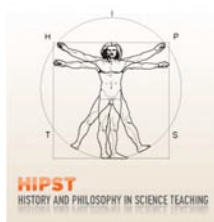


EXKURS ÜBER DIE GESCHICHTE DES SEHENS UND DER BILDENTSTEHUNG: VON PYTHAGORAS BIS KEPLER



Igal Galili
Hebräische Universität von Jerusalem

Jerusalem 2010



EXKURS ÜBER DIE GESCHICHTE
DES SEHENS UND DER BILDENTSTEHUNG:
VON PYTHAGORAS BIS KEPLER

Igal Galili
Hebräische Universität von Jerusalem

E-mail: igal@vms.huji.ac.il

Übersetzung aus dem Englischen ins Deutsche: Imke de Vries

Stichwörter: Bildentstehung, Lichtstrahlen, Sehen, Eidola, Extramission, Intramission, Bildübertragung

Kurzfassung

Dieser Exkurs beschäftigt sich mit dem physikalischen Verständnis der Bildentstehung und des Sehvorgangs. Er richtet sich an PhysiklehrerInnen und SchülerInnen der Sekundarstufe. Der Exkurs beginnt im klassischen Griechenland, wo Wissenschaftler unterschiedliche Theorien der Bildentstehung entwickelten. Diese Theorien boten qualitative Beschreibungen des Phänomens der Bildentstehung. Es handelte sich um holistische (ganzheitliche) Theorien, die das optische Bild eines Objekts als Ganzes betrachteten. Die hellenische Theorie des Euklid, die schon nicht mehr ganzheitlich war, schlug ein „aktives Sehen“ mit Sehstrahlen vor, die die Welt um den Betrachter herum „abscannen“ und so das Sehen ermöglichen. Im Mittelalter schaffte Alhazen, ein angesehener arabischer Gelehrter, den Durchbruch, indem er Bilder in mehrere einzelne Punkte aufteilte, die über die einzelnen zugehörigen Lichtstrahlen Punkt für Punkt zum Auge gelangten. Diese Theorie wurde in der Renaissance weiterentwickelt. Die neue Sichtweise verglich das menschliche Auge mit einer Art Camera Obscura, was allerdings eine Frage offen ließ: die Umkehrung des Bildes. Al-Hazens Mechanismus (das Aufteilen des Bildes in einzelne Punkte) verhalf dem Verständnis des optischen Bildes, aber das Problem der Umkehrung des Bildes wurde schließlich erst während der wissenschaftlichen Revolution des 17. Jahrhunderts in Deutschland von Kepler gelöst. Er erkannte, dass der Lichtfluss für die Bilderzeugung im Auge verantwortlich war. Weiterhin wurde erkannt, dass die Umkehr eines Bildes im Auge eine Interpretationsleistung der menschlichen Wahrnehmung darstellt. Durch die Darstellung der Geschichte der Bildentstehung - von der holistischen Idee des Bildes bis zum durch den Fluss des Lichtes vermittelten und vom Gehirn interpretierten Bild - betonen wir besonders Merkmale der Theorieentwicklung, die ein Licht auf die „Natur der Naturwissenschaften“ werfen. Wissenschaftlicher Fortschritt findet dabei innerhalb eines Diskurses konkurrierender Theorien statt. Physikalisches Wissen entwickelt sich im Rahmen eines komplexen sich steigernden Prozesses und lässt sich nicht durch eine

einfache Gleichung beschreiben.. Zentrale Ideen und Modelle werden modifiziert und Theorien dabei innerhalb von *Konzeptwechsel-Prozessen* neu strukturiert.

Die Vorstellungsforschung über Lernprozesse von SchülerInnen im Bereich Optik zeigt Ähnlichkeiten der Schülerauffassungen zu historischen wissenschaftlichen Auffassungen: die Konkurrenz der Vorstellung der Intramission (Einfall von Licht) und der Extramission (Ausenden von Sehstrahlen durch das Auge), der Gegensatz zwischen einem holistischen oder differentiellen Verständnis der Bildentstehung und zwischen der Idee, Bilder würden durch komplexe Lichtströme oder durch einzelne Lichtstrahlen erzeugt. Wegen dieser Parallelen zwischen historischer Theorieentwicklung und den vorunterrichtlichen Vorstellungen der Lernenden kann ein historischer Exkurs rund um die wissenschaftlichen Debatten über den Sehvorgang, der letztlich zum gegenwärtig für gültig erachteten Wissen führt, einen Beitrag zur Überwindung typischer Fehlvorstellungen leisten. Daraus ergibt sich die Bedeutung dieses historischen Exkurses für das Lernen im Bereich Optik in der Schule.

* * *

Und Gott sprach: Lasst uns Menschen machen, ein Bild, das uns gleich sei, die da herrschen über (...) die ganze Erde und alles Gewürm, das auf Erden kriecht. (Luther Bibel 1912)

(Genesis 1:26¹)

Du sollst dir kein Bildnis machen, keinerlei Gleichnis, weder des, das oben im Himmel, noch des, das unten auf Erden, noch des, das im Wasser unter der Erde ist.

(5 Mose 8²)

Im ersten Zitat werden wir aufgefordert, ein Bildnis von jemandem zu schaffen; im zweiten wird uns das gleiche verboten, also ein Bild von etwas zu erzeugen. Dies ist eine schwerwiegende Aussage, die auf jeden Fall ein Wissen über die Wahrnehmung von Bildern einschließt. Trotzdem erschien es nicht einfach zu verstehen, was ein wahrgenommenes Bild eigentlich ist. Um dies besser verstehen zu können, werden wir uns an der Geschichte des Bildes orientieren.

* * *

I. Das Verständnis des Sehens

Einleitung



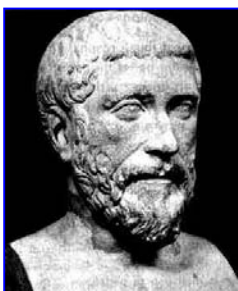
Die optische Bildentstehung befasst sich mit der Erscheinung eines Objektes mit Hilfe von Licht. Sie ist ein Teilbereich der Optik – die physikalische Theorie des Lichts und des Sehens. Im Verlauf einer langen historischen Entwicklung war der Begriff des optischen Bildes für das Verständnis des Lichts und des Sehens zentral. Schon lange bevor sich die Naturwissenschaften formiert haben, hatte sich der Mensch mit dem Verständnis von Bildern, ihrem Ursprung und ihrer Entstehung befasst. Mythen und Sagen umfassten bereits verschiedene Bild-Vorstellungen; die wissenschaftliche Erforschung der Bildentstehung allerdings ist durch die Art des Wissen, das sie hervorgebracht hat, und die Art und Weise der Etablierung dieses Wissens einzigartig. Genau

¹<http://bibeltext.com/genesis/1-26.htm>

² <http://www.bibel-online.net/buch/05.5-mose/5.html>

dies wollen wir hier darstellen. Die Erforschung der Natur des Lichts und der Natur des Sehvorgangs waren mit Beginn der Entwicklung der Naturwissenschaften (Naturphilosophie) im klassischen Griechenland bereits von Anfang an miteinander verwoben. Lange später, nämlich erst im Rahmen der wissenschaftlichen Revolution des 17. Jahrhunderts, wurden sie in eine Physik des Lichts und eine Psychophysik der Wahrnehmung, wie wir sie heute kennen, aufgespalten. Entsprechend werden wir uns im Folgenden sowohl mit wichtigen Ideen von Menschen befassen, die zum Verständnis des Lichts als auch zum Verständnis des Sehvorgangs beigetragen haben.

Hellenische Wissenschaft



Pythagoras

Die Naturwissenschaften wurden im klassischen Griechenland begründet, wo sich das Wissen noch in Form von Mythen entwickelte. Die ersten Wissenschaftler dieser Zeit lieferten mindestens vier miteinander konkurrierende Theorien des Sehens. Die erste Theorie wurde von der Schule Pythagoras' eingeführt. Hippokrates

von Chios (5. Jahrhundert v. Chr.) und Archytas von Tarentum (4. Jahrhundert v. Chr.) versuchten den Sehprozess mit einer Abstrahlung des Auges zu erklären. Die sogenannte *opsis*, ein internes Feuer, strahlt von den Augen des Betrachters aus, gelangt zu den betrachteten Objekten und verursacht so das Sehen. (Abb. 1). Wegen der Tätigkeitsrichtung im Sehprozess wurde diese Theorie Extramission genannt.

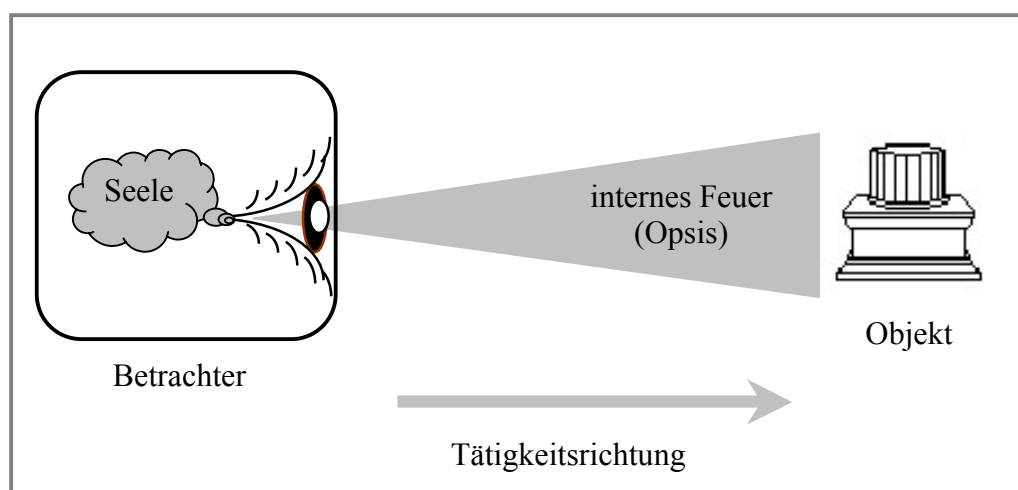


Abbildung 1. Schematische Darstellung der Pythagoräischen Theorie der Extramission

Die Argumentation dieser Auffassung ist durchaus verständlich. Sie versteht den Sehprozess, neben den anderen menschlichen Sinnen Riechen, Hören, Fühlen und

Schmecken als eine Art Tastsinn des Auges (Abb. 2a). Auf ähnliche Weise erklärten sich die Menschen im alten Ägypten das Licht. Lange vor der Entwicklung der Wissenschaft, vor circa 3500 Jahren, glaubten die Ägypter, die Sonne würde ihre „Hände“ ausstrecken und die Umgebung berühren und erwärmen (Abb. 2b).

Die pythagoräische Theorie des Sehens lehnte sich stark an die Extramissionstheorie an: Der Sehprozess wurde als Tastsinn verstanden, der mithilfe eines Sichtflusses, der aus dem Auge des Betrachters ausstrahlt, realisiert wird.



Abbildung 2b. Ägyptischer Pharaon, der die Sonne anbetet. Bild aus dem 14. Jahrhundert v. Chr.

und Nase, besitzen eine eher konkave Oberfläche. Da das Auge eine konvexe Oberfläche aufweist, schlussfolgerte man, dass es nicht aufnehmen, sondern etwas ausstrahlen muss. Dabei bezog man sich auch auf die Beobachtungen von Tieren, insbesondere Katzen, die bekanntlich bei Nacht ein sehr gutes Sehvermögen haben.

Die Gegner dieser Theorie des aktiven Sehens argumentieren mit solchen Fragen wie „Warum können wir nachts nicht sehen?“ oder „Warum können wir direkt nach

Auch dieses Verständnis erscheint



sinnvoll: **Abbildung 2a.** Der Großteil unserer Sinne geht von Berührung aus. Funktioniert das Sehen so? Zeichnung aus einem Text Descartes' aus dem Um 17. Jahrhundert.

ein Objekt überhaupt sehen zu können, muss der Betrachter zuerst seinen Blick auf das Objekt richten und fokussieren. Zusätzlich begründeten die Anhänger des „aktiven Sehens“ - was für uns heute womöglich

merkwürdig erscheint - ihre Theorie mit der konventionellen Form des Auges.

Andere Sinnesorgane, wie zum Beispiel Ohren



dem Öffnen der Augen trotzdem die Sterne sehen, obwohl sie so weit entfernt sind?“ Beide Fragen ließen sich innerhalb dieser Theorie nicht beantworten.

Die zweite Theorie ist auf die Schule der Atomisten von Demokritus zurückzuführen. Sie behaupteten, jeder Körper um uns herum würde eine Art Nachbildung seiner selbst, nämlich ein Bild (*Eidolon*) erzeugen (Abb. 3). Diese Bilder (*Eidola*) bestehen aus Atomen dieses Objektes. Sie treten aus dem Objekt heraus und wandern so lange durch den Raum bis sie in das Auge des Betrachters eintreten und den Sehprozess auslösen. Diese Theorie setzt voraus, dass ein physikalisches Objekt in das Auge des Betrachters eintritt und wird deshalb, gegenüber der Theorie Pythagoras', als Intra-mission bezeichnet.

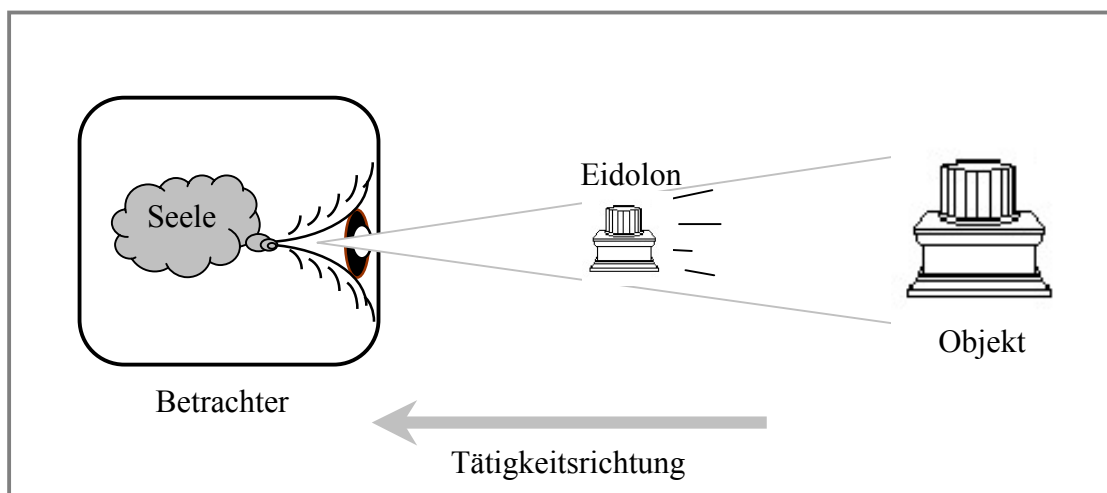
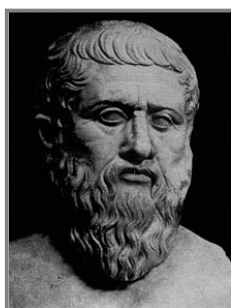


Abbildung 3. Schematische Darstellung der Intramissionstheorie der Atomisten

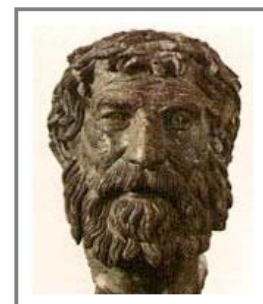
Die Gegner der Theorie der Atomisten argumentierten mit solchen Fragen wie „Wie gelangen die Bilder (*Eidola*) großer Objekte, wie zum Bei-



Plato

spiel von Bergen in das Auge?“ oder „Warum sehen wir keine Bilder von Objekten an Wänden?“ Weiterhin wurde die gleiche Frage, die Pythagoras schon nicht beantworten konnte, erneut gestellt: „Warum können wir bei Nacht

nicht sehen?“ Auch die Atomisten konnten diese Frage nicht beantworten.



