

Auf der Suche nach Erklärungen

Licht und Wissen

Himmelslichter

Seit jeher beobachten Menschen die Natur. Vielleicht liegt es nur daran, dass ursprünglich das genaue Beobachten der Umwelt unser Überleben sicherte. Vielleicht ist uns aber auch eine »göttlich Neugier« eigen, von der Albert Einstein* im Zusammenhang mit dem Forscher- und Erfindergeist sprach. Jedenfalls ist immer derjenige im Vorteil, der mehr weiß. So haben die Menschen schon früh erkannt, dass das Sonnenlicht ihr Leben bestimmt. Nun ließen sich zur Deutung dieser Tatsache die unterschiedlichsten Götterwelten heranziehen. Das mochte beruhigen, denn Menschen brauchen Geschichten und Bilder, um sich ein konsistentes Weltbild zu schaffen. Allein praktischer Nutzen für des Tages Mühen konnte aus diesen Vorstellungen nicht gezogen werden.

Bei genauerer Betrachtung der Lichtphänomene, die sich am Himmel abspielten, stellten sich jedoch Regelmäßigkeiten heraus, auf die man bauen konnte: So verschieben sich die Orte von Sonnenaufgang und -untergang kontinuierlich hin und her. Damit verbunden ist die Tatsache, dass das Tageslicht unterschiedlich lang zur Verfügung steht. Werden die Tage kürzer, steigt die Sonne am Himmel nicht so hoch und es wird kälter. Irgendwann, am kürzesten Tag, erreicht die Sonne den tiefsten Mittagspunkt; anschließend werden die Tage allmählich wieder länger und wärmer. Das ist ein unumstößliches Faktum.

Allein diese Kenntnis mag angesichts eines kalten, entbehrungsrei-

* Die Lebensdaten der im Buch vorkommenden Personen finden sich im Personen- und Sachverzeichnis.

chen Winters unseren Vorfahren geholfen haben, den Mut nicht zu verlieren. Für das Anlegen von Vorräten und für die Arbeit auf den Feldern ist es jedoch besser, wenn man diesen Zyklus, den wir heute »Jahr« nennen, genauer kennt. Deshalb zählten sie die Tage und lernten, die Sonnenstände auszumessen und aufzuschreiben. Erste Kalender entstanden. Schon hier treffen wir auf ein Charakteristikum der menschlichen Erkenntnis: Wer mehr wissen und Neues entdecken will, muss genauer als seine Vorgänger hinschauen. Dies bedeutet, die Dinge und Vorgänge immer exakter durch Zahl und Maß zu charakterisieren.

Aus heutiger Sicht klingt das alles recht einleuchtend. Doch so einfach war die Sache früher nicht. In der Darstellung haben wir uns bisher auf die Sonne als Himmelslicht konzentriert. Doch was ist mit den anderen Naturerscheinungen, zum Beispiel mit dem Wetter? Dieses beeinflusst unser tagtägliches Verhältnis zur Sonne ganz wesentlich. Wenn diese am tiefsten steht, muss nicht unbedingt immer der kälteste Tag sein. Manches Mal sehen wir die Sonne wegen der Wolkendecke überhaupt nicht. Und was passiert bei den unterschiedlichen Farbspielen während des Sonnenauf- und -untergangs? Verändern sich bei Morgen- und Abendrot die Himmelslichter? Heute wissen wir natürlich, dass die Sonne ihre scheinbare Bahn am Himmel unabhängig vom Wetter zieht. Doch zu dieser Erkenntnis mussten unsere Vorfahren erst einmal gelangen. Der Himmel war unerreichbar – und die Menschen sahen viele Lichtphänomene. Sie schienen irgendwie miteinander in Verbindung zu stehen, und sei es durch das Treiben göttlicher Mächte. In einem solchen Durcheinander Regelmäßigkeiten zu erkennen, war eine gewaltige kreative menschliche Leistung.

Betrachten wir allein den Mond, das zweite dominierende Himmelslicht. Er erscheint uns ungefähr genau so groß wie die Sonne. Und doch verhalten sich die beiden völlig unterschiedlich. Der Mond ist fleckig, er verändert sein Aussehen, »nimmt zu und ab«. Sein Licht erhellt daher die Nacht manchmal relativ stark und manchmal überhaupt nicht. Und außerdem: Weshalb ist das Licht,

das vom Mond auf die Erde scheint, so gänzlich verschieden zu dem der Sonne? Zudem scheint sich der Mond nicht an die Bewegung seiner Himmelsschwester, der Sonne, zu halten. Zwar erkannten unsere Vorfahren auch beim Mond immer wiederkehrende Phänomene, doch die vom Mond abgeleitete Zeiteinheit »Monat« passt nicht in das von der Sonne festgelegte Jahr. Es bleiben immer Tage »übrig«. In größeren zeitlichen Abständen verdunkeln sich zudem Sonne und Mond völlig unerwartet. Die heute als Sonnen- und Mondfinsternisse bekannten Ereignisse versetzten unsere Vorfahren in Angst und Schrecken, denn plötzlich schien Altvertrautes nicht mehr zu stimmen. Doch auch hier wurden im Laufe der Zeit Regelmäßigkeiten entdeckt. Es schien natürliche Erklärungen zu geben.

