

## Die Welt jenseits der geschliffenen Gläser Zur Bedeutung des Sehens in der klassischen Physik

H. Joachim Schlichting

Institut für Didaktik der Physik, Westfälische-Wilhelms-Universität Münster

([schlichting@uni-muenster.de](mailto:schlichting@uni-muenster.de))

(Eingegangen: 01.10.2002; Angenommen: 22.01.2003)

### Kurzfassung

An der Schwelle zur Neuzeit steht ein technisches Objekt, ein Produkt der Brillenmacher, ein "Stückchen Glas, ...auf Staub" abgerieben: die Linse. Wie ein Deus ex machina fällt sie Galilei in die Hände und wird im tatsächlichen wie im übertragenen Sinne für eine verbesserte, ja eine neue Sehweise sorgen. Die vorher undenkbbare Verbindung von Handwerkskunst und spekulativer Welterkenntnis, wird zu einem typischen Aspekt der neuzeitliche Physik.

*Laßt uns vielmehr den Geist des Geschöpfes  
bewundern,  
das sich diese Kenntnisse durch Stückchen Glas,  
die es auf Staub abrieb, zu verschaffen gewußt  
hat.*

*Die Welt jenseits der geschliffenen Gläser  
ist wichtiger,  
als die jenseits der Meere,  
und wird vielleicht nur von der jenseits des Gra-  
bes übertraffen.*

**Georg Christoph Lichtenberg**

Die optische Linse in der Trinität von Instrument, Prothese und Symbol und die durch ihren Gebrauch begründete technische Rationalität führten zu Beginn der Neuzeit zu einer revolutionären Neubestimmung dessen, was man bis dahin unter Naturbeobachtung verstand. Die unvoreingenommene Betrachtung wich zunehmend einer technischen Inszenierung von Beobachtung im Rahmen einer an Idealgestalten orientierten theoretischen Erwartung. Der direkten sinnlichen Wahrnehmung wurde immer mehr misstraut, und sie wurde durch eine indirekte, mit technischen Hilfsmitteln realisierte Erhebung von Beobachtungsdaten ersetzt.

Der Fortschritt in den Wissenschaften ist eng mit dem Fortschritt der technischen Möglichkeiten verknüpft. Sie bedingen und beschleunigen sich gegenseitig. Ihren vorläufigen Höhepunkt findet diese Entwicklung im Computer, der sich zur ultimativen Schnittstelle zwischen Mensch und Natur entwickelt. Die Linse leitete einen Prozess ein, der in die nicht sichtbaren Bereiche der Welt führte. Längst ist es nicht mehr das optische Glas in Verbindung mit sichtbarem Licht, mit dem die Grenzen der Wahrnehmung überschritten werden. Röntgen- und Radioteleskop haben uns bis an die äußeren, Elektronensynchrotron und Rastertunnelmikroskop an die inneren Horizonte der Welt geführt. Das sichtbare Licht spielt nur noch eine

sekundäre Rolle und mit ihm das, was man in einem ursprünglichen Sinne unter Sehen versteht. Diese Entwicklungen stellen eine enorme Herausforderung an den Physikunterricht dar und zwar sowohl im Hinblick auf ein Verständnis der Geräte, das zum großen Teil auf den physikalischen Zusammenhängen beruht, die mit ihrer Hilfe entdeckt wurden, als auch hinsichtlich der erkenntnistheoretischen und didaktischen Probleme, die das damit verbundene neue Empirieverständnis mit sich bringt. Von den Schülerinnen und Schülern wird nicht weniger erwartet, als diese nur mit Hilfe eines enormen technischen Aufwandes zu erschließenden Realitäten mit ihrer im Bereich der mittleren Dimensionen ausgebildeten Anschauung abzugleichen und als objektive Beobachtung zu begreifen, was im eigentlichen Sinne physikalisch-technisch geleitete Konstruktion ist. Im folgenden soll insbesondere die Rolle der technischen „Sehhilfen“ bei der physikalischen Beobachtung skizziert werden.

### 1. Die Naturwissenschaft – eine Sehweise

Als die Vorsokratiker damit begannen, neben der reinen Spekulation die sinnliche Wahrnehmung als die Erkenntnis fördernde Aktivität anzuerkennen, wurde der Gesichtssinn deutlich vor allen anderen Sinnen ausgezeichnet. Das Auge wurde zum Organ der Wissenschaft. Was mit Augen wahrgenommen wurde, wurde für *wahr* genommen und hatte Beweiskraft.

"Alle Menschen streben von Natur nach Wissen. Dies zeigt ihre Liebe zu den Sinneswahrnehmungen. Denn sie lieben diese Wahrnehmungen unabhängig vom Nutzen, und zwar mehr als alle anderen Wahrnehmungen diejenigen, die durch die Augen vermittelt werden. Nicht nur mit Rücksicht auf unser Handeln, und selbst dann, wenn wir gar nicht handeln wollen, ziehen wir das Sehen im großen und ganzen allen anderen Wahrnehmungen vor. Die Ursache hierfür liegt darin, dass es uns mehr als alle anderen Sinne erkennen lässt und viele Unterschiede offenbart"[1]. Auch

wenn sich die neuzeitliche Physik in mancher Hinsicht von dieser Auffassung Aristoteles entfernen sollte, die Bedeutung des Sehens in den Naturwissenschaften ist bis heute erhalten geblieben und zwar in mehrfacher Weise.