Empedokles

Die dritte Theorie geht auf Empedokles (ein berühmter Philosoph aus Elea, griechische Kolonie in Sizilien) und Plato (427-347 v. Chr.) in Athen zurück. Ihr Ansatz kombiniert die beiden oben genannten Ideen. Sie behaupteten, der Sehprozess resultiere aus dem Zusammentreffen von drei Feuern (Abb. 4). Zuerst wäre da das „reine Feuer“ des Tageslichtes, das „nicht vermengt mit anderen primären Objekten“ ist. Im Gegensatz zu Flammen „fliegt es von der Flamme weg und brennt nicht, sondern gibt den Augen ihr Augenlicht“. Zweitens wäre da das „interne Feuer“, mit einem Sichtstrom ähnlich dem des Tageslichtes. Es ist im Augapfel zu finden und kann aus der Pupille ausströmen, um ein betrachtetes Objekt zu erreichen. Drittens ist die Rede vom „externen Feuer“, das von dem betrachteten Objekt ausgestrahlt wird und von der Objektfarbe abhängt. Es besteht aus Teilchen und breitet sich in Richtung des Betrachters aus. Dabei trifft es den Sichtstrom und führt so zu einem Sinneseindruck.³

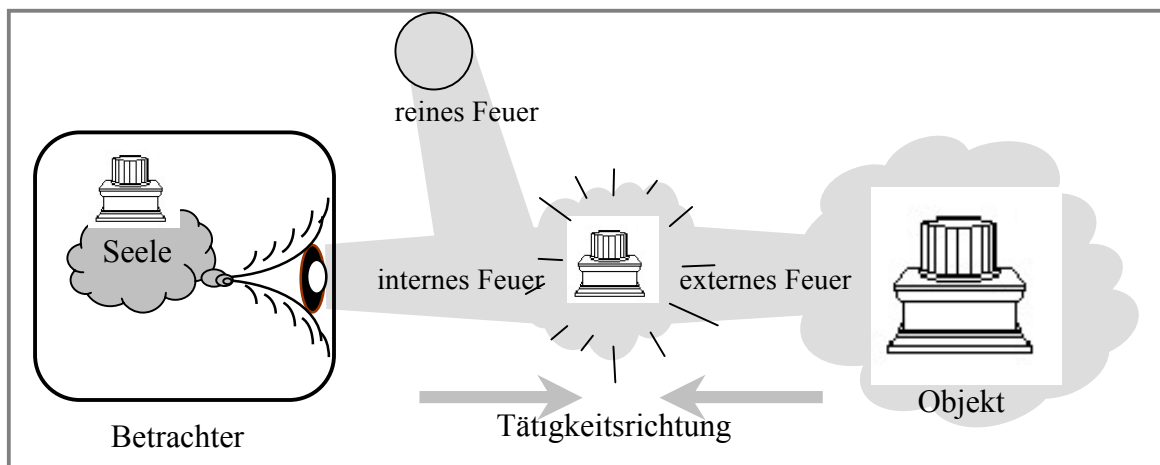


Abbildung 4. Schematische Darstellung der Mischtheorie des Sehens von Empedokles und Plato



Im Gegensatz zu den bisher genannten Theorien findet der Sehprozess in der Empedokles-Plato-Theorie nur unter dem Einfluss von Licht (“pure fire diffused in the air by sun”) und mithilfe des internen Feuers des Betrachters statt. Das Umgebungslicht veranlasst die Ausstrahlung des Feuers des erleuchteten Objektes.

Auch die *vierte* Theorie, die von Aristoteles (384 – 322 v.

³ Conford, M. (1937). Plato's Cosmology. The Timaeus of Plato. The Bobbs-Merrill Co., Indianapolis, New York, S.152.

Chr.)⁴ aufgestellt wurde, war sehr kreativ. Dabei handelte es sich um eine Intramissionstheorie des Sehens (der Betrachter empfängt über die Sinnesorgane, die Augen). Dabei unterschied Aristoteles Farbe– ein den Objekten innewohnendes Merkmal – von Licht. Das Licht verstand er als ideelles Mittel und als Auslöser für das Medium (Luft, Glas, Wasser) um den Sehprozess zu ermöglichen. (Abb.5).

Laut Aristoteles wird durch die *Farbe* des betrachteten Objektes ein bestimmter Druck im Medium zwischen Objekt und Betrachter (meist in der Luft) erzeugt. Dieser Druck erreicht den Betrachter und wird von seinen Augen wahrgenommen. Die Abwesenheit von Farbe bedeutet offensichtlich auch, dass ein Objekt transparent ist und nicht gesehen werden kann. Die Farben liegen auf der Oberfläche eines Objektes und bringen das transparente Medium in einen Spannungszustand.

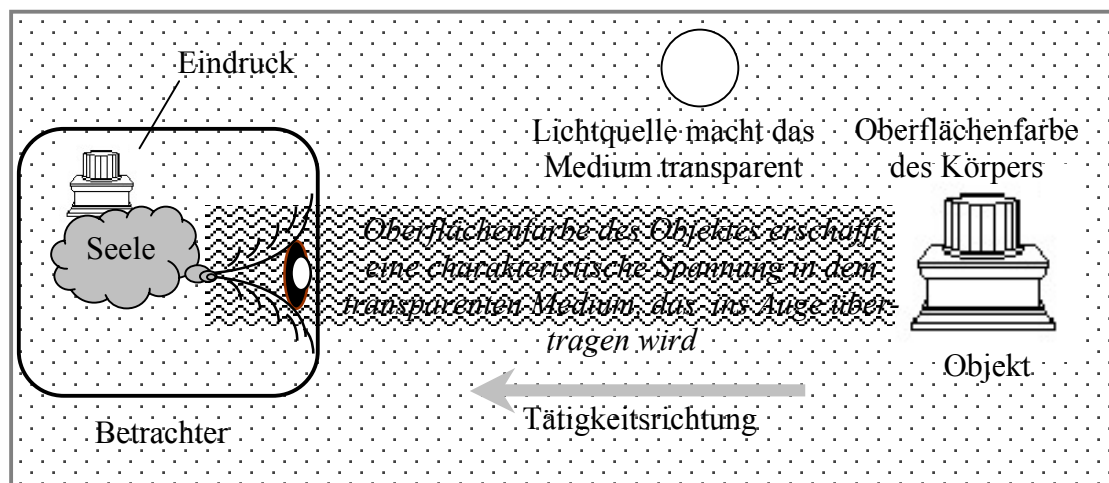


Abbildung 5. Schematische Darstellung der Intramissionstheorie des Sehens von Aristoteles

Innerhalb des Auges läuft dieser Prozess weiter, erreicht die Seele des Betrachters und verursacht so den Sehprozess – die visuelle Wahrnehmung des ursprünglichen Objektes. Es handelt sich bei dieser Theorie also um eine Intramissionstheorie mit einem Vermittler. Den Beweis, dass ein Vermittler gebraucht wird, sah Aristoteles in der Tatsache, dass man kein Objekt sehen kann, das zu nah an das Auge gehalten wird. Aus diesem Grund sind Raum und Luft zwischen Objekt und Betrachter notwendig. Griechische optische Theorien behaupteten, das Auge wäre flüssig, doch zu diesem Zeitpunkt war die Linse noch nicht erkannt worden.

⁴ Aristoteles' Überlegungen zum Sehprozess waren nicht konsistent. Interessanterweise war aber gerade Konsistenz beim Aufbau wissenschaftlicher Erkenntnisse sein zentrales Anliegen. Zur Erklärung des Regenbogens machte er von Sehstrahlen gebrauch, die eigentlich zur Extramissionstheorie gehören. Eventuell lassen sich aber diese Überlegungen auf einen anderen Angehörigen der Aristotelischen Schule zurückführen.

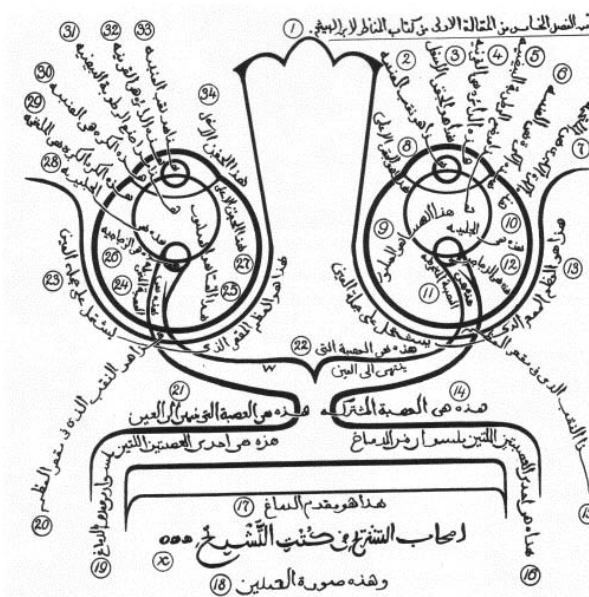
Reflexionsfragen:

1. Diskutieren Sie die Argumente für jede der vier griechischen Theorien des Sehens.
2. Notieren Sie die Einschränkungen, die jede dieser Theorien aufweist.
3. War es möglich eine einzige Präferenz für eine dieser Theorien zu haben und die anderen zu widerlegen? Erklären Sie.

Hellenistische Wissenschaft

Die vier hellenischen Theorien beschrieben verschiedene Arten von Beziehungen zwischen Betrachter, Medium und dem gesehenen Objekt. Im Laufe der darauffolgenden Zeitspanne, der hellenistischen Kultur, trieben Wissenschaftler die oben genannten Erforschungen des Sehens weiter voran, erstrebten aber eine noch detailliertere Darstellung und einen noch besser verstandenen Mechanismus des Sehprozesses. Diese Tendenz führte zu neuen Untersuchungen und noch anspruchsvolleren Theorien der Beschreibung des Auges und des Sehens.

Allgemein lehnte sich die hellenistische Kultur gegen die allgemeinen philosophischen Vorlieben der hellenischen Wissenschaft auf. Die Gelehrten waren mit den holistischen, quantitativen Darstellungen des Sehprozesses nicht zufrieden und überdachten sie neu. Die Wissenschaftler der hellenistischen Welt erstrebten konkretere Informationen über das Verhalten des Lichts und den Sehprozess. Dieses Bestreben erforderte eine aktivere Erforschung und eine neue Methodik um ausführlichere Darstellungen von Naturphänomenen machen zu können.⁵



Die Struktur des Auges, wie sie von Galen nachgewiesen und in Arabisch ein paar hundert Jahre festgehalten wurde

⁵ Die hellenistische Periode bot eine eindrucksvolle Auflistung an Gelehrten: Aristarchus, Euclid, Archimedes, Heron, Ptolemy, Hipparchus, Eratosthenes und viele mehr. Alle leisteten im Wesentlichen mit wissenschaftlichen Untersuchungen, Analyse, Messungen, Erfindungen und Konstruktionen ihren Beitrag. Sie blieben dabei jedoch im Allgemeinen innerhalb des hellenischen philosophischen Rahmen der vorangegangenen Periode.

* * *

Galen war ein berühmter griechischer Physiker im Römischen Reich des zweiten Jahrhunderts. Er eignete sich ein beachtliches Wissen an, indem er Operationen an



kranken und verletzten Menschen durchführte. Dem Anschein nach war er der Erste, dem es gelang, die anatomische Struktur des menschlichen Auges korrekt zu beschreiben und seine Bestandteile zu identifizieren: Hornhaut, Iris, Pupille, Linse, Humor vitreus (Flüssigkeit im Stroma des Glaskörpers) und Humor aquosus (Kammerwasser) und Netzhaut.

Claudius Galenus
(129-199)

Er identifizierte die Flüssigkeiten, die das Sehorgan ausfüllen (vitreus und aquosus) und schrieb, anhand seiner medizinisch-praktischen Erfahrungen, der Linse die grundlegende Rolle im Sehprozess zu. Einer seiner wichtigsten Befunde war die nachgewiesene Verbindung der Netzhaut mit dem Gehirn. Daraufhin wurde das Gehirn erstmals als Hauptsitz der visuellen Wahrnehmung in den Sehprozess miteinbezogen.

Galen übernahm den zu der Zeit neuen Ansatz der Stoiker, die die zentrale Bedeutung im Sehprozess dem *Pneuma* zuwiesen. Das *Pneuma* beschrieben sie als einen alles durchdringenden aktiven Stoff, der sich aus Luft und Feuer zusammensetzt und das ganze Universum ausfüllt. In Bezug auf das Sehen ähnelte diese Idee der Aristotelischen Theorie, in der das transparent gewordene Medium auch eine zentrale Rolle spielte. In der stoischen Physik war das *Pneuma* jedoch ein aktiveres Medium, das die Wahrnehmung mit einschloss.

Nach Galens Auffassung strömt das *Pneuma* aus dem Gehirn aus und gelangt über den Sehnerv ins Auge (Abb. 6). Sobald das *Pneuma* mit der Luft in Berührung kommt, verändert es sich und wird Teil der visuellen Wahrnehmung, vergleichbar mit dem Tastsinn. Obwohl dieses Szenario einen Vermittler, nämlich das *Pneuma*, mit einschließt, war es immer noch dichter am Extramissionsprozess. Galen war mit der Idee der Intramission eines Bildes eines betrachteten Objekts, das physisch ins Auge gelangt, nicht einverstanden. Dies begründete er damit, dass die Größe der Pupille unvereinbar sei mit sehr großen Objekten: Wie kann das Bild eines Berges irgend möglich in das Auge eines Betrachters eintreten?

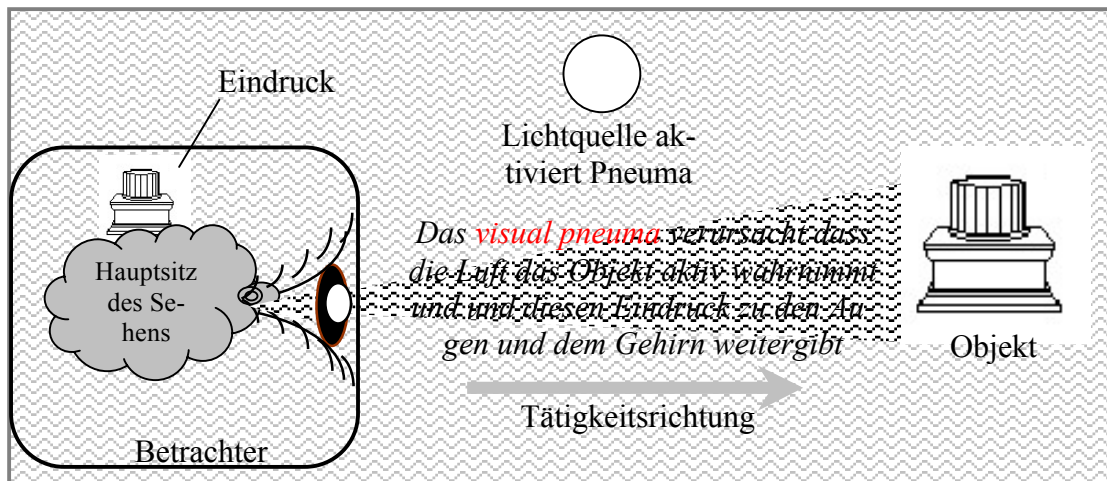


Abbildung 6. Schematische Darstellung von Galens Extramissionstheorie des Sehens

Euklid war ein berühmter Mathematiker der hellenistischen Wissenschaft. Seine Geometrie lernen wir heute noch in der Schule. Er leistete seinen eigenen Beitrag zu dem Verständnis des Sehprozesses und des Lichts, der revolutionär war. Er übernahm das Gerüst der Extramissionstheorie mittels Sichtfluss, definierte sie neu und führte das Konzept der *Strahlen* ein. Euklid beschrieb zwei Arten von Strahlen: Sehstrahlen und Lichtstrahlen. Beide sind grundlegende Begriffe seiner Theorie des Lichts und des Sehens. Das Licht bestand ihm zufolge aus Lichtstrahlen. Das Sehen beschrieb er als einen Prozess, bei dem der Betrachter Sehstrahlen aussendet und so seine Umgebung „ausliest“. Euklid setzte dabei voraus, dass Lichtstrahlen und Sehstrahlen den gleichen Verhaltensgesetzen unterliegen. Seine Theorie, die die Erfahrung des Sehens erklärte, erinnerte an seine berühmte Geometrie. Der Betrachter tastet seine Umwelt mithilfe von Sehstrahlen ab (Abb. 7). Das Strahlenkonzept strukturierte das „innere Feuer“ der pythagoräischen Philosophen und lieferte ein starkes Hilfsmittel für die grafische Darstellung des Sehens. Tatsächlich begründete die Darstellung mithilfe von Strahlen die Theorie der Perspektive – eine ebene, zwei-dimensionale Repräsentation der dreidimensionalen Realität. Dieser Ansatz erklärte beispielsweise, warum wir alle entfernten Objekte kleiner sehen. Auch erklärte es, wie man die betrachtete Realität aufs Papier bringen kann, sodass die Zeichnung dem Betrachter als dreidimensional und nicht als eben erscheint.