In der Nacht leuchten als Himmelslichter außer dem Mond noch die Sterne. Ihre Bewegung ließen sich mit denen der Sonne in Verbindung bringen. Nach einem Jahr stehen (fast) alle wieder an gleicher Stelle. Fünf Sterne widersetzen sich allerdings diesem Rhythmus. Diese laufen in der Nähe der Sonnenbahn hin und her und vollführen dabei merkwürdige Schleifen. Diese sogenannten Wandelsterne – wir nennen sie heute Planeten – senden ein ruhigeres Licht aus als die übrigen. Bei genauerer Beobachtung bemerkt man auch ganz leichte Farbunterschiede. Außerdem strahlen sie zu bestimmten Zeiten heller und manchmal dunkler. Warum ist das so? Niemand wusste es.

Obwohl die Bewegung der Himmelslichter keiner verstand, wurden sie ganz praktisch genutzt. Neben den Sonnen- und Mondkalendern dienten die Positionen der Sterne zur Orientierung im Land- und Seeverkehr. Der tägliche Lauf der Sonne ließ sich zur Zeitmessung verwenden. Sonnenuhren, bei denen der Schattenverlauf eines Stabes gemessen wurde, sind schon aus dem alten Ägypten bekannt. Sogar riesige Obelisken wurden als »Schattenstäbe« genutzt. Diese gewaltigen Pfeiler stellten wie die Pyramiden die zu Stein gewordenen Strahlen des Sonnengottes dar und verbanden auf diese Weise den Himmel mit der Erde. Religiöse Verehrung und

praktische Anwendung gingen hier Hand in Hand. Das Licht kam vom Himmel auf die Erde und diente den Menschen.

Licht, Bilder und Philosophie

Was machen wir, wenn uns die alltäglichen Dinge zu unübersichtlich werden? Ab einem bestimmten Punkt sollten wir anfangen, aufzuräumen und zu sortieren. Wir müssen eine Ordnung herstellen. Der Menschheit als Ganzes erging es nicht anders. Im Laufe der Jahrtausende wurden Erkenntnisse über die Natur angesammelt. Wirtschaft und Technik entwickelten sich. Doch wie sollte deren wachsende Komplexität begriffen werden? Es mussten neue, ordnende Wege im Verständnis gefunden werden.

Um 600 bis 500 v. Chr. war es in Griechenland so weit: Eine Revolution im Denken der Menschheit bahnte sich an, die Philosophie (übersetzt: die Liebe zur Weisheit) entstand. Da es unzweifelhaft Regelmäßigkeiten und Zusammenhänge in der Natur gab, versuchten die Philosophen, die Welt in ihrer Vielfalt durch systematisches Denken zu begreifen. Die so geschaffenen allgemeinen Lehren von der Natur (griechisch *physikē*) legten einen Grundstein zu dem, was wir heute »Physik« nennen.

Die Philosophen, welche die beobachteten Phänomene auf natürliche Weise erklären wollten und die Antwort auf die Frage nach dem Urgrund und dem Urgesetz der Welt suchten, maßen natürlich dem Licht eine besondere Rolle bei. Bei den uns überlieferten Ansichten der Griechen haben wir es zunächst nur mit Beobachtungen, daraus abgeleiteten Annahmen, Schlussfolgerungen und Spekulationen zu tun – und nicht wie in der modernen Physik mit experimentell nachprüfbaren und mathematisch formulierbaren Zusammenhängen.

So meinte beispielsweise im 6. Jahrhundert v. Chr. Anaximander in Bezug auf die Himmelslichter, dass die Gestirne aus einer explodierten Feuerkugel entstanden seien, die – ähnlich der Rinde um

einen Baumstamm – die Erde umgeben habe. Etwas später vertrat Anaximenes die Ansicht, der Urstoff aller Dinge sei die Luft. Durch entsprechende Verdünnung entstehe Feuer, und infolge feuchter Ausdünstungen der Erde seien so die Gestirne am Himmel gebildet worden. Der Philosoph und Dichter Xenophanes hingegen war der Überzeugung, die Sonne und die Gestirne würden täglich aus glühend gewordenen Wolken entstehen und beim Untergang wieder verlöschen. Auch Heraklit lässt die Sterne aus verdunstetem Wasser als Himmelsfeuer auftauchen. Bei Empedokles ist das Feuer eines von vier Elementen, aus denen die Welt gebaut sein soll: Erde, Wasser, Luft – und eben Feuer. Und Anaxagoras betrachtete die Gestirne als von der Erde abgetrennte, glühend gewordene Gesteinsmassen. Er schloss das unter anderem aus einem 467 v. Chr. niedergegangenen heißen Meteoriten. Zudem habe seiner Meinung nach der Mond Berge und Täler und strahle nicht selbst, sondern erhalte sein Licht von der Sonne.

