfähig.*"

Begründen Sie Gangunterschied und fehlende Interferenzfähigkeit. Deuten Sie die Intensitätsdiagramme und Ihre Beobachtungen für Versuch 2 mit Hilfe der angegebenen Eigenschaften des λ/4-Plättchens im Wellenmodell des Lichts (Brechungszahlen für das λ/4-Plättchen sind auf Blatt 2 angegeben)

(Quelle: Christiaan Huygens, „Abhandlungen über das Licht“, Ostw.Klass. 20, Leipzig 1890 S. 54-57)

[für den Unterrichtsgebrauch überarbeitete Fassung, d.h. von räumlicher auf ebene Darstellung reduziert]

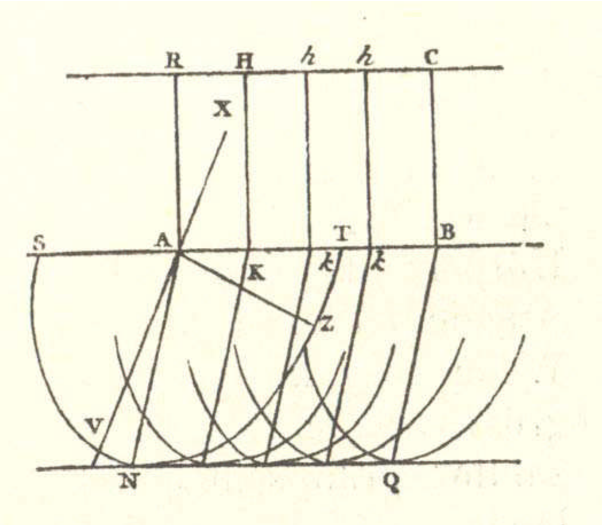
18. Da zwei verschiedene Brechungen vorhanden waren, so fasste ich den Gedanken, dass es auch zwei verschiedene Fortpflanzungen von Lichtwellen gäbe [...].

Ich schrieb [die eine Fortpflanzung der] regelmäßigen Brechung zu, welche man bei diesem Kristall beobachtet; nimmt man nämlich diese Wellen wie gewöhnlich kreisförmig und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb des Kristalls als langsamer an wie außerhalb, so geht daraus, wie ich gesagt habe, die Brechung hervor.

19. Was die andere [Fortpflanzung] anlangt, welche die unregelmäßige Brechung hervorbringen sollte, wollte ich versuchen, wie sich elliptische [...] Wellen verhalten würden.[...]

22. Indem ich also solche elliptischen Wellen neben den kreisförmigen annahm, begann ich damit, zu prüfen, ob sie dazu dienen könnten, die Erscheinungen der außergewöhnlichen Brechung zu erklären, und wie ich durch die Erscheinungen selbst die Form und die Lage der elliptischen Wellen würde bestimmen können. Ich erreichte auch schließlich den gewünschten Erfolg, indem ich auf folgende Weise verfuhr.

23. Ich betrachtete zuerst die Wirkung der so gestalteten Wellen mit Rücksicht auf den Strahl, welcher senkrecht auf die ebene Fläche eines durchsichtigen Körpers trifft, in welchem sie sich in dieser Weise ausbreiten. Ich nahm AB als die freie Stelle der Oberfläche an. Da nun ein auf einer Ebene senkrechter und von einer sehr entfernten Lichtquelle kommender Strahl nach der vorstehenden Theorie nichts anderes als ein parallel zu dieser Ebene eintretender Wellenteil ist, so nahm ich an, dass die mit AB parallele und gleiche Gerade RC ein Teil einer Lichtwelle sei, deren unendlich entfernte Stellen RHhC die Oberfläche AB in den Punkten AKkB treffen. Anstatt der halbkreisförmigen Einzelwellen also, welche nach unseren früheren Auseinandersetzungen über die Brechung in einem ordentlich brechenden Körper von einem jeden dieser letzten Punkte sich hätte ausbreiten müssen, müssten hier halbelliptische vorhanden sein, deren Achsen oder vielmehr größte Durchmesser nach meiner Annahme gegen die Ebene AB geneigt wären. [...]. Nimmt man nun einen bestimmten Zeitraum an, in welchem sich die Welle SVT vom Punkte A aus fortgepflanzt hat, so müssen von allen anderen Punkten KkB aus in derselben Zeit gleiche und ähnlich wie SVT liegende Wellen sich gebildet haben. Die gemeinsame Tangente NQ aller dieser Halbellipsen wäre alsdann, nach der obigen Theorie, die Fortsetzung der Welle RC in dem durchsichtigen Körper, denn diese Linie begrenzt in einem und demselben Augenblick die Bewegung, welche von der auf AB treffenden Welle RC herrührt, und auf ihr ist die Bewegung in viel größerer Menge vorhanden als überall anderswo, da sie von zahllosen Ellipsenbogen hervorgebracht wird, deren Mittelpunkte längs der Linie AB liegen.