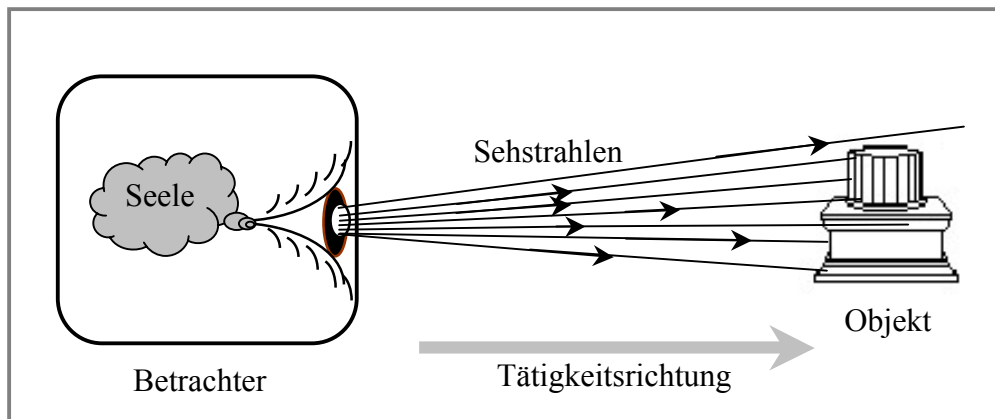


Abbildung 7. Schematische Darstellung von Euklids Verbesserung der Extramissionstheorie des Sehens. Das Auge des Betrachters tastet die Objekte mittels Sehstrahlen ab..

Die großen Geister der hellenistischen Wissenschaft – Heron, Archimedes und Ptolemäus – erforschten die Regeln, denen Licht und Sehstrahlen beim Phänomen der Reflexion und Brechung unterliegen. Auf diese Weise formulierten und bewiesen Heron und Archimedes das Reflexionsgesetz (basierend auf der Voraussetzung, dass die Wegstrecke minimal (Heron) und umkehrbar (Archimedes) ist): Die Licht- und Sehstrahlen liegen in einer Ebene und Einfallswinkel und Ausfallswinkel müssen gleich groß sein (Abb. 8a). Ptolemäus, der ebenso die Idee der visuellen Strahlen übernahm, erforschte als Erster experimentell das Gesetz der Brechung von Licht- (und Seh-) strahlen – die Richtungsänderung an der Grenze zwischen zwei verschiedenen transparenten Materialien. Obwohl Ptolemäus nicht die korrekte funktionale Abhängigkeit zwischen Einfallswinkel und Brechungswinkel nachweisen konnte, konnte er aussagen, dass bei vergleichsweise kleinen Winkeln das Verhältnis konstant bleibt und die Größe von der Art des Materials abhängt, in die das Licht eintritt und das es verlässt (Abb. 8b).

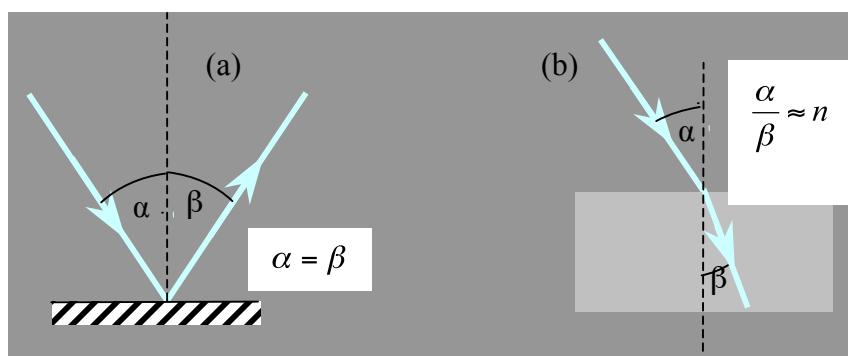
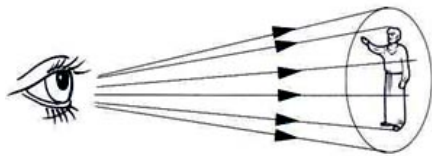


Abbildung 8. Die nachgewiesene Regelmäßigkeit des Sehens und der Lichtstrahlen beim Prozess der Reflexion (a) und der Brechung (b).

Obwohl das Verhalten von Strahlen (Licht- und Sehstrahlen) außerhalb des Betrachters erforscht wurde, fragte sich niemand, was genau mit den Strahlen, die das Bild innerhalb des Auges des Betrachters erzeugen, passiert.

Reflexionsfragen

1. Diskutieren Sie die charakteristischen Merkmale der hellenistischen Theorien des Sehens (Euklid, Galen, Ptolemäus). Vergleichen Sie sie auch mit den Theorien, die bisher beschrieben wurden. Formulieren Sie die Grundprinzipien und die zentralen Ideen dieser Theorien.



2. Diskutieren Sie Pro und Contra mit Hinblick auf jede einzelne hellenistische Theorie des Sehens.

* * *

Muslimische Wissenschaft des Mittelalters

Während des neunten Jahrhunderts bewegte sich das Zentrum wissenschaftlicher Forschung in Richtung der muslimischen Welt. Zu diesem Zeitpunkt war Europa in zahlreiche Kriege verwickelt und ermangelte jeder Stabilität. Zu dieser Zeit wurde ein bemerkenswerter Fortschritt im Bereich des Sehens und des Lichts geschafft.



Al-Kindi

Alles begann mit Al-Kindi, einem berühmten arabischen Gelehrten des 9. Jahrhunderts, der ein wichtiges Prinzip formulierte: Licht strömt von jedem Punkt einer Quelle in alle möglichen Richtungen. Diese Behauptung war



Abbildung 9a. Verstoß gegen das Prinzip der Lichtausströmung Al-Kindis in einer alten ägyptischen Zeichnung der Sonne

in der Vergangenheit scheinbar nicht offensichtlich gewesen. (Abb. 9a).

Eine wichtige Erweiterung dieses Prinzips wurde von einem anderen großen arabischen Gelehrten – Abu Ali al-Hasan ibn al-Haytham – im 11. Jahrhundert formu-

liert. Er stellte hinsichtlich jedes betrachteten Objekts die gleiche Behauptung auf, (Abb. 9b), nämlich:

Jedes Objekt, sei es Licht ausstrahlend oder reflektierend, verursacht von jedem seiner Punkte Lichtausstrahlung in alle Richtungen.

Dieses Prinzip könnte als Widerspruch zum Gesetz der Lichtreflektion verstanden werden (Abb. 8a). Es kann aber damit erklärt werden, dass Unebenheiten auf den Oberflächen gewöhnlicher Objekte mehrfache Reflektionen von jedem kleinen Teil verursachen, die insgesamt wie eine Ausstrahlung des Lichts in alle Richtungen erscheinen. (Abb. 9b). Dieses Verständnis war für den weiteren Fortschritt bei der Lösung des Rätsels des Sehens sehr wichtig.

Ein Durchbruch beim Verständnis des Sehens gelang im 11. Jahrhundert und führte auf Abu Ali al-Hasan ibn al-Haytham, oder Al-Hazen, wie er in Europa bekannt ist, zurück.

Zuerst übernahm er den Begriff des Lichtstrahls und verstand Licht als eine Menge an Lichtstrahlen. Dies war ein gewagter Ansatz, um optische Phänomene genauer zu erklären. Als Zweites ließ er die Idee des Sehstrahls fallen und nahm eine eindeutige Position zu Gunsten der Intramissionstheorie an. Er behauptete, unser Sehvermögen sei auf das Licht zurückzuführen, das in das Auge des Betrachters eintritt.

Er begründete dies damit, dass es für uns schmerzhaft sei, direkt in die Lichtquelle, wie z. B. die Sonne, zu schauen (direkt in die Sonne zu schauen ist sehr gefährlich!). Weiterhin erwähnte er den bekannten Effekt des Nachbildes (wenn man ein Objekt ungefähr eine Minute betrachtet und dann die Augen

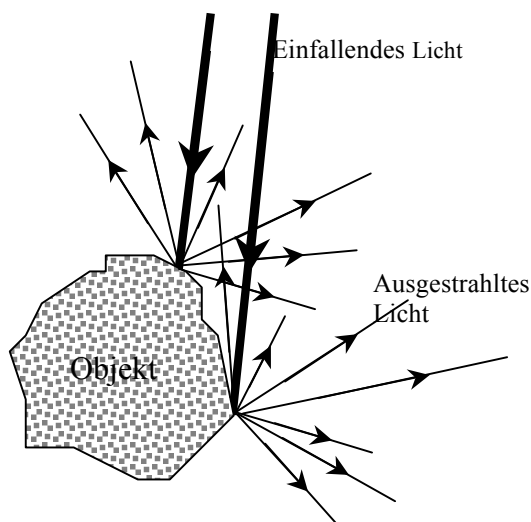
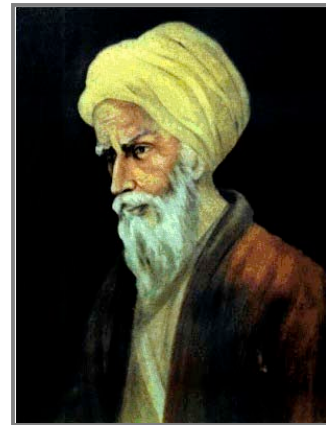


Abbildung 9b. Veranschaulichung des Prinzips Al-Kindi – Al Hazens: Licht strömt von jedem Punkt eines betrachteten Objekts in alle Richtungen aus.



*Al-Hazen
(965-1039)*

schließt, hat man immer noch das Gefühl, das Bild zu sehen).

Deshalb erwog Al-Hazen, dass von den Augen keine Sehstrahlen ausströmen. Das Licht, das in alle Richtungen von dem betrachteten Objekt ausströmt, reicht aus, um unseren Sehprozess zu ermöglichen und die Prozesse zu erklären, die durch Lichtstrahlen geleistet werden. Nur wie genau kann man das tun?

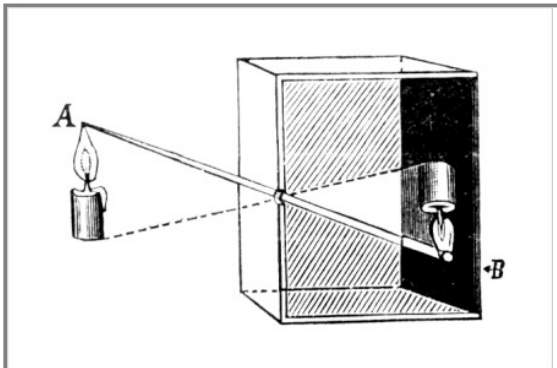


Abbildung 10. Schematische Darstellung der Camera Obscura.

Nur wie genau kann man das tun?

Um überzeugen zu können, musste Al-Hazen über eine bloße Idee hinaus gehen und einen Sehmechanismus formulieren. Um die Natur seiner Analyse, die Al-Hazen übernommen hatte, zu verstehen, nutzte er das Wissen, das lange vor ihm von Euklid, Heron, Archimedes und anderen hellenistischen Gelehrten in Alexandria aufgebaut worden war. All diese Gelehrten machten von der gradlinigen Ausbreitung des Lichtes Gebrauch. Al-Hazen begann dies empirisch zu beweisen, indem er ein besonderes Instrument benutzte – die Camera Obscura – ein dunkler Raum mit einer kleinen Öffnung in einer der Wände (Abb. 10).

Seit der Zeit Aristoteles' war es bekannt, dass man auf der Wand gegenüber eines sehr kleinen Loches ein Bild der Dinge sehen kann, die sich vor der Wand befinden. Al-Hazen verstand, dass dieses Bild mithilfe von zwei Präpositionen erklärt werden kann:

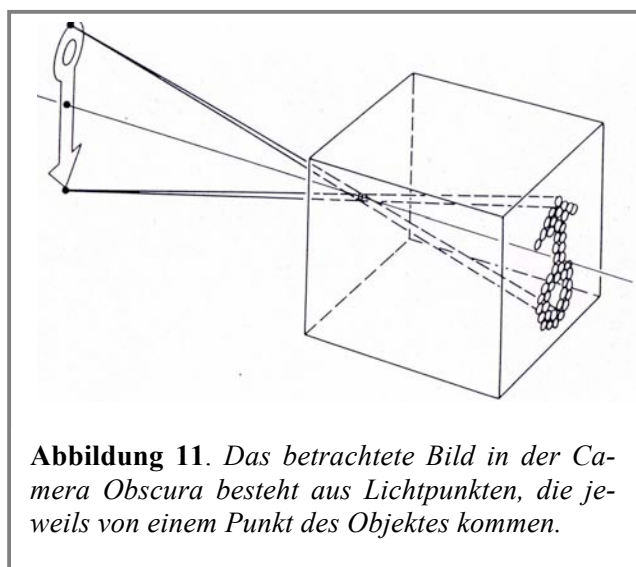


Abbildung 11. Das betrachtete Bild in der Camera Obscura besteht aus Lichtpunkten, die jeweils von einem Punkt des Objektes kommen.

1. Jeder Punkt jedes beleuchteten Objektes sendet Licht in alle Richtungen und

2. Lichtstrahlen sind nur gerade Linien.

In der Tat strahlt jeder Punkt des Objektes Licht in alle Richtungen ab und nur ein Bruchteil dieses Lichts schafft es, durch das kleine Loch in der Wand zu gelangen (Abb. 10). Es verursacht einen

Lichtpunkt auf der gegenüberliegenden Wand der Kamera.

Alle diese Punkte zusammen bilden das betrachtete Bild (Abb. 11). Das Neue an dieser Idee: Bilder wandern nicht als *ein Ganzes* durch den Raum um gesehen zu werden. Es reicht aus, dass jeder einzelne Punkt des Objektes einen beleuchteten Punkt erzeugt. Alle diese Punkte zusammen bilden eine beleuchtete Fläche auf der Wand und erzeugen eine Nachbildung des Objektes – das optische Bild.

Auf dieser Idee basierend konnte Al-Hazen den Sehprozess überdenken, stand aber einem unmittelbaren Problem gegenüber. Wenn jeder Punkt des Objektes mehrere Strahlen zum Auge sendet, wie kann es dann sein, dass diese Vielzahl an Strahlen im Auge nicht durcheinander geraten? Schließlich können wir ein klares und fokussiertes Bild wahrnehmen. Al-Hazen überlegte sich dazu, dass die Strahlen auf irgendeine Art selektiert werden müssten.

Al-Hazen wusste, dass das Licht seine Richtung ändert, wenn es in ein transparentes Medium irgendeines Materials einfällt (Ptolemäus von Alexandria, der Al-Hazen auch bekannt war, berichtete über die Brechung des Lichts und erbrachte sogar numerische Daten dazu). Jedoch wurde alles Licht seitwärts abgelenkt, bis auf das Licht, das senkrecht auf die Oberfläche einfällt. Al-Hazen nahm an, dass nur diese Strahlen (die im rechten Winkel auf die Oberfläche einfallen) für das Sehen relevant seien: sie treten durch die Netzhaut ins Auge ein (konvexe Oberfläche des Auges) und gelangen weiter in Richtung Linse. Wie auf der Wand der Camera Obscura wird auf der Linse das Bild erzeugt (Abb. 12). Die Strahlen 1 und 2 in der folgenden Abbildung bilden die Punkte **a** und **b** des Objektes auf den Punkten **a'** und **b'** des Bildes ab. Wir fassen zusammen:

Bei der Bildentstehung werden (laut Al-Hazen) die Punkte des Objektes mithilfe von Lichtstrahlen zu den Punkten des Bildes auf der Oberfläche der Linse „übertragen“. Diese Punkt-zu-Punkt-Übertragung erfolgt jeweils mithilfe eines einzelnen Lichtstrahls.