Doch Sokrates, eine der charismatischsten Figuren des antiken Griechenlands, widersprach solchen irdischen Vergleichen. Sonne und Feuer seien nicht aus der gleichen Substanz gemacht. So könne man zwar ins Feuer, aber nicht in die Sonne schauen. Und während Letztere unser Leben ermögliche und Pflanzen wachsen lasse, verbrenne das Feuer alles Lebendige. Außerdem wies er darauf hin, dass Feuer ziemlich schnell verlösche, während die Sonne sich offenbar nicht abkühle und sich damit so verhalte wie nichts Irdisches.

So unterschiedlich diese Erklärungen auch sein mögen, sie zeugen alle von dem Versuch, Ordnung in die Vielfältigkeit der Welt zu bringen. Die Naturphilosophen bemühten sich, natürliche Erklärungen zu finden, indem sie Unbekanntes (zum Beispiel die Vorgänge am Himmel) durch Bekanntes (die Erfahrungen aus dem Alltag) erklärten. Das ist eine Vorgehensweise, die sich bis heute durch die gesamte Wissenschaftsgeschichte zieht. Denn indem wir Unbekanntes auf Bekanntes zurückführen, es uns sozusagen vertraut machen, erweitern wir unser Wissen. Das so neu Erklärte kann dann verwendet werden, um wiederum Neues und Unbe-

kanntes zu verstehen: die Sonne (etwas Unbekanntes) = ein glühender Stein (etwas Bekanntes). Wissenschaft ist demnach nichts anderes als die Suche nach Bildern, die jedoch im Laufe der Zeit immer komplexer und diffiziler werden.

Neben Lichtquellen wie Sonne oder Feuer interessierte die Menschen von jeher die Natur des Sehens. Dieser erstaunliche Vorgang ist offenbar auf das Engste mit dem Licht verbunden, denn sobald dieses fehlt, sehen wir schlichtweg nichts. Trotzdem gingen viele große Denker des Altertums davon aus, dass der Mensch seine Umgebung deshalb visuell wahrnimmt, weil seine Augen »Sehstrahlen« aussenden. Diese sollten die betrachteten Gegenstände »abtasten«, um dadurch Informationen zu gewinnen. Offensichtlich hatten die alten Griechen bei ihrem Erklärungsmodell die Erfahrung mit dem Tastsinn vor Augen: Was wir berühren, können wir erfühlen, und wir wissen alle, dass uns manche gesehene Dinge sehr stark »berühren« können. Es lässt sich also durchaus annehmen, dass eine – wie auch immer geartete – Verbindung zwischen Sehendem und Gesehenem besteht. Auf Pythagoras geht vermutlich die Vorstellung zurück, diese Wechselwirkung käme durch heiße Ausdünstungen zustande, die von den Augen zu den betrachteten Gegenständen ströme. Dort zurückgeworfen, werde diese Strömung umgelenkt und wirke so auf das Auge zurück. Der schon erwähnte Empedokles sah das etwas anders. Er verglich das Auge mit einer Laterne, deren Strahlen die Welt erleuchteten. Ein naheliegender Gedanke, schließlich sprechen wir ja heute auch noch vom »Augenlicht«.

Natürlich wurden auch Meinungen vertreten, wonach es keine Sehstrahlen gebe, die Wirkung allein von den Gegenständen ausgehe und so auf die Augen wirke. So begründeten Leukipp und sein Schüler Demokrit eine Lehre, wonach die gesamte Welt aus kleinsten, unteilbaren Teilchen aufgebaut sei. Diese wurden Atome (griechisch *átomos* = das Unzerschneidbare) genannt. Nach Demokrits Vorstellung lösen sich von den Gegenständen ununterbrochen hauchdünne Atomschichten ab, treffen auf unsere Augen und rufen

dabei entsprechende »Eindrücke« hervor. Aristoteles lehnte sowohl diese als auch die Vorstellung von den Sehstrahlen mit dem Argument ab, dass man bei derlei Wechselwirkungen ja auch bei Nacht etwas sehen müsse. Er stellte die Vermutung auf, dass es zwischen Augen und gesehenen Gegenständen ein undurchsichtiges Medium gebe, das erst durch den Einfluss einer Lichtquelle durchsichtig werde.