24. Nun leuchtete ein, dass diese gemeinschaftliche Tangente mit AB parallel und von gleicher Länge war, aber ihr nicht in gerader Richtung gegenüberlag, [...]. Und so verstand ich, was mir sehr schwierig erschienen war, wie ein auf einer Fläche senkrechter Lichtstrahl beim Eintritt in den durchsichtigen Körper gebrochen werden konnte, indem ich sah, dass die an der Öffnung AB angelangte Welle RC fortfuhr, sich von dort nach vorwärts zwischen den Parallelen AN, BQ fortzupflanzen, während sie selbst gleichwohl immer parallel zu AB blieb, so jedoch, dass hier das Licht nicht in Linien senkrecht zu seinen Wellen sich fortpflanzt, wie bei der gewöhnlichen Brechung , sondern diese Linien zu den Wellen schief stehen.

Klausuraufgabe 2001

Vorgeführt wurden Versuche zur Farbzerlegung am Prisma, die Brechung von Wellenfronten in der Wellenwanne und eine Simulation der Brechung von Wellenfronten an einer Grenzfläche (ppt-Kioskpräsentation), daran wurde das Brechungsgesetz analog zur Huygens hergleitet. Diese konnte während der Klausur beliebig genutzt werden.

DAZU Text G

Aufgabe 2:
Zu Versuch 1 (Farbzerlegung)

a) Das verwendete Prisma ist symmetrisch, d.h. es hat drei Winkel von jeweils 60° Größe. Das Licht fällt unter einem Winkel von 40° ein, für das Glas ist in einem Tabel-lenwerk ein Brechungszahl*bereich* von 1,57 bis 1,69 angegeben. Äußere dich auf der Basis dieser Angaben möglichst genau zum Verlauf des Lichtes hinter dem Prisma.
b) Fasse NEWTONs Kernaussagen über Farben nach dem Brief an die Royal Society (siehe rechts) zusammen und stelle den Zusammenhang zum vorgeführten Versuch her. Lassen sich Newtons Aussagen mit dem vorgeführten Versuch nachweisen?

Aufgabe 3:

Zu Versuch 2 (Brechung von Wasserwellen)
a) In einer Simulation (auf den Computern zu finden) wird die Brechung von Wasser-wellen dargestellt. Erläutere und begründe den Brechungsvorgang damit, leite mit Hilfe der dort angegebenen Skizze ein Brechungsgesetz für Wasserwellen her.
b) Übertrage diese Interpretation auf Licht: Damit hast du ein neues Modell (Wellen-modell des Lichts) geschaffen.