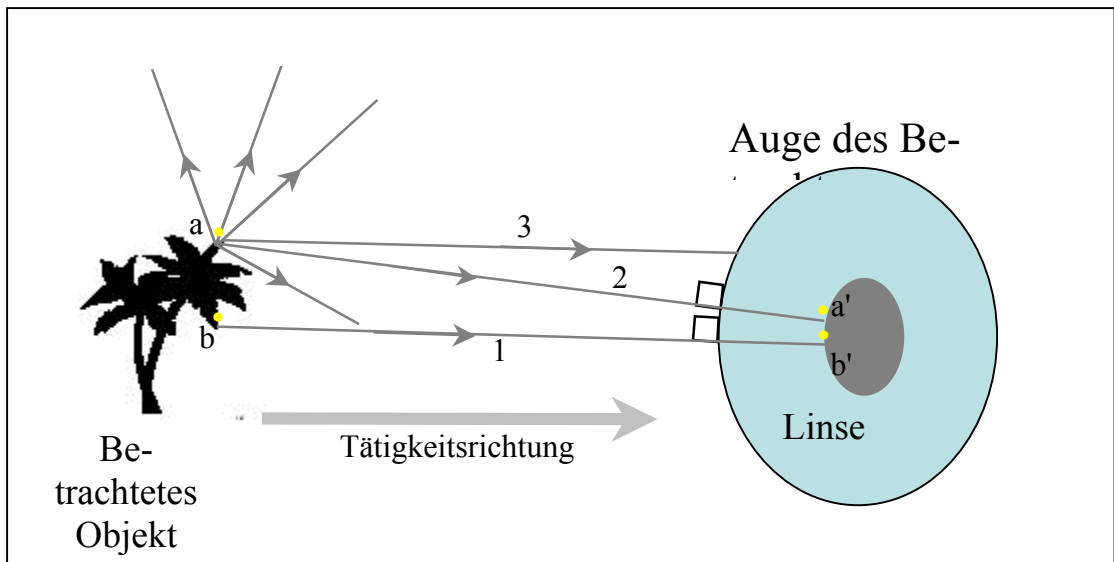


Abbildung 12. Schematische Darstellung des Sehmechanismus nach Al-Hazen. Strahlenselektion: Strahlen 1 und 2 stehen senkrecht zu der Oberfläche des Auges und treten ins Auge ein, Strahl 3 ist schief und demnach irrelevant für die Bildentstehung im Auge.

Eine Frage bleibt trotzdem offen: Warum endet bei Al-Hazen das ganze Szenario der Bildentstehung auf der Linse? Ihm nach ist die Linse so ein sensibles Sehorgan, dass sie Strahlen nicht durchbrechen lässt, um zur Netzhaut zu gelangen.

Einer der Gründe dafür, wenn nicht sogar der einzige Grund, war die Tatsache, dass, wie bei der Camera Obscura, das Bild, das hinter der Linse gesehen wird, umgekehrt ist. Diese Tatsache könnte Al-Hazen verunsichert haben, da sie seinen eigentlichen Beobachtungen widersprach, nämlich Bildern von betrachteten Objekten, die richtig herum sind.

Al-Hazens optische Abhandlungen: *Kitab al-manazir (The Book of Optics; De aspectibus or Perspectivae)*, erreichten bald die Gelehrten im Westen Europas. Im 13. Jahrhundert inspirierte er Roger Bacon in Oxford bei seinen optischen Erforschungen. Die Abhandlung wurde ins Lateinische übersetzt und wurde bekannt unter den Gelehrten des Mittelalters. Sie übernahmen nicht nur Al-Hazens neues Wissen, sondern reproduzierten es außerdem experimentell und verbreiteten das neue Wissen über die Optik durch Lehrbücher, wie zum Beispiel im 13. Jahrhundert: das Manuskript von *Perspectiva* von Witelo (Abb. 13) und *Perspectiva Communis* von Pecham.

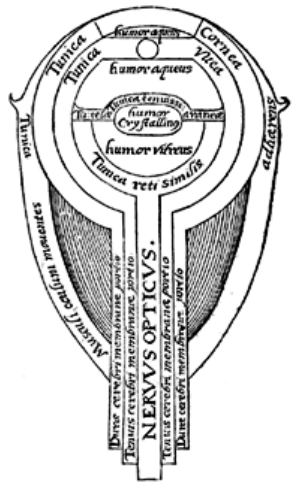


Figure 14. Alhazens Sicht des Aufbaus des Auges, dargestellt in Witelos *Perspectiva*. Beachten Sie, dass die Augenlinse irrtümlicherweise im Zentrum des Auges liegt.

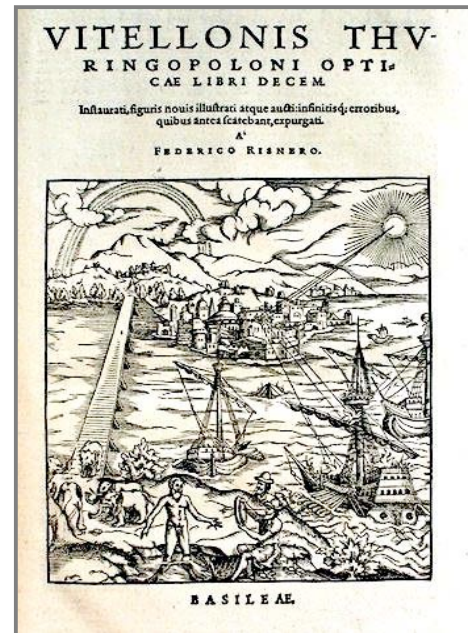


Abbildung 13. Das Deckblatt von Witalos Traktat *Perspectiva* als Lehrbuch wurde 1572 in Basel veröffentlicht. Es basierte hauptsächlich auf Al-Hazens Optik und brachte diese nach Europa.

Witelos Buch war besonders beliebt und blieb im Bereich der Bildung des mittelalterlichen Europas über vierhundert Jahre lang das dominante Werk. Es behandelte das Wissen über den Aufbau des Auges (Abb. 14) und den Sehprozess. Der Lichtstrahl wurde zu einem zentralen theoretischen Konzept der Optik.

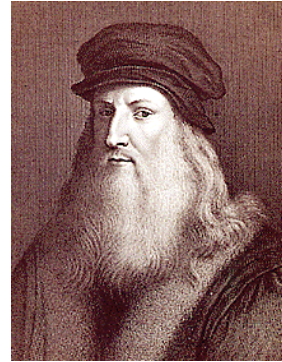
Reflexionsfragen

1. Wie begründete Al-Hazen zu Gunsten der Intramissionstheorie des Sehens?
2. Al-Hazen behauptete, das Licht würde von jedem Punkt eines beleuchteten Objektes in jede Richtung reflektiert. Widersprach diese Behauptung dem Gesetz der Lichtreflektion (Gleichheit von Einfallswinkel und Ausfallwinkel)?
3. Welche Art von Lichtstrahlenselektion wendete Al-Hazen an? Zu welchem Zweck?
4. Al-Hazen platzierte das Bild auf die Oberfläche der Augenlinse. Welche Gründe sprachen dafür?

* * *

Wissenschaft der Frühmoderne

Während der Renaissance dachten die Gelehrten weiterhin über das Sehen nach. Al-Hazens Ideen klangen zwar überzeugend, doch seine Theorie war immer noch zu qualitativ, beinhaltete keine mathematischen Berechnungen und bot keine Möglichkeit praktischer Erprobung. Dies passte nicht mit den Absichten der sich etablierenden Wissenschaft zu-



*Leonardo da Vinci
(1452-1519)*

sammen. Die größte Einschränkung von Al-Hazens Sehmeechanismus war die Tatsache, dass er sich nur auf die *relevanten* Strahlen stützte (jene, die im rechten Winkel in das Auge eintreten). Was ist aber mit den Strahlen, die sich sehr nahe an den relevanten Strahlen befinden? Kann die Natur so gezielt einen Strahl seinem angrenzenden Strahl vorziehen? Diese Fragen gingen den Gelehrten nicht aus dem Kopfund blieben seit dem 11. Jahrhundert am Rande der optischen Theorie, die das Sehen erklärte.

Im 15. Jahrhundert ebnete Leonardo da Vinci die menschliche Fähigkeit, die mit den Augen betrachtete Realität auf die Ebene abzubilden – und so die Realität zu reproduzieren. Die Theorie der Perspektive wurde in diesem Bestreben zentral.⁶

Die Perspektive, die zeigt, wie lineare Strahlen sich in Bezug auf beweisbare Zustände unterscheiden, sollte deshalb zuerst unter all den Wissenschaften und menschlichen Disziplinen platziert werden, denn sie krönt die Mathematik und die Naturwissenschaften und wird von den Blüten des einen wie des anderen geschmückt.

Leonardo zählte Lichtstrahlen, um die Intensität von Licht und Schatten einschätzen zu können. Im Italien der Renaissance des 15. Jahrhundert wurde die Euklidische Theorie von einer Gruppe Künstlern und Architekten, den „Perspektivisten“, Brunelleschi, Alberti und weiteren, für die Bedürfnisse der Architektur und der Malerei wieder belebt. Dabei war es unwichtig, ob Licht ins Auge gelangte oder aus dem Auge strömte. Genauso unwichtig war es, was innerhalb des Auges des Betrachters passierte. Alberti schrieb Folgendes und zeigte damit sein Wissen über die immer währende Debatte in der Optik⁷:

⁶ Leonardo da Vinci, *Atlanticus*, 203. In Leonardo da Vinci (2002). *Leonardo on Art and the Artist*. Dover, New York, p.101

⁷ Alberti, L. B. (1436/1970) *On Painting* Translated by J.R. Spencer. New Haven: Yale University Press. <http://www.noteaccess.com/Texts/Alberti/1.htm>



Leon Battista Alberti
(1404 – 1472)

Unter den Alten gab es nicht wenig Streit, ob diese Strahlen nun vom Auge oder der Ebene kommen. Dieser Streit ist für uns völlig nutzlos. ... Weder ist dies der Ort, an dem diskutiert werden soll, ob das Sehen, wie es genannt wird, zu diesem Zeitpunkt auf dem inneren Nerv ansässig ist oder ob die Bilder auf der Oberfläche des Auges gebildet werden, wie auf einem lebendigen Spiegel.



Abbildung 15. Diese ebene künstlerische Komposition zielt darauf ab, eine Tiefenwahrnehmung bei den Besuchern der Kirche San Giacomo Maggiore in Bologna auszulösen. Die perspektivistische Tradition war in diesem Gemälde sehr stark vorhanden.

Leonardo und andere seiner Zeit (wie zum Beispiel der bereits zitierte Alberti) glaubten weiterhin daran, dass die betrachteten Objekte mit Hilfe von Lichtstrahlen, die das Bild ins Auge bringen, abgebildet werden. Dieses Verständnis entspricht der Funktionsweise der Camera Obscura beim Erschaffen von optischen Bildern. Entsprechend lesen wir in Leonardos Notizbuch Folgendes:⁸

...je größer die Pupille desto größer wird auch die Erscheinung des Objektes sein, das sie sieht Alle Dinge werden um Mitternacht größer erscheinen als am Mittag und größer am Mittag als am Morgen. Dies findet genau so statt, weil die Pupille des Auges zu Mittag bedeutend kleiner ist als zu jeder anderen Zeit Nachts sieht sie (die Pupille) die Dinge größer als bei Tag.

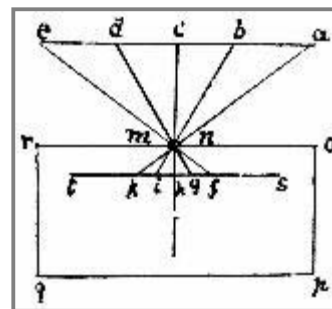
Leonardo glaubte allerdings nicht, dass bei der Vielzahl an Strahlen, die das Objekt ausstrahlt und die in das Auge einfallen, eine Selektion stattfindet. Er konzentrierte sich auf ein anderes Problem. Leonardos Vorstellung bezüglich der Verortung des

⁸ Leonardo da Vinci (1955). *Notebooks*. In E. MacCurdy (Ed.), *Optics*, Ch. IX, Georger Braziller, New York, S. 251.

Bildes im Auge entsprach nicht der Vorstellung von Al-Hazen. Es liegt nicht auf der Linse, die nur Strahlen bricht, sondern weiter innen im Auge, auf dem äußersten Sehnerv.

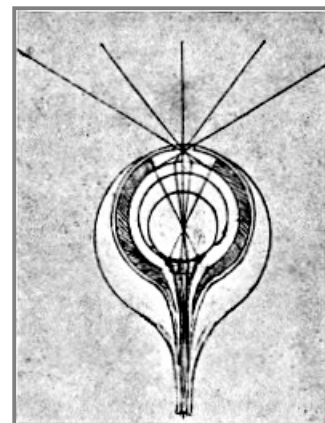
Leonardos konzeptuelle Anstrengungen, den Sehmechanismus nachzuvollziehen bietet interessante Aspekte. Das Bild (mit den Fachbegriffen der damaligen Zeit: *similitudine, spetie, impressione, forma, eidolon, simulacra*) wandert mithilfe von Strahlen durch den Raum. Leonardo kannte das Prinzip der Camera Obscura sowie die Ähnlichkeiten des Sehprozesses mit der Camera Obscura. Deshalb war es für ihn offensichtlich, die Umkehrung von Lichtstrahlen beim Eintreten in die kleine Öffnung der Pupille in seine Überlegungen mit einzubeziehen (Abb. 16a).

Figure 16a. In dieser Skizze erklärt Leonardo die erste Umkehrung des Bildes im Auge.



Dies implizierte allerdings, dass das Bild umgekehrt oder falsch herum ist. Diese Inversion stellte Leonardo vor ein Rätsel, denn es widersprach der Tatsache, dass wir Objekte richtig herum sehen können. Folglich nahm er an, dass die Strahlen das Auge ein zweites Mal durchqueren müssen, und zwar würde dann so die erste Inversion des Bildes auf dem Weg zum Sehnerv wieder rückgängig gemacht werden (Abb. 16b).

Figure 16b. In dieser Skizze zeigte Leonardo zwei aufeinander folgende Umkehrungen des Bildes beim Sehprozess.



Leonardos Ideen hatten aber keinen großen Einfluss, vielleicht, weil er dies selbst nicht wollte. Indem er seine Aufzeichnungen verschlüsselte, waren diese Aufzeichnungen oft nur für Leser der Zukunft brauchbar, die diese lesen und dann beeindruckt sein konnten.

Für die Geschichte des Bildverständnisses sind die Ansichten zwei weiterer großer Gelehrter aus dem Italien des 16. Jahrhunderts bezeichnend: Francesco Maurolico und Giovanni Batista Della Porta.

Maurolico, Professor in Messina, Italien, erkannte, dass man eine weitere Eigenschaft einer transparenten konkaven Linse, wie die kristalline Linse des Auges, nicht unberücksichtigt lassen sollte: Sie bündelt Lichtstrahlen. So ließen sich auch die Funktionsweise von Brillen für Fernsichtige erklären, die eine konvexe Linse enthielten, um die unzureichende Kraft der Augenlinse auszugleichen.



Francesco Maurolico
(1494-1575)

Maurolico verlängerte jedoch nicht die Strahlen bis zu ihrer Durchquerung. Sie erreichten, „richtig angeordnet“, nach der Brechung durch die Linse die Verlängerung des Sehnervs und damit die Netzhaut, die die innere Oberfläche des Auges bedeckt. Laut Maurolico lag auf der Netzhaut das Ziel des Bildtransfers. (Abb. 17). Maurolicos Bild hing aber immer noch stark mit dem

mittelalterlichen Modell des Sehens von Al-Hazens zusammen: Punkt zu Punkt wird das Objekt mithilfe von einzelnen Strahlen abgebildet.

Obwohl Maurolico nicht mit der Behauptung Al-Hazens, nur senkrechte Strahlen würden ein Bild erzeugen, übereinstimmte und diese Behauptung sogar als absurd bezeichnete, konnte er trotzdem keinen anderen Mechanismus der Bilderzeugung liefern. Er sagte nur, dass der zentrale Strahl unter den vielen relevanten Strahlen, die vom Objekt ausströmen, von größter Bedeutung sei. Dagegen spielten die anderen Strahlen eine untergeordnete Rolle – eine relativ unklare Behauptung.