Dass Lichtquellen und insbesondere die Sonne von ganz wesentlicher Bedeutung für den Sehvorgang ist, hat auch schon Platon, der Lehrer von Aristoteles, vermutet. In seinem Sonnengleichnis maß er zudem der Sonne eine Bedeutung zu, die weit über das rein Physikalische hinausging. Platon meinte, dass der Mensch nur im Lichte des Guten »das Sein« zu erkennen vermöge. Dabei verglich er das Gute innerhalb des Vorstellbaren mit der Stellung der Sonne im Bereich des Sichtbaren: »Wie die Sonne dem Sichtbaren nicht nur das Vermögen verleiht, gesehen zu werden, sondern auch das Werden und Wachsen und Nahrung, ohne dass sie selbst ein Werden ist.«

Doch so anschaulich und poetisch die erdachten Bilder vom Licht, seinen Quellen und vom Sehen auch sein mochten, sie blieben vorerst alle Spekulationen. Zwar waren diese Gedankengebäude zum Teil außerordentlich komplex, umfassend und, soweit es ging, logisch aufgebaut, beweisen ließen sie sich jedoch nicht. Etliche dieser Ideen stellten sich im Nachhinein als rundweg falsch heraus. Trotzdem blieb eine Reihe von Grundgedanken der alten Griechen bis in unsere Zeit erhalten. Wir werden ihnen deshalb auf unserer Reise durch die Bilderwelt des Lichts noch öfters begegnen.

Das wirklich Neue in der damals aufkommenden Denkweise waren aber nicht die einzelnen Spekulationen, sondern die Methoden, mit denen Wissen geordnet, erklärt und gefunden werden konnte. Zunächst wurden klare und strenge Definitionen gesucht, damit deutlich ist, worüber genau gesprochen wird. Darauf aufbauend hat man einige Axiome, d. h. einleuchtende Grundsätze oder allgemein akzeptierte Erfahrungen, formuliert, von denen Schritt für Schritt

auf weitere Konsequenzen und Erkenntnisse geschlossen werden konnte. Diese Vorgehensweise nennen wir Deduktion. Als Ergänzung dazu betrachtet man die sogenannte Induktion: Hierbei werden aus Einzelbeobachtungen allgemeine Erkenntnisse abgeleitet. Diese von den Griechen eingeführten Grundmethoden der Wissenschaft werden bis heute angewandt.

Als exemplarische Wissenschaften, in der solche Vorgehensweisen unabdingbar sind, wurden die Mathematik im Allgemeinen und die Geometrie im Besonderen angesehen. Nach Platon würden diese die Seele zur Wahrheit führen und die philosophische Denkart erzeugen, wobei er praktische Anwendungen nicht zur Mathematik rechnete. Erklären lässt sich diese Haltung mit Platons Ideenlehre, wonach die Wirklichkeit in zwei Welten aufgeteilt ist: Die Welt der unvergänglichen Ideen, der sogenannten Urbilder, und die untergeordnete Welt des Materiellen und Körperlichen, die nach den Ideen geformt ist. Während die Ideen nur dem reinen, d.h. dem mathematischen Denken zugänglich seien, könne man die materielle Welt lediglich über die Sinne wahrnehmen und bestenfalls bildhafte Erkenntnisse gewinnen.

So alt diese Vorstellungen auch sind, in der modernen Physik erweisen sich diese Gedanken als ausgesprochen aktuell. Je tiefer wir nämlich in die offenbar feste Materie eindringen, desto mehr »löst sich« deren Inhalt auf und wird »immateriell«. Es gibt scheinbar überhaupt nichts »Festes«. Letztlich bleiben scheinbar bloß noch mathematische Strukturen – eben die Urbilder – übrig.

Beim Licht wird diese Tatsache schon im Alltag offensichtlich: Wir sehen es, wir spüren es, es zeigt die unterschiedlichsten Wirkungen, es ist augenscheinlich da – aber »greifen« können wir es nicht. Eine exakte mathematische Beschreibung ist möglich, doch »materiellen Charakter« scheint das Licht nicht zu besitzen. In welche der beiden Welten Platons gehört es also? Hier werden Grenzen des Denkens offensichtlich. Um also weiter voranzukommen im Verständnis der Welt, können die Menschen nicht ausschließlich den philosophischen oder den mathematischen Weg der Erkenntnis gehen. Es

muss weitere Optionen geben: Kunst und Religion können beispielsweise Beiträge liefern; und um 300 v. Chr. etablierten sich in Griechenland außerdem auch zunehmend angewandte »Fachwissenschaften«, die sich, ganz praktisch orientiert, mit Mechanik, Astronomie oder eben mit dem Licht befassten. Auch deren Wege wollen wir hier weiterverfolgen.