Aufgabe 4:

Lichtmodelle und ihre Anwendung
Du kennst bisher die Lichtmodelle von DESCARTES, NEWTON und FERMAT, in Aufgabe 3) hast du ein neues WELLENMODELL geschaffen, dessen Anwendung zur Erklärung von Lichteigenschaften wir noch nicht besprochen haben.

a) Beschreibe die Grundlagen der Modelle kurz (sofern nicht bereits vorher gesche-hen) und erläutere in diesem Zusammenhang, was wir unter einem Modell verstehen. Wie erklären die einzelnen Modelle bekannte Eigenschaften von Licht bzw. wie kön-nten sie diese erklären bzw. welche Eigenschaften lassen sich überhaupt nicht erklä-ren? Arbeite dabei auch Gemeinsamkeiten und Unterschiede der vier Modelle heraus und gib abschließend begründet an, welches Modell dir als das beste erscheint.
c) Leite das Brechungsgesetz nach DESCARTES/NEWTON und FERMAT her (wie im Unterricht besprochen). Für das WELLENMODELL findet sich die Herleitung in Aufgabe 3)b). Vergleiche die jeweiligen Endergebnisse dieser Herleitungen mitein-ander. Wie könnte man damit prinzipiell beweisen, welches das richtige Modelle ist, oder ist ein derartiger Beweis damit nicht möglich?
d) Wie wird das Phänomen „*Farbe*“ in den Modellen erfaßt bzw. wie könnte es erfaßt werden (siehe auch rechts)? Erscheinen dir die Erklärungen sinnvoll?
e) Wie wird das Phänomen „*Totalreflexion*“ in den Modellen erfaßt bzw. wie könnte es erfaßt werden (siehe auch rechts)? Erscheinen dir die Erklärungen sinnvoll?

Klausuraufgabe 2001

Das Phänomen Polarisation ist für die Lerngruppe neu, jeder Schüler kann sich für die Aufgabe drehbare Polarisationsfilter holen. Es muss zur vollständigen Lösung erkannt werden, dass eine Lichtquelle Licht aller Polarisationsrichtungen aussendet, das also das Experiment in Abb. 230.2 nur dann ausführbar ist, wenn ein Polarisationsfilter vor die Lichtquelle gehalten wird um eine Welle wie links hinter der Hand zu erzeugen.

DAZU Textsammlung I

Aufgabe 2:
a) Erkläre die Phänomene "Beugung" und „Brechung“ mit dem Wellenmmodell von HUYGENS, charakterisiere dazu dieses Modell knapp.

....

Aufgabe 3:
a) Betrachte eine Lichtquelle durch die Polari-sationsfilter, be-schreiben Deine Experimente und gib Deine Beobachtungen an (vergl. auch Aufgabenteil b).

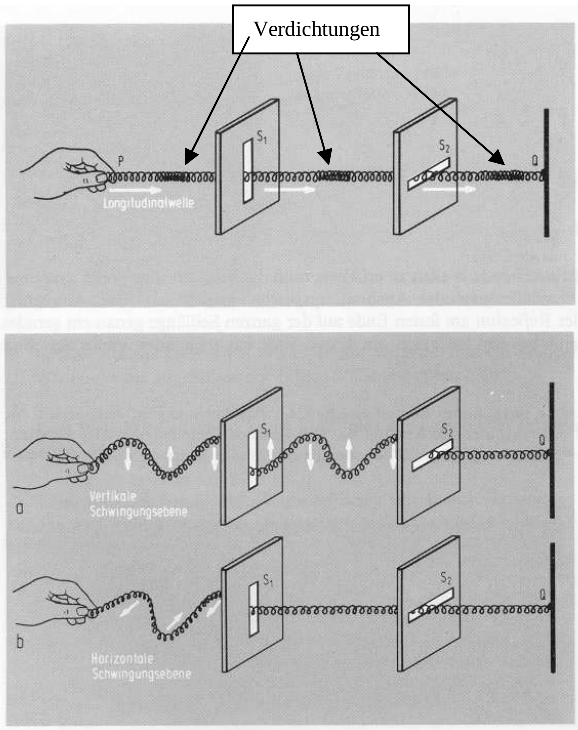


Abb. 230.1
Die Ausbreitung von Longitudinalwellen durch Spalte mit verschiedenen Orientierungen