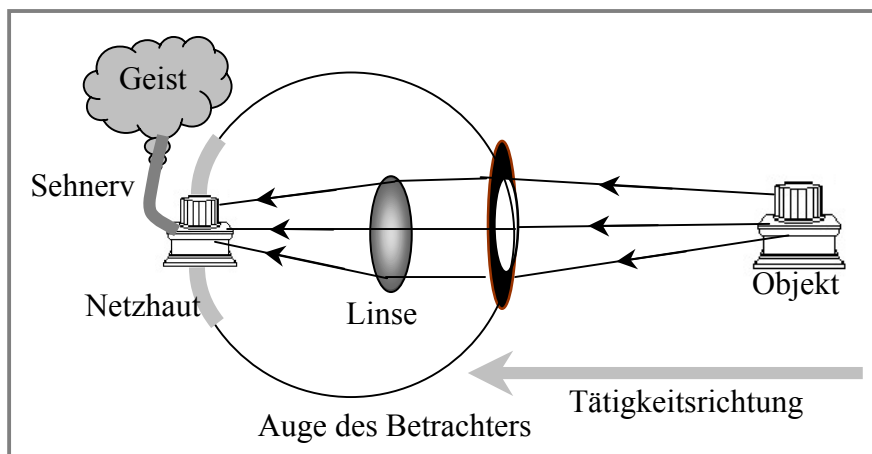


Abbildung 17. Schematische Darstellung von Maurolicos Verständnis des Sehens. Einzelne Strahlen projizieren jeden einzelnen Punkt des Objekts zu seinem Abbild im Auge.

Maurolico betrachtete immer noch den Humor crystallinus (kristallinische Feuchtigkeit) nicht nur als ein Hilfsmittel für die Brechung, sondern auch als ein Instrument der Wahrnehmung, in dem sich die Sehkraft befindet.⁹



Della Porta
(1535-1615)

Ein weiterer Forscher aus dem Italien der Renaissance, der zu erwähnen wäre, ist Giambattista della Porta. Er war ebenfalls Gelehrter und Universalgebildeter und arbeitete hauptsächlich in Neapel. Sein Hauptinteresse lag darin, neue Phänomene zu entdecken. Diese Entdeckungen sah er als das Aufdecken von Geheimnissen der Natur an, ohne sie mit theoretischen Darstellungen zu versehen. Della Porta fand heraus, dass das Bild in der Camera Obscura viel heller wurde, wenn man eine konvexe Linse in der Öffnung der Kamera anbrachte. Das Bild in der normalen Kamera war praktisch gar nicht sensibel für die Entfernung der Wand zur Öffnung. In der Kamera mit der Linse allerdings konnte nur bei einer bestimmten Entfernung zwischen Linse und Wand der Kamera ein scharfes Bild gesehen werden. Heute wissen wir, dass Della Porta die Camera Obscura durch die konvexe Linse, die er in der Öffnung angebracht hatte, in eine normale Kamera umgebaut hatte, in der scharfe Bilder nur bei einer bestimmten Entfernung der Linse erhalten werden können. Die Bilder in der Kamera mit der eingebauten Linse waren zwar viel heller, wurden aber verschwommen und verschwanden bei vielen Entfernungen. Für weit entfernte Objekte entsprach die Entfernung, die ein scharfes Bild begünstigte, genau der Brennweite der Linse.

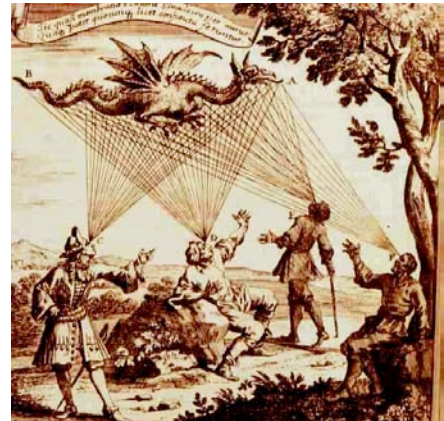
Obwohl della Porta vermutete, das Auge wäre eine kleine *Camera Obscura*, konnte diese Annahme die vorherrschenden irrigen Vorstellungen über das Sehen aus den letzten sechshundert Jahren (ursprünglich von Al-Hazen formuliert) nicht aufrütteln. Die Geschichte des Sehens machte eine revolutionäre konzeptuelle Veränderung in Bezug auf das Verständnis der optischen Bildentstehung durch.

Reflexionsfragen

1. Welche Probleme versuchte Leonardo in Bezug auf das Sehen zu lösen? Welche Präposition zwang Leonardo dazu, dieses Problem anzugehen?

⁹ Lindberg, D. (1976). *Theories of Vision From Al-Kindi to Kepler*. University of Chicago, Chicago, S. 182.

2. Wo gibt es Gemeinsamkeiten zwischen dem Verständnis des Sehens bei Al-Hazen und Maurolico?
3. Welchen Beitrag leistete Della Porta zu dem Verständnis des Sehens?
4. Die gezeigte Abbildung aus dem alten Buch der Optik behandelt den Sehprozess. Zu welcher Theorie des Sehens passt es?
5. Ist Della Porta ein Wissenschaftler? Diskutieren Sie.



* * *

Wissenschaft der Moderne

Der bedeutende Durchbruch bei der Entwicklung der Theorie des Sehens fand während der wissenschaftlichen Revolution des 17. Jahrhunderts statt, als die Wissenschaft zu der modernen Wissenschaftsperiode überging. Johannes Kepler war einer der Hauptakteure dieses Prozesses. Er erklärte den Ablauf des Sehprozesses auf gänzlich neue Weise. In der ersten Stufe verglich er die Entstehung des optischen Bildes mit der Bildentstehung mittels konvexer Linsen (Abb. 18).

Dabei überdachte Kepler die Rolle des Lichtstrahls und vermutete, dass dieser nur eine bloße Repräsentation des Lichtflusses sei, der allein optische Bilder überträgt: "lines [of light] infinite in number issue from every point" („unzählige [Licht]strahlen kommen von jedem Punkt“) im Gesichtsfeld. Dies war wichtig, denn anstatt die Bildentstehung mithilfe der Strahlen zu erklären, kann man dies auch mittels des Lichtes oder des Lichtflusses tun: Jeder sichtbare Punkt benetzt das Auge mit Strahlen, die einen Kegel bilden, dessen Spitze am Punkt und dessen Basis auf der Augenoberfläche ist. (Abb. 18).

Entsprechend Al-Kindi–Al-Hazens Prinzip strömt ein Lichtfluss von jedem einzelnen Punkt des Objektes aus und breitet sich in der Umgebung in alle Richtungen aus. Dann tritt der Fluss, der auf die konvexe Oberfläche der Hornhaut des Auges trifft, in das Auge ein und wird gebündelt. Wegen dieser Brechung in der Linse läuft der Lichtfluss genau auf der Netzhaut zusammen und erzeugt ein Abbild. Dieser beleuchtete Punkt entspricht genau dem Punkt des Objekts. Die Anhäufung der verursachten Bildpunkte bildet dann ein Muster, das das Objekt nachbildet – das optische Bild.

Die grundlegende konzeptuelle Veränderung, die von Kepler vorangetrieben wurde, ersetzte die Punkt-zu-Punkt Abbildungen von einem Objekt bis zu seinem Abbild mithilfe von *einzelnen Strahlen* durch Punkt-zu-Punkt Abbildungen, die mit Hilfe von *Lichtflüssen* abbilden, die auf der Netzhaut gebündelt auftreffen. Daraus folgend verwarf Kepler Al-Hazens Idee (die ihm von Witelo bekannt war) bezüglich der Unterscheidung von senkrechten und schrägen Strahlen:¹⁰

Ich widerlege Witelo bei dieser Verwechslung der Strahlen. Denn, wie er sagt, wird eine schiefe Ausstrahlung genauso gesehen insofern als dass schiefen Strahlen die senkrechten Strahlen (innerhalb des Auges) durchbre-

¹⁰ Kepler, J. (1604). *Ad Vitellionem paralipomena, quibus astronomiæ pars optica traditur*, in Lindberg (1976), *op. cit.* S. 189.

chen; deshalb empfängt ein und derselbe Punkt (des Auges) sowie schiefe als auch senkrechte Strahlung. Daher wird über beide Dinge (die schiefe und die senkrechte Strahlung) entschieden, dass sie am gleichen Ort gelegen sind.

An diesem Punkt stand Kepler vor genau dem gleichen Problem, das schon Wissenschaftler wie Al-Hazen, Leonardo, Maurolicus und zahlreiche andere schon viele Jahre lang herausgefordert hatte. Das Bild auf der Netzhaut war umgekehrt, genauso wie das reale Bild, das mithilfe einer Linse in einer Kamera oder einer Camera Obscura entstanden war. Von dieser Tatsache ließ sich Kepler aber nicht aufhalten. Er verwies auf die nächste Stufe nach der Bildentstehung im Sehprozess: die Interpretation des Bildes auf der Netzhaut mithilfe des menschlichen Bewusstseins:¹¹

Ich sage, das Sehen findet dann statt, wenn das Bild der gesamten Hemisphäre, die vor dem Auge liegt, ... auf der rötlich-weißen konkaven Oberfläche der Netzhaut fixiert ist. Wie das Bild von den Sichtgeistern, die sich in der Netzhaut und dem Nerv befinden, zusammengesetzt wird und ob es vor der Seele oder dem Tribunal der Sichtbehörde innerhalb der Hohlräume des Gehirns erscheint, oder ob die Sichtbehörde wie ein von der Seele entsendeter Magistrat von der Verwaltungskammer des Gehirns in den Sehnerv und die Netzhaut gelangt, um dieses Bild zu treffen, als würde es zu einem niedrigeren Hof herabsteigen – das lasse ich die Physiker diskutieren.

Entgegen der Theorie von Al-Hazen, der Lichtstrahlen nur bis zur Linse verfolgte, um die Umkehrung des Bildes zu vermeiden; und entgegen den Ideen Leonardos, der nach einem zusätzlichen Schnittpunkt der Strahlen im Auge suchte, um die erste Umkehrung auszugleichen und das reguläre Bild zu erzeugen, überließ es Kepler dem menschlichen Bewusstsein, das umgekehrte Bild auf der Netzhaut zu verarbeiten. Das Bild wird im menschlichen Geist interpretiert und als nicht umgekehrtes Abbild der Realität erkannt. Kepler schrieb dem Bewusstsein also gewissermaßen eine zusätzliche Umkehrung des Bildes zu.

¹¹ *Ebenda.* S. 203.

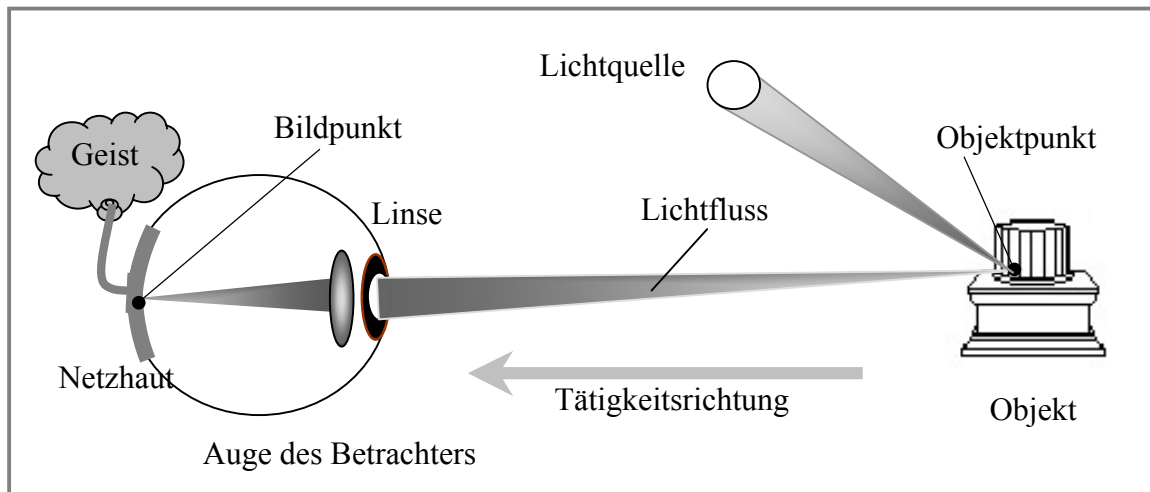


Abbildung 18a. Schematische Darstellung von Keplers Lösung des Problems des Sehens. Der Geist interpretiert das umgekehrte Bild, das auf der Netzhaut des Auges abgebildet wird. Das Bild wird durch eine Punkt-zu-Punkt-Konstruktion des realen Bildes mithilfe eines divergierenden-konvergierenden Lichtflusses abgebildet.

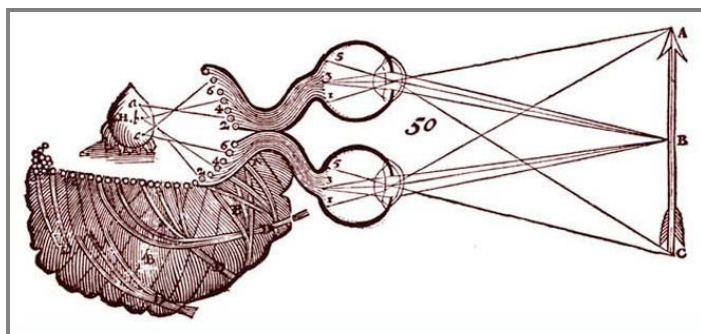


Abbildung 18b. Skizze von Descartes' Dioptrique (1637, in der er das Keplerische Verständnis des Sehens darstellte: die Abbildung mithilfe vom Lichtfluss und die Verbindung zum Gehirn. Descartes glaubte, das Bild wird in der Epiphyse, die der Sitz des Sehens und des Menschenverstandes ist, interpretiert.

Während seiner Überlegungen wandte sich Kepler von der Idee einer Bildübertragung durch den Raum wie auch von der Idee einer Eidola (Atomisten) und der Idee des Transfers durch eine Störung im Medium (Aristoteles) ab. Al-Hazen zerlegte das Eidolon in einzelne Punkte, die von relevanten Strahlen übertragen werden, und beschäftigte sich in gewisser Hinsicht mit einem Bild, das durch den Raum übertragen wird. In dem neuen Szenario existierte das optische Bild möglicherweise nirgendwo zwischen dem Objekt und dem Bild.

Im Bezug auf die Lichtstrahlen fand ein bedeutender Rollenwechsel statt: Sie entwickelten sich von einem essentiellen Element des optischen Prozesses, einem „Atom des Lichtes“, zu einem Hilfswerkzeug, einer nützlichen Repräsentation, die nicht unbedingt einzigartig war. Der Lichtstrahl verblieb weiterhin Teil aller Lichttheorien des 17. Jahrhunderts, besonders der Theorie von Huygens sowie der von Newton. Innerhalb der Wellentheorie verstand man den Lichtstrahl als ein Set von

Punkten, von dem jedes einzelne das Lot zur Wellenfront zu verschiedenen Momenten repräsentiert. In der korpuskularen Interpretation des Lichts repräsentiert der Lichtstrahl die Bewegungsbahn der Lichtteilchen. Für Newton, der jede Art von Spekulation zu vermeiden versuchte, bedeutete, vorsichtig formuliert, ein Lichtstrahl *die kleinste Lichtmenge, die die Eigenschaften des Lichtverhaltens aufweist*¹² Auf jeden Fall war der Lichtstrahl nicht mehr als ein repräsentatives Hilfsmittel.

Scholion

Es dauerte über 2000 Jahre, um den Sehprozess korrekt zu verstehen. Alles begann mit der Debatte um Intramissions- und Extramissionstheorien. Diese entsprach der Diskussion darüber, ob Sehstrahlen existieren, die vom Auge des Betrachters ausgestrahlt werden, oder ob Eidola in das Auge des Betrachters eintreffen. Nach dem Beitrag von Al-Hazen im 11. Jahrhundert wurde diese Debatte stiller und hauptsächlich die Intramissionstheorie bevorzugt. Die Idee von Sehstrahlen wurde in der Physik verworfen.

Al-Hazen zerlegte das optische Bild (Eidolon) in einzelne Punkte und betrachtete den Zusammenhang zwischen jedem einzelnen Punkt des betrachteten Objektes und dem dazugehörigen Punkt des Objektes, wobei jeweils nur ein Strahl relevant war. Er bestand darauf, dass das visuelle Bild genau so wie wir es wahrnehmen (richtig herum) erzeugt wird. Deshalb platzierte er das aufrechte Bild auf die Oberfläche der Linse, die er für das Sinnesorgan des Sehens hielt.