Licht und Geometrie

Wenn wir heute eine neue Brille brauchen, gehen wir zum Optiker. Diese Berufsbezeichnung leitet sich ab vom griechischen Wort *optike*, das die Lehre vom Sichtbaren bezeichnet. Heute steht der Begriff Optik allgemein für »die Lehre vom Licht«, also den Teilbereich der Physik, der sich mit dem Licht und seinen Wechselwirkungen beschäftigt.

Die mathematischen Grundlagen dieser Wissenschaft stammen wahrscheinlich von Euklid, der um 300 v. Chr. in Alexandria lebte. Er ist in der Wissenschaft vor allem als Autor des einflussreichsten Mathematiklehrbuchs in der Geschichte bekannt. Bis in die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts war sein Werk mit dem Titel *Die Elemente* das nach der Bibel weitverbreitetste Buch auf der Welt. Euklid fasst darin das mathematische Wissen seiner Zeit zusammen, indem er die Arithmetik und die Geometrie aus Definitionen und Axiomen musterhaft für alle weitere Wissenschaft aufbaut.

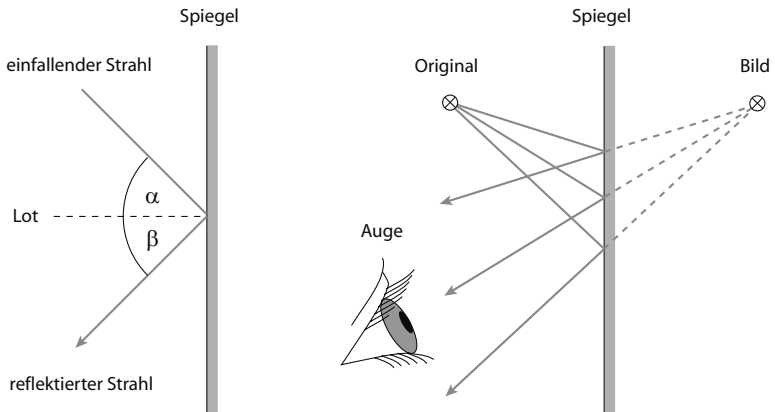
Ausgehend von dem Wissen über Punkte, Geraden, Abstände, Winkel usw. soll Euklid – seine Autorenschaft ist nicht gesichert – zwei weitere Werke verfasst haben, die das Fundament für alle späteren Lehren vom Licht legten. Das erste Buch heißt schlicht und einfach *Optik*. Darin beschreibt der Autor geometrisch den Sehvorgang und diskutiert Fragen zur Perspektive und zur scheinbaren Größe von Körpern. Der Titel des zweiten Buches, *Katoptrik*, leitet sich vom griechischen Wort für »spiegelnd« ab. Hier werden die Lichtreflexionen an ebenen und gekrümmten Spiegeln behandelt.

Euklid ging zwar von der Vorstellung der »Sehstrahlen« aus, doch deren Natur spielte bei seinen Ableitungen und Schlussfolgerungen keine Rolle mehr. Wie wir heute wissen, ist es nicht von Bedeutung, ob sich die gedachten und gezeichneten Strahlen* vom Auge zum Gegenstand oder umgekehrt von dort zum Auge ausbreiten. Die geometrischen Betrachtungen führten jedenfalls zu richtigen, grundlegenden Erkenntnissen.

Euklid ging streng axiomatisch vor und stellte als Erstes die Geradlinigkeit von Strahlen fest. Die Erfahrung lehrt das. Der Blick geht immer geradeaus, sodass sich Geraden von den Augen zu den betrachteten Gegenständen konstruieren lassen. Je näher ein betrachtetes Objekt steht, desto größer ist der Winkel zwischen den Geraden, die wir uns vom Auge zu den Rändern des Objekts denken. Von diesen Grundgedanken ausgehend, erarbeitete Euklid Schritt für Schritt die Gesetze des Sehens, der Perspektive und der Lichtspiegelung. Gerade bei Letzterem beschreibt er einen fundamentalen Zusammenhang: Wenn Strahlen unter einem beliebigen Winkel auf eine ebene, spiegelnde Fläche fallen, dann werden sie von dort in dem gleichen Winkel nach der anderen Seite hin reflektiert. Das Reflexionsgesetz ist geboren.