Abb. 230.2
Die Ausbreitung von Transversalwellen durch Spalte mit verschiedenen Orientierungen

b) Leite ausder Zeichnung rechts eine Deutung der Po-larisation im Wellenmodell ab und untersu-che, ob Deine Beobachtungen aus 3a) damit in Einklang stehen. Übertrage diese Deutung auf Licht und kläre, inwieweit das Wellenmodell von HUYGENS dafür abgeändert werden muß. (Der Originaltext von HUYGENS liegt aus)

c) In der Textsammlung [I] äußern sich verschiedene Physiker zur "Polarisation". Ordne die einzelnen Physiker den entprechenden Modellvorstellungen zu und entnimm den Texten die Erklärung in den jeweiligen Modellen, sofern vorhanden. Warum war es so problematisch für einige Autoren, gerade transversale Lichtwellen zu akzeptieren ? Und warum fehlen eigentlich Texte von DESCARTES und FERMAT in dieser Liste?

Klausuraufgabe 2004

Vorgeführt wurden Versuche zur Farbzerlegung am Prisma, dabei wurde in einem Teilversuch mit einem spalt ein kleiner Farbbereich ausgeblendet und mit einem weiteren Prisma analysiert.

Dazu Text G (ohne Passage Totalreflexion) und Text H ohne Bild,
Für einen Nachschreibtermin erhielt der Schüler eine Apparatur zur Erzeugung von Newtonringen und den Text H mit Bild

Aufgabe 2:

a) Du kennst bisher 3 Lichtmodelle (NEWTON, DESCARTES bzw. FERMAT). Beschreibe die *Grundlagen* der *drei* Modelle kurz und verdeutlichen dabei, was man unter einem Lichtmodell versteht.

b) Wie werden die Phänomene **„Reflexion“** und "**Brechung**" in den drei Modellen *qualitativ* gedeutet? Leite das Brechungs**gesetz** nach einem der Modelle *exakt* her.

c) Beim Eintritt in Glas wird Licht teilweise reflektiert und teilweise gebrochen. Tammo hat im Unterricht zu recht bemängelt, dass dieses Phänomen durch das Modell von NEWTON nicht erklärt werden kann. Im Text [H] 2 findest du nun eine spätere Erklärung Newtons dazu: Erscheint sie dir vernünftig bzw. mit seinem Modell vereinbar?

d) Die **Lichtgeschwindigkeit** wurde von Rømer 1676 mit ca. $2{,}3 \cdot 10^5$ km/s bestimmt. Berechne daraus -sofern möglich - die Geschwindigkeit des Lichts in Wasser nach den drei Modellen (Brechzahl n = 1,33 für Wasser).

Aufgabe 3: **Farbabhängige Brechung (sog. Dispersion)**

a) Auf Blatt [Text G] findest du einen Brief von NEWTON, darin äußert er sich zu Farben und Licht. Fasse seine Kernaussagen zusammen, wobei du Passagen des Briefes als Belege verwenden sollst (z.B. markieren, nummerieren und dann verweisen). Was war damals (1672) neu an Newtons Behauptungen? Lassen sich Newtons Behauptungen mit dem vorgeführten Experiment [] nachweisen?

b) DESCARTES verwies um 1640 darauf, dass eine Kugel beim Eintritt in Wasser zusätzlich in Rotation versetzt wird (vergl. Text [H] auf Blatt []) und erklärte damit die farbabhängige Brechung. Zur Deutung der farbabhängigen Brechung schlägt NEWTON um 1700 -recht unklar!- vor, in seinem Modell Lichtteilchen „unterschiedlicher Größe" anzunehmen, was später oft auch als "Masse" interpretiert wurde. Erläutere die beidenDeutung und prüfe, ob sie sich sinnvoll in das jeweilige Lichtmodell einfügen. Wie könnte FERMAT in seinem Modell die farbabhängige Brechung sinnvoll deuten?

c) Wir haben gesehen, dass eine sphärische Linse ungünstigerweise keinen exakten Brennpunkt aufweist. Welche(n) zusätzliche(n) ungünstige(n) Effekt(e) erhält man an Linsen durch die farbabhängige Brechung?