Im 17. Jahrhundert (Abb. 19a, b) wurde dieses Verständnis von Kepler durch neue Erkenntnisse ersetzt. Kepler erkannte, dass ein Abbild eines Objektes erzeugt wird, indem der Lichtfluss, der von jedem Punkt des Objektes ausströmt und in das Auge des Betrachters eintritt, von der Linse zu einem Punkt auf der Netzhaut gebündelt wird. Man nahm an, dass das erhaltene reale, umgekehrte Bild (wie in einer konvexen Linse) später vom Geist des Betrachters interpretiert wird, um ein vertrautes Bild eines Objekts zu erzeugen. Keplers Verständnis eines optischen Bildes war Teil der Strahlenoptik (dem Bereich der Optik, der sich mit Licht in Form von geraden Strahlen beschäftigt), die seitdem in allen Physikkursen unterrichtet wird. Die Weiterentwicklung der physikalischen Optik, die Wellenoptik, lehnte die Beschreibung des

¹² Obwohl Newton eine Vermutung über die Teilchennatur des Lichts anstellte, die mit Strahlen als Bewegungsbahnen von sehr kleinen Objekten übereinstimmte, definierte er Strahlen in seiner Abhandlung *Opticks* nicht als Bewegungsbahnen von Lichtteilchen.

Bildes der Strahlenoptik nicht ab, weil im Falle einer sehr kurzen Wellenlänge des Lichtes, verglichen mit den Abmessungen des Auges, die Einschränkungen durch die Wellennatur des Lichtes vernachlässigbar sind.

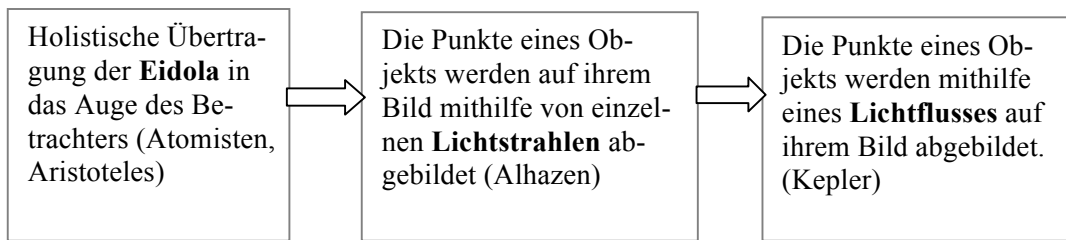


Abbildung 19a. Ablaufschema der Intramissionstheorie des optischen Bildes.

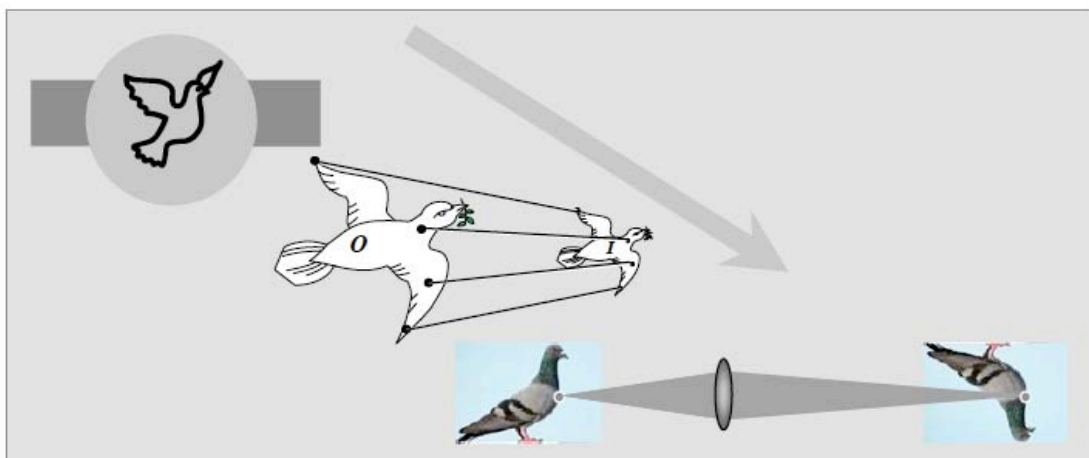
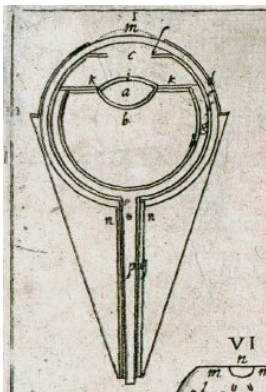


Abbildung 19b. Symbolische Präsentation der Verwandlung der Theorie des optischen Bildes.

Reflexionsfragen



1. Wie lautete Keplers Ansatz bezüglich des Sehmechanismus? Inwiefern unterschied er sich von der Theorie Al-Hazens?
2. Was war an Keplers Theorie des Sehens neu? Warum war sie besser als die von Al-Hazens?
3. Vergleichen Sie den Aufbau des Auges nach Kepler (siehe Bild) mit der von Al-Hazen (Abb. 14). Wo liegen Unterschiede?
4. Wieso ist das Bild im Auge des Betrachters umgekehrt?

Welche Besonderheit wird dem Geist für die Interpretation von visuellen Bildern zugeschrieben?

5. Inwiefern fand beim Strahlenkonzept im Verlauf der Geschichte der Optik ein Rollenwechsel statt?

Historischer und philosophischer Hintergrund mit Berücksichtigung der Natur der Wissenschaft

Der Exkurs zur optischen Bildentstehung erstreckt sich über ungefähr 2000 Jahre. Alles begann mit der Begründung der Wissenschaft im klassischen Griechenland und kam zu Beginn der wissenschaftlichen Revolution des 17. Jahrhunderts zu einer Lösung. Während dieser Zeit wechselten sich mehrere Wissenschaftsparadigmen und wissenschaftliche Methoden ab, die zum Kanon der modernen Wissenschaft hinzukamen. Verfolgt man daher das Verständnis der Bildentstehung, so kann man die grundlegenden Veränderungen in der wissenschaftlichen Ontologie und Epistemologie gut darstellen.

Die ersten optischen Theorien von Pythagoras, Atomisten, Empedokles, Plato und Aristoteles wurden während der Periode der hellenischen Wissenschaft, die der Naturphilosophie ähnlich ist, entwickelt. Die wichtigsten Merkmale der Wissenschaft zu dieser Zeit waren das Streben nach universaler Regelmäßigkeit und Objektivität. Dies spiegelt sich im Modell des Kosmos (das Universum, das objektiven Gesetzen unterliegt) wider. Es stand im Kontrast zu der bisher vorherrschenden Wissensform in der Gestalt von Mythen, die eine nicht-konforme Auswahl an subjektiven (spontanen) Aussagen bezüglich der Ordnung der Dinge darstellen. Genau dies kennen wir bereits aus den epischen Gedichten von Homer und Hesiod sowie aus Mythen anderer Völker. Sie alle zeichneten sich durch Voluntarismus und Subjektivität aus. Hellenische wissenschaftliche Theorien gebrauchten hauptsächlich qualitative Argumentationen mithilfe von Prinzipien und formaler Logik. Sie bewahrten die Spuren des bisherigen nichtwissenschaftlichen Wissens, denn ihre Konzepte waren ungenau, nicht gut erklärt (keine detaillierte Mechanismen) und nicht gut definiert (keine empirisch ermittelte Bedeutung). Diese Theorien erscheinen dem heutigen Lernenden als ausschließlich deskriptiv und ohne einen praktischen Nutzen. Unabhängig von jedem persönlichen Wunsch oder persönlicher Stimmung suchte man jedoch nach der objektiven Wahrheit über die Natur. In diesem Sinne war es eine wissenschaftliche Revolution.

Während der folgenden hellenistischen Periode wurde die Wissenschaft pragmatischer und konkreter und interessierte sich weniger für philosophische und qualitative Forderungen, was sie von der vorherigen Periode unterschied. Solcher Art waren zum Beispiel die optischen Theorien von Euklid, Galen, und Ptolemäus. Euklid entwickel-

te die Theorie der Perspektive, Galen begründete die Struktur des Auges, Heron und Archimedes erforschten das Reflexionsgesetz des Lichts und des Sehens. Ptolemäus war der erste, der das Phänomen der Brechung empirisch erforschte, um dann die quantitative Abhängigkeit zwischen Einfallswinkel und Brechungswinkel nachzuweisen.

Die Wissenschaftler der mittelalterlichen muslimischen Wissenschaft setzten meist das hellenistische Erbe fort und entwickelten die empirische Epistemologie der hellenistischen Gelehrten weiter. Einer davon war Al-Kindi, der im Stile der Optik nach Ptolemäus weiter arbeitete. Al-Hazen war jedoch ursprünglich in der Ontologie tätig. Er übernahm die Idee der Intramission von Aristoteles, die Strahlen von Euklid, die Brechung von Ptolemäus und die Anatomie des Auges von Galen. Diese Synthese der Konzepte hatte einerseits in der Optik viel zu bedeuten, denn er konnte damit die Funktionsweise der Camera Obscura erklären; war aber andererseits auch bedeutsam für die Theorie des Sehens, für die er eine neue detailliertere Erklärung lieferte. Obwohl seine Theorie des Sehens noch nicht mit genauen mathematischen Fachausdrücken ausgearbeitet worden war, war sie fortschrittlicher als jede andere Theorie dieser Zeit. Sie war ungefähr 600 Jahre lang die führende Theorie in diesem Gebiet, bis sie von der Optik Keplers ersetzt wurde.

In der folgenden historischen Periode zog das Zentrum der wissenschaftlichen Tätigkeiten in das mittelalterliche Europa. Der Fortschritt beim Verständnis des Sehens und des optischen Bildes ging langsam vonstatten. Dies lässt sich dadurch erklären, dass das Hauptaugenmerk der wissenschaftlichen Erforschung wieder sehr auf qualitativen philosophischen und nicht auf empirischen Untersuchungen lag. Es gab aber Versuche, die empirische Methode auf die Forschungsagenda zu bringen. Robert Grosseteste (1168-1253) und Roger Bacon (1214-1294) erklärten in Oxford die sogenannten „Vorrechte der experimentellen Wissenschaft“, die forderten, wissenschaftliche Behauptungen experimentell zu testen. In diesem Rahmen gelang Grosseteste zu seinem Verständnis der Lichtbrechung in einer sphärischen Linse und der Bündelung in einen Punkt, der durch eine konvexe Linse tritt. (Abb. 20). Dieser Punkt wurde *Brennpunkt* genannt. Der Begriff deutet dabei schon die Methoden an, die Grosseteste in seiner Forschung verwendete.

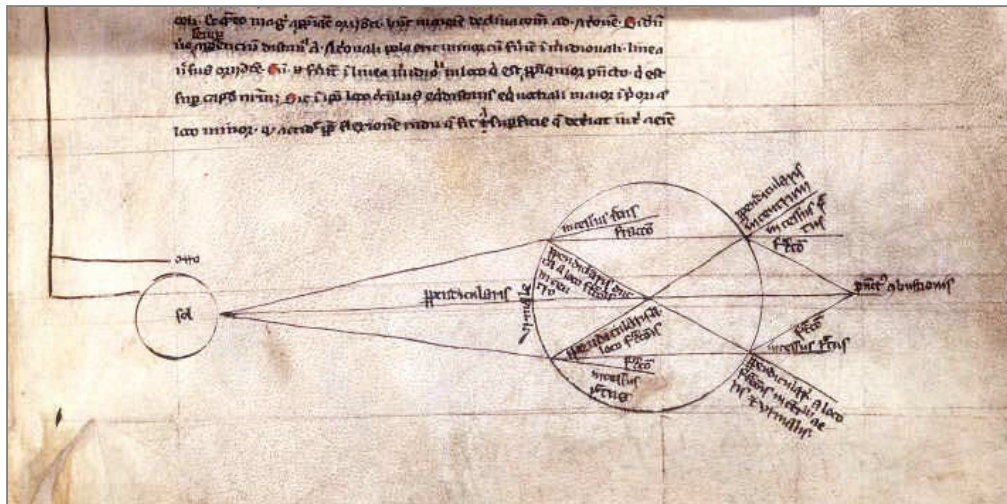


Abbildung 20. Skizze von Robert Grosseteste, die die Funktionsweise der Linse erklärt. Die Linse verursacht die Brechung der Lichtstrahlen der Sonne, die zu einem Punkt gebündelt werden, den er „Brennpunkt“ nannte.

Zur Entstehung des optischen Bildes gab es jedoch leider keine weiteren Bemühungen und auch keine Experimente in diesem Bereich. Obwohl Grosseteste die Wichtigkeit der Mathematik in der wissenschaftlichen Bedeutung von Phänomenen erkannte¹³

Die Nützlichkeit der Betrachtung von Linien, Winkeln und Zahlen ist sehr beachtlich, da es unmöglich ist, die Naturphilosophie ohne sie zu verstehen. Sie sind absolut wichtig für das Verständnis des Universums und seiner Einzelteile.

übernahm zu der Zeit niemand, auch nicht Grosseteste und Roger Bacon, diese Richtung, die über die Geometrie hinaus ging und die als Forschungsmethode für das Sehen und die Bildentstehung diente. Die Entwicklung dieses Ansatzes fand während der wissenschaftlichen Revolution statt, als der Wissenskorpus, uns bekannt als Strahlenoptik, errichtet wurde.

Kepler schaffte den Durchbruch. In seinen Bemühungen erkennt man die Bedeutung der wissenschaftlichen Revolution in Bezug auf die Natur der Wissenschaft. Ausschlaggebend war die Synthese der rationalistischen (deduktiv-induktiven) Methode mit der empirischen Methode (kontrolliertes regelbares Experimentieren). Innerhalb dieses Rahmens löste Kepler 1604 das Problem der Entstehung des optischen Bildes und somit das Rätsel des Sehens.¹⁴

¹³ Pederson, O. & Pihl, M. (1974). *Early Physics and Astronomy*. Macdonald & James, London, S.196.

¹⁴ Kepler, J. (1604). *Op. cit.*

Zwei bedeutende Entdeckungen Keplers hinsichtlich des optischen Bildes im Sehprozess könnten dabei helfen, die Natur der Physik näher zu beleuchten:

1. Das Abbild eines Objektes wird nicht mithilfe von einzelnen Strahlen, sondern mittels Lichtfluss erzeugt. Die Idee, sich auf einzelne Strahlen zu beschränken und den Rest des Lichts zu vernachlässigen stand im Gegensatz zur physikalischen Intuition und wirkte unecht. Die „schrägen“ Strahlen, die sich sehr nah an den senkrechten Strahlen befanden, mussten auch zur Bildentstehung beitragen. Kepler schrieb:¹⁵

Die Aufnahme oder das Empfinden von senkrechten Strahlen und der benachbarten Strahlen [sollte] fast gleich sein.

2. Trotz ihrer Rolle als treibende Kraft in der wissenschaftlichen Erforschung gibt es in der Physik kein Vorrecht auf gesunden Menschenverstand: die Realität kann komplex sein und nicht mit intuitivem Denken übereinstimmen. Folglich lehnten die Gelehrten seit Jahrhunderten den Gedanken, dass das optische Bild im Auge umgekehrt sein könnte, ab. Al-Hazen, Leonardo, Maurolico und andere waren von dieser Vorstellung überzeugt. Es erschien lächerlich, etwas Abweichendes vorzuschlagen. In der Realität stellte sich jedoch heraus, dass genau dies der Fall war. Kepler verstieß gegen den gesunden Menschenverstand, als er die Rolle der Kognition bei der Interpretation von optischen Bildern vorstellte.

Optisches Wissen wurde nicht von der sozialen Umgebung der Gelehrten ferngehalten. Es beeinflusste nicht nur die Wissenschaftler, sondern auch die breitere Bevölkerung, die im Bereich Wissenschaft oder in anderen Bereichen gebildet war. Beweise dazu findet man in Kunstwerken, die aus verschiedenen Zeiten und Orten erhalten blieben.

Die ägyptische Zeichnung der Sonne (Abb. 9a.) brachte ein voreiliges Verständnis von Lichtausstrahlung zum Ausdruck, welches alle Prinzipien, einschließlich des Al-Kindi-Prinzips, aus der muslimischen Wissenschaft missachtete.