An dieser Stelle verwenden wir erstmals einen ganz entscheidenden Begriff für die Naturwissenschaft: das Gesetz. Es beschreibt hier keine von Menschen festgelegte Rechtsnorm, sondern einen nachweisbaren und mathematisch – d. h. »mit Formeln« – formulierbaren Zusammenhang zwischen Messbarem. Winkel werden (wegen Euklid und seinen Zeitgenossen) auch noch heute mit griechischen Buchstaben bezeichnet. Wenn wir den Einfallswinkel mit α benennen und den Reflexionswinkel mit β , dann gilt $\alpha = \beta$. Dieser Zusammenhang scheint recht simpel zu sein, doch damit lassen sich die Wege des Lichts bei den verschiedensten Reflexionen bestimmen. So können wir beispielsweise erklären, wie Bilder im Spiegel entstehen.

* Wiederholt vorkommende physikalische Fachbegriffe werden kurz im Glossar erklärt.



1 Das Reflexionsgesetz (links) und die damit erklärte Bildentstehung am Spiegel (rechts)

Eine Lampe sendet Lichtstrahlen aus, die entsprechend des Reflexionsgesetzes abgelenkt werden. Bei jedem dieser Strahlen muss der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel sein. Wenn jemand in den Spiegel hineinsieht, so scheinen alle reflektierten Strahlen von einem Punkt hinter dem Spiegel auszugehen, da das Auge nicht wahrnimmt, dass die Strahlen umgelenkt worden sind. Der Beobachter sieht damit das Abbild – und nicht die Lampe selbst.

Die Annahme, dass es möglich ist, Licht- und Sehvorgänge mit Strahlen zu beschreiben, hat sich also bei der Erklärung des Phänomens der Spiegelung als vorteilhaft erwiesen. So können wir versuchen, noch weitere Erscheinungen zu erfassen. Wenn ein Gedankenbild, zum Beispiel *Licht = Strahlen*, zum Erklären von Sachverhalten verwendet wird, so spricht man von einem Modell. Dieses vereinfachende »Abbild der Wirklichkeit« darf aber nicht mit der Wirklichkeit selbst gleichgesetzt werden. So kann Licht zwar mit (mathematischen) Strahlen beschrieben werden, es bedeutet aber nicht, dass Licht »aus Strahlen besteht«. Das scheint etwas spitzfindig formuliert, doch wir werden auf unserem Gang durch die Geschichte der Optik noch einige Male auf diesen entscheidenden Unterschied stoßen. Manche große Denker sind da in

die Irre gegangen. Sie entwarfen ein möglichst anschauliches Modell, das für einige Erklärungen gut war, und fassten das Ganze mithilfe der Mathematik zu einer Theorie zusammen. Doch dann waren sie regelrecht irritiert oder gar erzürnt, wenn sich die Natur unter bestimmten Bedingungen nicht an ihre vereinfachenden Vorstellungen hielt und das Modell versagte. Auch das Strahlenmodell von Euklid hat seine Grenzen. Wir werden darauf zurückkommen. Am Beispiel dieser Gedankengänge lässt sich ein weiterer Wesenszug der Naturwissenschaft erkennen: Euklid befasste sich nicht mit der physikalischen Natur der Strahlen. Er fragte bei seinen geometrischen Betrachtungen nicht, *was* eine Sache ist. Er beschrieb nur, *wie* sie ist und *wie* sie sich verhält. Wissenschaft beschäftigt sich also vorwiegend mit dem »Wie«. Auch diese scheinbar simple Tatsache dürfen wir nicht vergessen. Sie trennt nämlich ziemlich scharf, was Wissenschaft vermag und was nicht.

Spiegel

Der erste Spiegel, in den Menschen blickten, war sicherlich die Wasseroberfläche. Können wir uns den Schrecken vorstellen, wenn jemand erstmals bemerkt, dass dieser fremde Mensch im Wasser er selbst ist? Ein Zwillingsswesen, das uns aufs Haar gleicht, scheint in einer anderen, uns nicht zugänglichen Welt zu leben. Vielleicht mag das der Grund sein, warum die Menschen deshalb von jeher so fasziniert von Spiegelbildern waren, dass sie unzählige Geschichten, Sagen und Märchen darüber schufen. Denken wir nur an Schneewittchens Stiefmutter mit ihrem »Spieglein, Spieglein, an der Wand ...«.

Erste Spiegel für den täglichen Gebrauch existierten vermutlich bereits in der Bronzezeit. Die damals schon herstellbaren Metallplatten ließen sich mit Leder und feiner Asche so weit polieren, dass sich die Welt darin spiegelte. Sicher wissen wir von Spiegeln als Gebrauchsgegenstände in Mesopotamien ca. 3000 v. Chr. Aus dem alten Ägypten sind sogar bis heute noch einige Rahmen für

Handspiegel erhalten geblieben. Auch im Alten Testament ist schon von den »Spiegeln der Frauen« die Rede. Außer aus polierten Metallplatten wurden im Altertum auch Spiegel aus Obsidian gefertigt, einem natürlich vorkommenden Gesteinsglas vulkanischen Ursprungs, welches sich gut bearbeiten und damit »zum Spiegeln« bringen lässt.

Bisher hatten wir uns im Zusammenhang mit Euklids Reflexionsgesetz nur einfache, ebene Spiegel angesehen. Doch wie verhält es sich mit der Reflexion bei unebenen Flächen? Ein bewegter Wasserspiegel verzerrt das Spiegelbild. Auch wenn Metallflächen gekrümmt sind, ergeben sich mitunter die eigenartigsten Bilder. Lassen sich diese Phänomene mit Euklids Strahlen erklären? – Natürlich, sonst wäre sein Strahlenmodell nicht allzu viel wert.

Der »Trick« besteht darin, sich die gekrümmte Fläche aus vielen kleinen ebenen Flächen zusammengesetzt zu denken. (Auch hier müssen wir beachten: Die Wasserfläche besteht nicht aus solchen kleinen Flächen. Die Wissenschaftler stellen es sich nur so vor!) Mathematiker können auf jeden Punkt einer solchen Fläche »ein Lot fallen« – so nennt man die Konstruktion einer Geraden, die im betrachteten Punkt senkrecht auf der Oberfläche steht. Einfallswinkel und Reflexionswinkel der jeweiligen Strahlen werden in Bezug auf diese Senkrechten entsprechend des Reflexionsgesetzes bestimmt. Diese Überlegungen lassen sich auf alle möglichen Oberflächen übertragen. Man muss nur schauen, wie die kleine Teilfläche geneigt ist, auf die ein Strahl fällt. So verstehen wir das Glitzern einer von der Sonne beschienenen Wasseroberfläche oder die diffuse »Streuung« von Licht an rauen Oberflächen. Die vergrößerten und verkleinerten Bilder an Hohlspiegeln lassen sich ebenso erklären wie die Tatsache, dass sich Sonnenstrahlen mittels Hohlspiegel in einem Punkt, dem Brennpunkt, sammeln lassen. Dieser Effekt war damals schon bekannt und wurde zum Anzünden von Feuer genutzt. Heute wird im Übrigen in Anlehnung an diese altertümliche Technik das olympische Feuer im antiken Olympia noch mit einem einfachen Brennspiegel entfacht.

Die Anwendung der Erkenntnisse über Lichtbündelung ging im alten Griechenland jedoch wahrscheinlich nicht so weit, wie es eine Legende erzählt. Archimedes, der bedeutendste Mathematiker und Ingenieur des Altertums, hat angeblich seine am Meer gelegene Heimatstadt Syrakus gegen die Römer verteidigt, indem er Spiegel auf die angreifenden Schiffe richtete. Im Brennpunkt des Sonnenlichts sollen sich diese entzündet haben. Eine geniale Verteidigungsstrategie, wenn sie die Realität nicht Lügen strafen würde. Denn um den Wahrheitsgehalt der Geschichte zu überprüfen, wurde der Sachverhalt unter dem Aspekt der Machbarkeit immer wieder nachgestellt. Jedes Mal war das Ergebnis negativ. Zwar wurde 2005 von Studenten des Massachusetts Institute of Technology (MIT) ein hölzernes Schiffsmodell in 30 Meter Entfernung entzündet, doch dazu mussten 127 ruhende Spiegel mehrere Minuten lang auf einen Punkt gerichtet werden. Solche Versuche scheitern aber sofort, wenn sich das Zielobjekt oder die Spiegel nur geringfügig bewegen oder eine Wolke aufzieht, die die Sonne verdeckt. Unter rauen Kriegsbedingungen, bei Seegang und mit der damaligen Technologie der Spiegelherstellung war also eine solche »Licht-Strahlenwaffe« nicht einsetzbar. Diese interessante Geschichte dürfte sich folglich nicht zugetragen haben. Etwas wahrscheinlicher dagegen, aber historisch leider auch nicht verbürgt, ist die berühmte Sache mit der Badewanne, aus der Archimedes angesichts der Entdeckung des Auftriebs herausgesprungen sein soll, um anschließend nackt und »Heureka!« rufend durch die Stadt zu laufen. Schade eigentlich, denn gerade diese Anekdoten aus dem Physikunterricht bleiben eher im Gedächtnis haften als die nüchternen Konstruktionen mit Strahlen oder die Rechnungen mit abstrakten Größen.