Der Einfluss der neuen Theorie der Bildübertragung von Al-Hazen auf das mittelalterliche Europa ließ sich in vielen Gemälden erkennen. Diese stellten das Licht nicht als Fluss, sondern als Ansammlung von Lichtstrahlen dar, die mit der Bildübertragung in Verbindung standen. Darunter waren auch die Gemälde, die den religiösen Kontext

¹⁵ *Ebenda.*

der Marienverkündigung darstellten (Abb. 21a).¹⁶ Die Künstler versuchten zu zeigen, wie das heilige Bild zu der Jungfrau Maria gelangt. In dem Bild von Fra Angelico (1450) in Florence, zum Beispiel, sieht man, wie sich das göttliche Bild „wie auf Schienen“ der Lichtstrahlen fortbewegt. Ein ähnlicher Kontext wurde in dem östlichen christlichen Kanon dargestellt (Abb. 21b). Der Grund dafür könnte sein, dass Witelos und Peckhams optische Abhandlungen nur in Latein zur Verfügung standen und nur in Westeuropa studiert werden konnten.

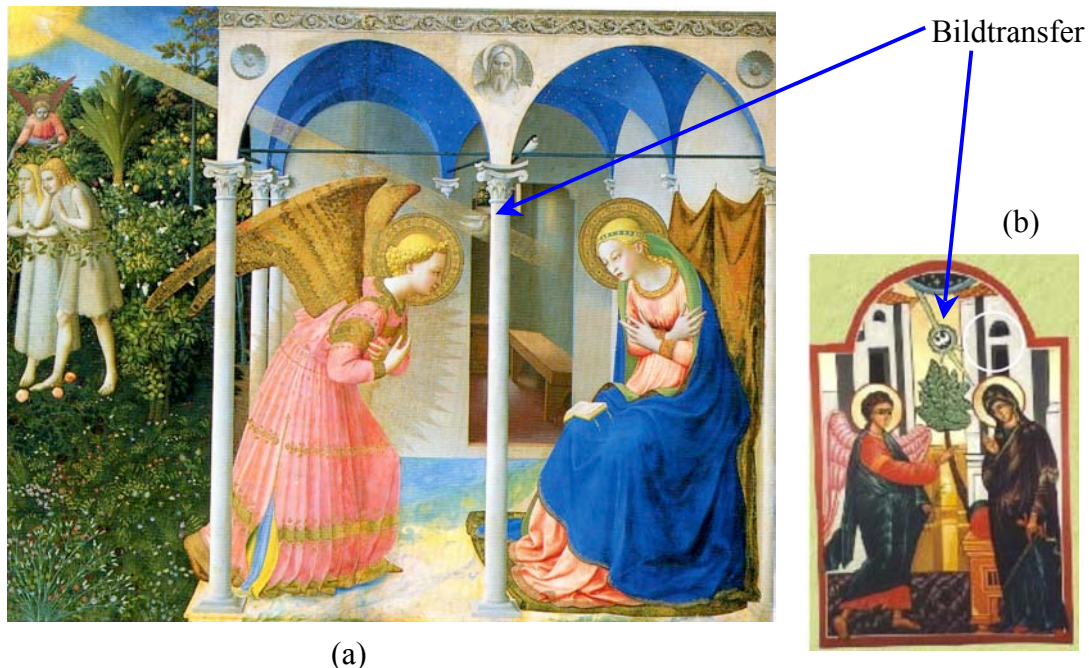


Abbildung 21. (a) Künstlerische Darstellung der Mariä Verkündigung aus dem Neuen Testament. Das Bild Mariä Verkündigung von Fra Angelico (1450) stellt das optische Wissen in Westeuropa während des späten Mittelalters dar. Es veranschaulicht die Idee von Licht, das aus Lichtstrahlen zusammengesetzt ist sowie einer Bildübertragung durch Lichtstrahlen (b) Das holistische Verständnis der Bildübertragung wird normalerweise in der Darstellung des gleichen Ereignisses, in den Symbolen des orthodoxen Kanon, dem Wissen in Osteuropa während des frühen Mittelalters entsprechend, dargestellt.

Reflexionsfragen

1. Versuchen Sie, jede einzelne Theorie des optischen Bildes mithilfe einer physikalischen Theorie hinsichtlich des rationalistischen und empirischen Ansatzes der Bedeutung von Realität zu identifizieren.
2. Diskutieren Sie, warum das hier präsentierte Wissen über das optische Bild wissenschaftlich relevant ist. Inwiefern unterschied es sich vom mythologischen, religiösen und traditionellen?

¹⁶ Galili, I. & Zinn, B. (2007). Physics and Art – A Cultural Symbiosis in Physics Education, *Science & Education*, 16, 441–460.

3. Welche Merkmale der einzelnen Theorien lassen sich mit der Natur der Wissenschaft in Verbindung bringen (Pythagoräisch, Atomistisch, Plato-Empedokleisch, Euklidisch, Al-Hazens, Keplerisch)? Welche Verpflichtungen gegenüber den entsprechenden ontologischen und epistemologischen Vorstellungen der jeweiligen Zeit geht jede einzelne Theorie des optischen Bildes ein? Diskutieren Sie!

* * *

Zielgruppe, curriculare Relevanz und didaktischer Nutzen

Diese Einheit richtet sich vorrangig an Physiklehrer und Lehramtsanwärter. Das reguläre Curriculum beinhaltet nicht das Physikwissen, das heutzutage für veraltet und fehlerhaft gehalten wird. Dieser Exkurs der Entwicklung des physikalischen Verständnisses vom optischen Bild und des Sehprozesses schließt frühere Ansichten und Vorstellungen mit ein, die durch die heutigen modernen und unterrichteten Ansichten verändert und ersetzt wurden. Lehrer bekommen die Möglichkeit, diese Inhalte auf viele verschiedene didaktische Weisen an ihre Schüler zu vermitteln.

Zahlreiche Forschung in der Physikausbildung zeigte, dass Bild- und Sehprozesse für Schüler ein schwieriges Thema darstellen, was sie verunsichert und zahlreiche falsche Vorstellungen erzeugt.¹⁷ Bei der Analyse dieser falschen Vorstellungen fiel auf, dass sie eine deutliche Parallele zu der historischen Entwicklung des optischen Wissens aufwiesen. Dem war auch so, wenn eine einzelne Person auf ihrem Lernpfad keine historischen Vorstellungen zeigte.¹⁸ Die Vorstellungen, die für das Thema Bild und Sehen relevant sind, sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1. *Konzeptuelle Parallelen des optischen Wissens bezüglich Bild und Sehen.*

<i>Vorstellungen der Schüler, die im Laufe des Optik-Unterrichts auftraten</i>	<i>Historische Vorstellungen, die in der vergangenen Wissenschaft betrieben wurden</i>
Schema des aktiven Sehens ("Sehen durch Berühren")	Vorstellung des Sehens von Pythagoras und Plato (Extramissionstheorie)

¹⁷ z.B. Galili, I. & Hazan, A. (2000a). 'Learners' Knowledge in Optics: Interpretation, Structure, and Analysis'. *International Journal in Science Education*, 22(1), 57-88. This paper includes numerous references on other research reports.

¹⁸ Galili, I. & Hazan, A. (2000b). The Influence of a Historically Oriented Course on Students' Content Knowledge in Optics Evaluated by Means of Facets – Schemes Analysis. *American Journal of Physics*, 68 (7), S3-15.

Schema des holistischen Bildes (das ganze Bild bewegt sich zum Auge des Betrachters oder Bildschirm/Spiegel (wo es später gesehen wird))	Vorstellung der <i>Eidola</i> der Atomisten (Intramissionstheorie)
Lichtstrahlen als Einheiten, die aus Licht zusammengesetzt sind. Sehstrahlen als Einheit, die das Sehen ermöglicht.	Euklidische Seh- und Lichtstrahlen
Schema der Bildübertragung: Bild wird Punkt-zu-Punkt mithilfe eines einzelnen Lichtstrahls von dem betrachteten Objekt zu seinem Abbild im Auge oder dem Bildschirm übertragen.	Al-Hazens Vorstellung des visuellen Bildes, das durch Lichtstrahlen abgebildet wird.

Diese eindeutigen konzeptuellen Parallelen zeigen, dass historische Vorstellungen für den Prozess der wissenschaftlichen Bildung von großer Bedeutung sind.¹⁹ Den didaktischen Nutzen und die curriculare Relevanz dieses Wissens im Physikunterricht kann mit den folgenden Argumenten begründet werden:

- (1) *kognitive Resonanz* beim Lernenden,
- (2) Lernen durch *Variation* des konzeptuellen Themas,
- (3) Naturwissenschaftsunterricht als *kulturelles Wissen* und
- (4) Aufbereitung des Wissens *über die Natur der Naturwissenschaft*.

Im Folgenden werden wir jeden dieser Aspekte kurz ansprechen.

1. Kognitive Resonanz

Innerhalb der weit akzeptierten konstruktivistischen Theorie des Lernens wird der Lernprozess als ein Konzeptwechsel aufgefasst, der vom Lehrer gefördert werden sollte.²⁰ Die oben genannten Parallelen (Tabelle 1) implizieren, dass durch das Ansprechen bestimmter historischer Vorstellungen vom Lehrer eine kognitive Resonanz des Lernenden hervorgerufen werden kann. Dabei handelt es sich um eine besondere Empfindsamkeit des Lernenden auf bestimmte Vorstellungen, die seinen kognitiven Hintergrund in dem genauen Thema aufzeigen.²¹ Letzteres könnte mit der Zone der nächsten Entwicklung („zone of proximal development“) des Lernenden verwandt

¹⁹ z.B. Matthews, M. (1994). *Science Teaching*. Routledge, New York.

²⁰ z.B. Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-27.

²¹ Galili, I. & Hazan, A. (2001). Experts' Views on Using History and Philosophy of Science in the Practice of Physics Instruction, *Science & Education*, 10 (4), 345-367.

sein. Dieser Effekt kann die Aufmerksamkeit, das Interesse und den Erfolg beim Überwinden von falschen Vorstellungen der Schüler erhöhen. Eine mögliche Unterrichtsmethode wäre, die historischen Theorien im Kontext der historischen Debatte, die sie begleitete, zu präsentieren und die Argumente für und gegen diese Theorien zu thematisieren.

2. Lernen durch Variation des konzeptionellen Themas

Neuere Studien der pädagogischen Psychologie betonten den Vorteil durch das Lernen von Vorstellungen mit *Variation*.²² Dies beinhaltet auch, dass der Lehrer Lernmaterial vorbereiten sollte, das dieses Hauptmerkmal mit konzeptioneller Variation anspricht. So kann er eine bedeutungsvolle Anpassung von bestimmten Vorstellungen beim Lernenden anregen. Der Lernende wird dabei begleitet und ermutigt, die Zielvorstellungen mithilfe von Vergleich, Analyse und Gegenüberstellung wahrzunehmen und zu übernehmen.²³ Die hier dargestellten historischen Vorstellungen zu den optischen Bildern und der Natur des Sehens beinhalten die benötigten konzeptionellen Variationen. Der Prozess sollte durch die Vermittlung des Lehrers unterstützt werden, der die historischen und philosophischen Inhalte vor dem Hintergrund der kulturellen historischen Unterschiede bei den Vorstellungen und dem Fehlen von Fachwissen in der Philosophie der Wissenschaft klarstellen sollte. Die Vermittlung sollte dazu führen, dass wissenschaftlichen Vorstellungen übernommen werden. Zum Beispiel könnte das Schema des „direkten“ Transfers von Punkten des Objekts mittels einzelner Strahlen zu Punkten auf dem entsprechenden Bild (Al-Hazens Vorstellung) den Schülern anfänglich plausibel vorkommen. Später jedoch, mit Einfluss der historischen Argumente, könnte dies mit Argumenten von Kepler oder späteren Gelehrten widerlegt werden.

3. Naturwissenschaftsunterricht als kulturelles Wissen

Die disziplinarischen Inhalte ohne jede konzeptionelle Variation zu unterrichten (wie es allgemein an Schulen weit verbreitet ist) kann einzelnes disziplinäres Wissen, jedoch nicht die Wissenschaft als einen lebendigen Körper des Wissens, repräsentieren.

²² Marton, F., Runesson, U. & Tsui, A. B. M. (2004). 'The Space of Learning.' In F. Marton, & A.B.M. Tsui (Eds.), *Classroom Discourse and the Space of Learning* (pp. 3-40). Lawrence Erlbaum, Mahwah, New Jersey.

²³ Schecker, H. & Niedderer, H. (1996). Contrastive Teaching: A Strategy to Promote Qualitative Conceptual Understanding of Science. In Treagust, D., Duit, R., and Fraser, B. (eds.): *Improving Teaching and Learning in Science and Mathematics*. New York: Teacher College Press, 141-151.

Wissenschaft ist eine Kultur und ihr Wissen hat eine hierarchische Struktur. Folglich lässt sich in jeder grundlegenden wissenschaftlichen Theorie ein *Kern* identifizieren, der grundlegende Prinzipien enthält, einen *Körper*, der Anwendungen der Prinzipien enthält (eine Auswahl an bereits gelösten Problemen, erklärten Phänomenen, erfundenen Hilfsmitteln und Apparaturen usw.) und die *Peripherie* – die Wissens Elemente, die dem Kern widersprechen.²⁴ Innerhalb dieses Rahmens schließt die Peripherie der klassischen Optik die alten Theorien des Sehens und ihre Vorstellungen (Sehstrahlen, Bildübertragung usw.) mit ein. Außerdem enthält die Peripherie die Prinzipien der fortgeschritteneren Theorien (z.B. der physikalischen Optik – der Wellentheorie des Lichts). All diese zusammen können eine Lernumgebung schaffen, die das kulturelle Inhaltswissen (*cultural content knowledge (CCK)*) in der Optik angemessen repräsentieren kann. Diese Dinge zu lernen führt zu einer Enkulturation des Lernenden in die Physik im Allgemeinen, ihre Grundprinzipien, Normen und Wissensstandards genauso wie ihre Auswirkungen. Dies ist ein kulturelles Herantreten an den Naturwissenschaftsunterricht, der sich an viele Schüler richtet aber nicht nur zwangsläufig an jene, die Physik in ihre Berufsorientierung miteinbeziehen.

4. Die Natur des wissenschaftlichen Wissens

Die Geschichte des optischen Bildes und des Sehens erstreckt sich über 2000 Jahre wissenschaftlichen Bestrebens. Während dieser langen Zeitspanne änderte die Wissenschaft über die verschiedenen Perioden - der hellenischen, hellenistischen, der muslimischen, der Periode des mittelalterlichen Europas und schlussendlich der wissenschaftlichen Revolution im 17. Jahrhundert - hindurch nicht nur einmal ihre charakteristischen Merkmale. Der dargestellte Exkurs zu den optischen Theorien liefert die Möglichkeit *die sich verändernden Merkmale der Wissenschaft*, wie zum Beispiel die Abweichungen in ihrer Epistemologie, zu beleuchten: die variierenden Vorlieben von rationalen und empirischen Annäherungen in der wissenschaftlichen Forschung sowie der Ontologie: sich verändernde Begriffe, grundlegende Vorstellungen im inhaltlichen Wissen.

Gleichzeitig lassen sich die *invarianten Merkmale der Wissenschaft*, wie zum Beispiel das Streben nach einer objektiven Wahrheit über die Natur, beobachten, die die generellen Prinzipien und Regeln, denen die Realität unterliegt, aufdecken. Vergleicht

²⁴ Tseitlin, M. & Galili I. (2005). Teaching physics in looking for its self: from a physics-discipline to a physics-culture, *Science & Education*, 14 (3-5), 235-261.

man die Wissensstände der verschiedenen historischen Entstehungs-Zeitspannen, fällt es leichter, die essentiellen Merkmale der modernen Wissenschaft zu würdigen – eine ausgewogene Synthese aus rationalistischen und empirischen Zugängen mit dem notwendigen Gebrauch von mathematischen Hilfsmitteln in der Wissenskodifizierung. Die Durchführung des vorgestellten Exkurses zur Geschichte des Sehens und des Bildes wurde in einer einjährigen Erprobung mit einer repräsentativen Gruppe von Schülern der 10. Klasse getestet. Ein Wissenszuwachs der Schüler konnte beobachtet und dokumentiert werden.²⁵

* * *

Tätigkeiten, Methoden und Medien für das Lernen

Wie oben angedeutet, könnte dieser Exkurs im Unterricht als Reihe interaktiver Vorlesungen mit Diskussionen aufgezoogen werden. Es empfiehlt sich, der Diskussion einen Fragebogen vorzuschicken, der die Schüler auffordert (1) ihre eigenen Beschreibungen davon, wie die Menschen Dinge sehen und (2) die Beweise, die sie dafür anbringen können, zu formulieren. Die Antworten auf diese Fragen sollten den dualen Zugang zum Naturwissenschaftsunterricht erleichtern und die ontologischen sowie die epistemologischen Aspekte des Physikwissens ansprechen. Die Fragen für den Fragebogen können den bereits veröffentlichten Forschungen, die sich mit dem Schülerwissen bezüglich des Sehens und dem optischen Bild beschäftigen, entnommen werden.²⁶

Der Gruppenleiter sollte dann die Ergebnisse des Fragebogens aufarbeiten und die am häufigsten auftretenden Schemata (Vorstellungen) der Lernenden zu dem Thema erkennen. Diese alternativen Schemata zum wissenschaftlichem Wissen sollten im Verlauf des Unterrichts, vielleicht mithilfe eines Exkurses in die Vergangenheit und der passenden optischen Theorie, angesprochen werden. Genauso wie zum Beispiel das Schema des aktiven Sehens Pythagoräer, Euklid und Ptolemäus wie auch ihren Kritiker Al-Hazen dazu aufforderte, ihre eigenen Sichtweisen darzustellen. Ähnlich war es bei dem Schema der holistischen Bildübertragung usw.

Der Kontext des Spiegelbildes ist ein sehr effektives Mittel, um die Schülersichtweisen auf die Bildentstehung und ihre Natur aufzuzeigen. Die Fragen, wo das Bild,

²⁵ Galili, I. & Hazan, A. (2001). The Effect of a History-Based Course in Optics on Students' Views about Science, *Science & Education*, 10 (1-2), 7-32.

²⁶ See the list of references at the end of the unit.

das wir im Spiegel sehen, gelegen ist, oder ob es ein Bild gibt, wenn wir vor dem Spiegel stehen, aber nicht hineinschauen, oder warum wir mehrfache Bilder sehen, (Abb. 24) hilft sehr effektiv dabei, die Wissensschemata ontologischer und epistemologischer Natur, die die Schüler in ihrer Wahrnehmung der optischen Realität anwenden, aufzudecken.

Die folgenden Tätigkeiten können den Optikunterricht bis zu einem allgemeinen kulturellen Wissen über die Wissenschaft hinaus ausweiten.



Abbildung 21a. Der Kopf der Medusa ist die Grundlage einer Säule eines Wasserbeckens in Istanbul. Warum ist ihr Kopf in einer umgekehrten Position?

1. In dem alten Wasserbecken aus der byzantinischen Zeit in Istanbul lässt sich die Skulptur des Kopfes der mythologischen Gorgone Medusa erkennen (Abb. 21a). Sie ist kurz über dem Wasserstand in einer umgedrehten Position platziert. Der Lehrer kann die Schüler dazu auffordern, zu interpretieren, warum die Skulptur diese Ausrichtung besitzt. Um dies zu interpretieren ist es notwendig, die Sage der Medusa zu kennen (der Glaube daran, dass man nicht direkt in ihr Gesicht schauen kann). Die Bedeutung für die Optik kann gezeigt werden, indem man noch einmal die Umwandlung des Spiegelbilds überprüft.²⁷ Eine umfangreich dokumentierte falsche Vorstellung von Schülern ist es, dem Spiegel die Fähigkeit zuzuschreiben, links und rechts zu vertauschen, anstatt die Richtungen „vom Spiegel“ und „zum Spiegel“.²⁸ Diese Diskussion lässt sich natürlicherweise bis zu einer Beobachtung eines geschriebenen Texts im Spiegel ausweiten. Auch die Tatsache, dass die Beschriftungen auf Krankenwagen spiegelverkehrt geschrieben sind, ist interessant für dieses Thema (Abb. 21b).

²⁷ Galili, I. & Zinn, B. (2007). 'Physics and Art – A Cultural Symbiosis in Physics Education.' *Science & Education*, 16 (3-5), 441-460.

²⁸ z.B. Galili, I. Goldberg, F. & Bendall, S. (1991), 'Some reflections on plane mirrors and images'. *The Physics Teacher*, 29 (7), 471-477



Abbildung 21b. Die Beschriftung „ambulance“ auf dem Auto ist spiegelverkehrt. Warum wird das bei Krankenwagen so gemacht? Viele Schüler glauben, das liegt an dem Spiegel, durch den der Fahrer des voranfahrenden Autos den Krankenwagen sieht und der „links und rechts vertauscht“. Ist das so?

2. Eine weitere kulturell bereichernde Tätigkeit zum Verständnis des optischen Bildes könnte sich ergeben, wenn man die Antwort folgende Frage sucht: Was könnte der Grund sein, dass in der künstlerischen Darstellung der Brandmarkung des hl. Franziskus von Giotto (Abb. 22a) die Übereinstimmung der Hände und Füße der beiden Figuren linke Hand/Fuß zu rechter Hand/Fuß ist, wobei andere spätere Künstler eine regelmäßige Übereinstimmung machten²⁹ (Abb. 22b)?



Abbildung 22. (a) Die Brandmarkung des hl. Franziskus von Giotto, ca.1300. (b) Die Brandmarkung des hl. Franziskus von der Legende der hl. Ursula, ca. 1500.

* * *

²⁹ Galili, I. & Zinn, B. (2007). ‘Physics and Art – A Cultural Symbiosis in Physics Education.’ *Science & Education*, 16 (3-5), 441-460.

Hindernisse für das Lehren und Lernen

1. Der dargestellte Exkurs zur Geschichte des optischen Bildes und des Sehens erstreckt sich über mehr als 2000 Jahre und beschäftigt sich mit Vorstellungen der alten Physik, die auf eine gänzlich andere Weise und mit anderen Argumenten dargestellt sind und unübliche, veraltete und fremde Sprache (Terminologie) und Darstellungsweisen verwendet. All dies macht den unmittelbaren Gebrauch der originalen Abhandlungen (die oftmals nur teilweise erhalten sind) durch heutige Schüler und Lehrer praktisch unmöglich. Deshalb wird empfohlen, Sekundärliteratur von Historikern der Naturwissenschaften zu nutzen, die eine moderne Sprache und Interpretation verwenden. In einem gewissen Umfang kann der oben dargestellte Exkurs zur konzeptionellen Entwicklung des Wissens über die Optik für den Anfang als Unterrichtsmittel verwendet werden. Für den weiterführenden Unterricht können die folgenden Ressourcen genutzt werden:

Lindberg, D. (1992). *The Beginnings of Western Science*. The University of Chicago, Chicago.

Ronchi, V. (1970). *The Nature of Light – A Historical Survey*. London: Heinemann, Newnes.

Ronchi, V. (1991). *Optics. The Science of Vision*. Dover, New York.

Park, D. (1997). *The Fire within the Eye. A Historical Essay on the Nature and Meaning of Light*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

2. Eines der größten Hindernisse für den Unterricht sind die Inhalte, die in der Wissenschaft veraltet sind und demzufolge anstatt positiv zu wirken vielleicht nur verunsichern. Die Antwort auf dieses Problem baut auf die gleichen Argumente auf, die oben gebraucht und ausgearbeitet worden sind, um die *Relevanz* des historischen Materials zu rechtfertigen:

- *Anregung* zum Lernen mittels *kognitiver Resonanz* und *Lernen durch Variation*, was den Schülern hilft, ihre falschen Vorstellungen abzulegen. Ihre Vorstellungen gleichen oft den wissenschaftlichen Ideen der Vergangenheit.

- Echtes Wissen über die Naturwissenschaften ist normalerweise in dem Sinne kulturell, weil es diskursiv ist und alternative wissenschaftliche Darstellungen zur gleichen Fragestellung, genau wie in den wissenschaftlichen Debatte, miteinbezieht;

- Das „Was“ zu wissen reicht in der Naturwissenschaft nicht aus. Es ist unentbehrlich zu wissen „Woher wissen wir es?“. Die Auseinandersetzung mit der historischen Wis-

sensentstehung und die Art und Weise wie Teile davon bekannt gemacht, kritisiert und widerlegt wurden, sind für das Verständnis wesentlich.

* * *

Pädagogische Fähigkeiten

Der Exkurs präsentiert die Geschichte des wissenschaftlichen Verständnisses des Sehens und des optischen Bildes. Der Exkurs verwendet so gut wie keinen mathematischen Formalismus jenseits von einfachen Strahlendiagrammen und den Gesetzen der Lichtbrechung und Reflexion. Zwei wichtige pädagogische Fähigkeiten werden vom Lehrer verlangt:

- die Vermittlung von Wissen, also die Fähigkeit, den Wissensaufbau in einem pädagogischen Dialog anzuregen, der schließlich zur gängigen Auffassung führt, indem in vergleichenden Analysen einige alternative Möglichkeiten besprochen werden. Der Lehrer sollte sensibel für die Ideen seiner Schüler sein und sollte entsprechend den Ideen von Lev Vygotsky³⁰ und dem "CCK- Konzept" als Vertreter der Physikultur fungieren (oben definiert)³¹. Er braucht die Fähigkeit, einen diachronischen Dialog zwischen den Gelehrten verschiedener Zeiten und Orte durchzuführen (Fig. 23).

³⁰ Vygotsky, L. (1934/1986). *Thought and Language*. The MIT Press, Cambridge, Mass.

³¹ Tseitlin, M. & Galili I. (2005). Teaching physics in looking for its self: from a physics-discipline to a physics-culture, *Science & Education*, 14 (3-5), 235-261.

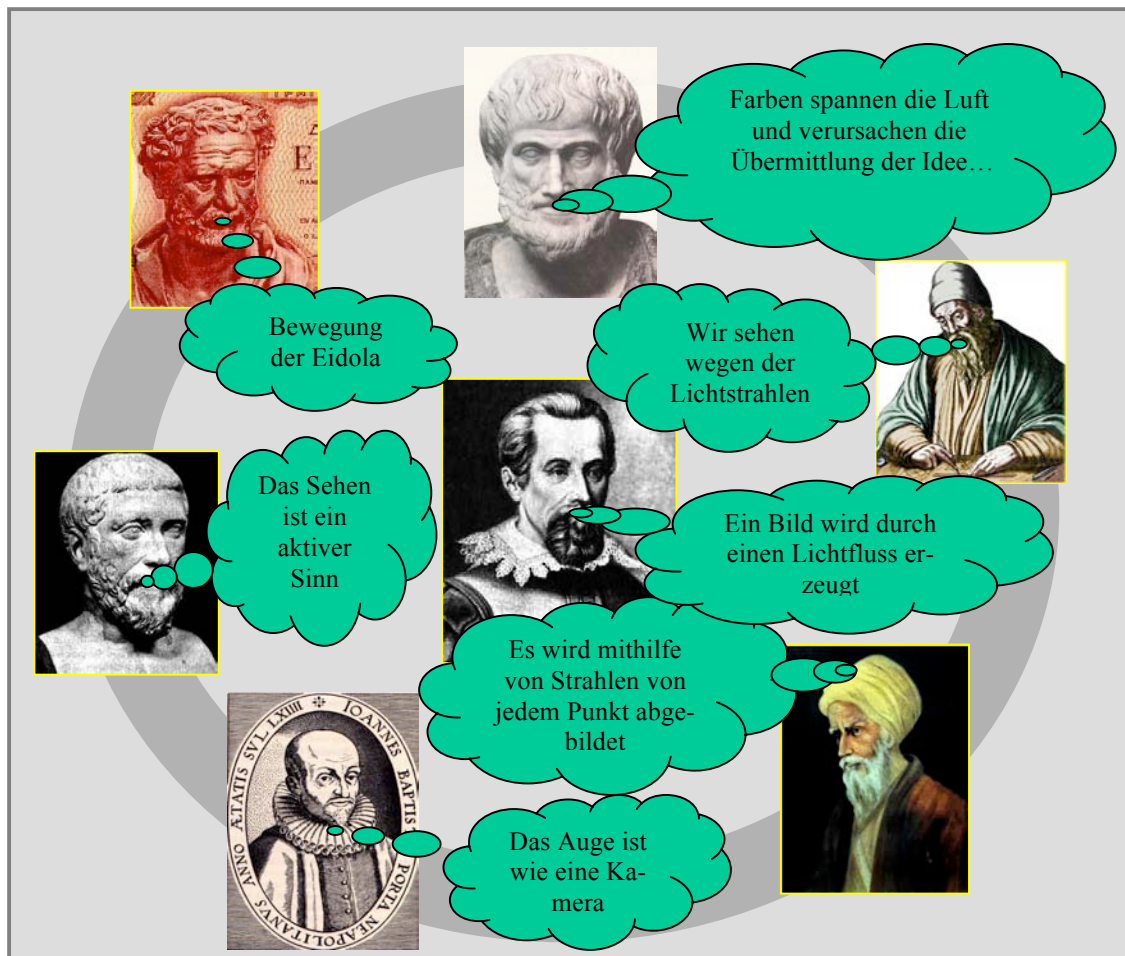


Abbildung 23. Symbolische Darstellung des diachronischen Dialogs über die Natur des Sehens.

- eine Geschichte über die Festigung von Wissen darzustellen erfordert zusätzlich zu den regulären Fähigkeiten eines Physiklehrers die Fähigkeit, Geschichten zu erzählen, ähnlich wie die Lehrer in den Geisteswissenschaften (Geschichte und Literatur). Diese Fähigkeit lässt sich mit der Darstellung der Geschichte der Optik von Park veranschaulichen.³²

* * *

Studien zum optischen Wissen von Schülern

Galili, I., Goldberg, F. & Bendall, S. (1993). 'Effects of prior knowledge and instruction on understanding image formation.' *Journal of Research in Science Teaching*, 30(3), 271-303

³² z.B., Park, D. (1997). *The Fire within the Eye. A Historical Essay on the Nature and Meaning of Light*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

- Bendall, S. Goldberg, F., & Galili, I. (1993). 'Prospective elementary teachers' prior knowledge about light.' *Journal of Research in Science Teaching*, 30 (9), 1169-1187.
- Galili, I. & Hazan, A. (2000). 'Learners' knowledge in optics: interpretation, structure, and analysis'. *International Journal in Science Education*, 22(1), 57-88.
- Galili, I. & Hazan, A. (2000). 'The influence of a historically oriented course on students' content knowledge in optics evaluated by means of facets - schemes analysis'. *American Journal of Physics*, 68 (7), S3-15
- Galili, I. & Hazan, A. (2001). 'The effect of a history-based course in optics on students' views about science.' *Science & Education*, 10 (1-2), 7-32.

* * *

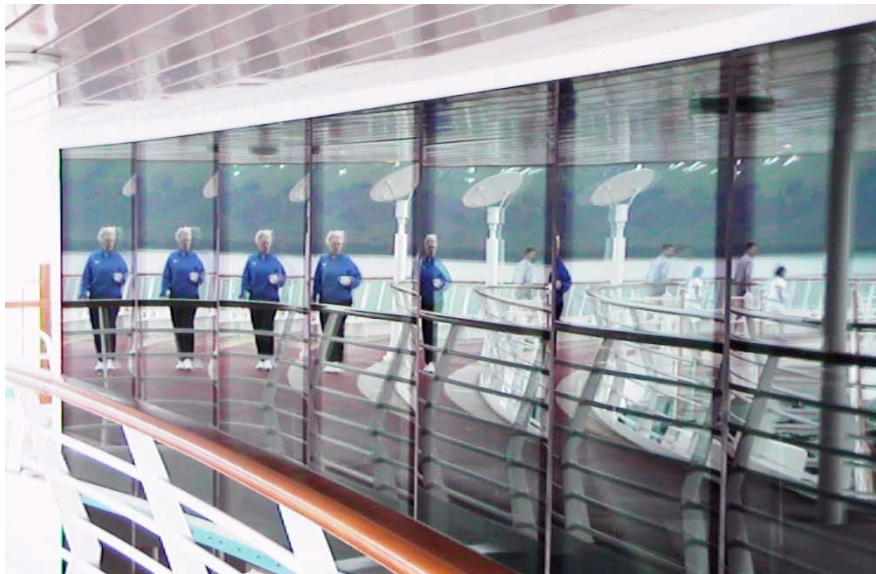


Abbildung 24. *Vielfache Bilder können dazu verwendet werden, das Prinzip von Al-Kindi–Al-Hazen zu veranschaulichen: Ausbreitung des Lichtes in alle Richtungen.*