Neben der exakten Beschreibung der Vorgänge in der Natur bemühen sich Wissenschaftler aber immer, allgemeinere Prinzipien zu finden, die hinter allem stehen. Wenn sich Sachverhalte logisch darstellen und aus anderen ableiten lassen, dann gibt es möglicherweise einige wenige Grundgesetze, aus denen heraus »alles« zu verstehen ist. Heron von Alexandria war einer, der nach solchen

grundlegenden Gesetzen suchte. Dabei hinterfragte er die geometrisch begründete Optik von Euklid und stellte fest, dass sich sowohl die geradlinige Ausbreitung und als auch die Reflexion von Licht durch ein »Minimal-Prinzip« erklären lassen: Licht »nimmt« immer den kürzesten Weg. Wenn das vorausgesetzt wird, ergeben sich geradlinige Ausbreitung und Reflexionsgesetz zwangsläufig. Die Welt ist mit dieser Erkenntnis ein Stückchen durchschaubarer geworden, weil sich fortan eine Reihe von Beobachtungen »mit einem Satz« erklären ließen. Fragte man aber, warum denn vom Licht der kürzeste Weg »gewählt« wird, stand man vor einem weiteren Rätsel. Herons Minimal-Prinzip hat deshalb die Forscher der folgenden Generationen immer wieder beschäftigt.

Lichtbrechung

Um noch einmal auf Archimedes und seine Badewanne zurückzukommen: Im Wasser erleben wir nicht nur das Phänomen des Auftriebs, sondern bei genauerem Hinsehen bemerken wir auch eine Reihe von Lichteffekten. So erscheinen uns alle Gegenstände, die schräg in das Wasser eingetaucht werden, merkwürdig abgelenkt. Besonders eigenartig mutet diese Wirkung bei den eigenen Händen, Armen oder Beinen an. Wir spüren, dass alles in Ordnung ist, doch wir sehen etwas völlig anderes. Woran liegt das?

Wasser »bricht« offenbar die hindurchtretenden Strahlen derart, dass die dabei entstehenden Bilder verzerrt werden. In einer wassergefüllten Glaskugel oder bei linsenförmig gewölbten Glasstücken sehen wir sogar die weit dahinterliegende Umgebung auf den Kopf gestellt. Selbst bei Wassertropfen an Fensterscheiben ist dieser Effekt zu beobachten. Gegenstände, die nahe liegen, werden hingegen vergrößert. Sind das alles optische Täuschungen?

Sonnenlicht, das durch Kugeln oder Linsen tritt, sammelt sich in einem Brennpunkt. Die gleichen Effekte kennen wir schon vom Hohlspiegel. Doch hier liegen die Dinge anders: Licht wird nicht

reflektiert, sondern geht durch transparente Stoffe wie Wasser und Glas hindurch und ändert dabei seine Richtung. Diese Phänomene waren den alten Griechen bekannt. So schrieb der Dichter Aristophanes schon um 423 v. Chr. in seiner Komödie *Die Wolken* über ein Brennglas und seine Verwendung als »Feuerzeug«.

Von der Brennwirkung und der Bildvergrößerung von wassergefüllten Kugeln oder speziell geformten Gläsern oder Kristallen wussten auch die Römer. Plinius der Ältere berichtete von Kaiser Nero, der mit einem geschliffenen Smaragd als Einglas vor dem Auge die Gladiatorenkämpfe angeblich besser verfolgen konnte. Dies ist möglicherweise der erste historische Beleg für eine Sehhilfe. Zwar ist die heute im Britischen Museum zu bewundernde »Linse von Nimrud« mit ihren 3000 Jahren deutlich älter als alles, was uns von Griechen und Römern überliefert wurde, doch über ihre Verwendung in Assyrien gibt es keine sicheren Belege. Ob sie tatsächlich als Vergrößerungs- oder Brennglas oder nur als Schmuckstein gedient hat, ist bis heute umstritten. Fest steht nur, dass die Lichtbrechung im Altertum bekannt war, aber erklären ließ sich dieses Phänomen damals jedenfalls nicht.

Den ersten erfolgreichen Schritt dazu tat im 2. Jahrhundert n. Chr. Klaudios Ptolemaios, der heute vor allem durch das nach ihm benannte geozentrische Weltbild bekannt ist. Sein Buch *Optik* ist uns nur in arabischer und lateinischer Überlieferung erhalten. Er fasst darin das damalige Wissen über das Licht zusammen und fügt – das ist erstmalig in der Fachliteratur – Messungen zur Brechung hinzu. Zunächst stellt er fest, dass die Strahlen umso stärker gebrochen werden, je größer die Dichte des Stoffes ist, der die Ablenkung bewirkt. Für kleine Winkel ergeben sich Proportionalitäten, d. h. der Brechungswinkel wächst im gleichen Maße wie der Einfallswinkel. Wenn man diese Werte in einer Grafik darstellt, ergibt sich eine Gerade. Je größer jedoch die Winkel werden, desto mehr weichen die Werte von der Geraden ab. Eine mathematische Beziehung zwischen beiden Größen, ein physikalisches Gesetz, konnte Ptolemaios nicht finden. Das gelang erst etwa 900 Jahre später in Persien.