In der naturwissenschaftlichen, insbesondere physikalischen Empirie geht es vor allem darum – wie Arthur Eddington es einmal umschrieben hat – Zeigerstellungen der Messgeräte abzulesen. Dafür reicht eine farbenblinde, unräumliche Wahrnehmung aus. Daran hat sich im Prinzip nichts geändert, auch wenn der Blick heute hauptsächlich auf den Bildschirm eines Computers gerichtet ist.

*Wenn wir es genau betrachten,  
Ist die Kraft von diesem Sinn  
Mit dem höchsten Recht zu achten,  
Als der Sinne Königin,  
Da ja Künst' und Wissenschaften  
All' an unsern Augen haften:  
Künstlich, ja gelehrt, zu seyn  
Wirckt fast das Gesicht allein*  
Johann Hinrich Brockes

Weil der forschende Blick stets auf etwas gerichtet ist, kommt Sehen vor allem durch Hinsehen zustande. Das schließt ein Wegsehen und ein Übersehen als konstitutive Aspekte des Sehens ein. Die damit verbundenen Probleme bekam bereits einer der ersten Naturwissenschaftler, Thales von Milet, zu spüren. Beim Blick in die Ferne auf die Sterne fiel er in eine Zisterne. Er musste sich dafür von seiner Thrakischen Magd verspotten lassen, weil er intensiv blickend das Naheliegende übersah.

Der Abstand nehmende, distanzierte Blick ist eine der wesentlichen Grundlagen der Naturwissenschaft. Er verspricht einerseits eine Befreiung aus den subjektiven Verstrickungen des Beobachters. Da mit der Entfernung andererseits Details aus dem Blick geraten, gelingt auf diese Weise ein auf grundlegende Strukturen und Mechanismen reduzierter Überblick.

- Verstehen heißt, sich ein Bild machen.
- Das Auge als leistungsfähigstes Sinnesorgan.
- Die Netzhaut ist eine Ausstülpung der Hirnrinde, d.h. Schnittstelle zwischen Innen- und Außenwelt
- 80% aufgenommener Daten sind visuell.

Bandbreite von Sinnesorganen und Bewusstsein		
Sinnesorgan	Bandbreite (bit/sek)	Bewusste Bandbreite (bit/sek)
Augen	10 000 000	40
Ohren	100000	30
Haut	1 000 000	5
Geschmack	1000	1
Geruch	100 000	1

Dass der Sternenhimmel gewissermaßen zum ersten Forschungsgegenstand der Menschheit wurde, verdankte er vor allem seiner Einfachheit. Denn aus der Ferne betrachtet kommen die Himmelskörper als bloße Punkte nur in Hinblick auf die gegenseitigen Abstände und Bewegungen in Betracht. Dadurch wurde es möglich, Strukturen auszumachen und wiederzuerkennen, periodische Abläufe festzustellen, Finsternisse und andere Ereignisse vorherzusagen. Der Blick in die Ferne wurde – unbewusst – als Möglichkeit erkannt, Komplexität zu reduzieren, was wiederum eine wesentliche Voraussetzung dafür war, Wissenschaft zu treiben<sup>1</sup>. Die Astronomie wurde auf diese Weise zur ersten Wissenschaft mit Modellcharakter für alle weiteren wissenschaftlichen Aktivitäten insbesondere für die Untersuchung nahe liegender Gegenstände auf der Erde: "Astronomie..., die Muster bei allen physischen Untersuchungen sein könn(t)e" [10, J 522].

## 2. Die naturwissenschaftliche Dimension des perspektivischen Sehens

Sehen, um durchzublicken (lt. perspicere) erfordert, die Dinge von einem Standpunkt aus zu betrachten bzw. eine bestimmte Perspektive einzunehmen. Die Wiederentdeckung und Weiterentwicklung der Perspektive in der Malerei zu Beginn der Neuzeit führt ganz allgemein zur Ausbildung des räumlichen Vorstellungs- und Darstellungsvermögens.

Die Reflexion auf den eigenen Standort wird zu einer verbreiteten Denkform und muss als eine der elementaren Voraussetzungen für den kosmologischen Konstruktivismus angesehen werden, der mit dem Werk Kopernikus einen ersten Ausdruck fand. Als Student in Krakau hatte Nikolaus Kopernikus (1473- 1543) "einen besondern Fleiß auf die Perspektive" gelegt, die von 1449 an regelmäßig vom Inhaber des astronomischen Lehrstuhls gelesen wurde. Er war daher geradezu prädestiniert, eine alte Idee von Aristarch von Samos zu reaktivieren, wonach nicht die Erde, sondern die Sonne als Zentrum anzusehen ist, um die sich die Erde und die anderen Planeten drehen.

Die kopernikanische Revolution der Planeten sollte mehr sein als eine nach perspektivischen Gesichtspunkten vorgenommene geometrische Operation. Immanuel Kant (1724 – 1804), der vermutlich als erster in der Vorrede zur zweiten Auflage *der Kritik der reinen Vernunft* von einer

<sup>1</sup> Die für die Wissenschaften bedeutungsvolle Einsicht, dass wir noch zu viel sehen, um zu sehen, worauf es ankommt, hat Georg Christoph Lichtenberg gefordert: "Beobachteten wir den Mond mit umgekehrten Fernröhren, und machten aus dem Okular-Glas das Objektiv-Glas, so würden die Tafeln weit einfacher werden können" [10, F 209].

Revolution sprach, verglich den Grundgedanken seiner Philosophie mit dem des Kopernikus, indem er feststellte, dass man bisher annahm, "alle unsere Erkenntnis müsse sich nach den Gegenständen richten... Man versuche es... einmal, ob wir nicht in den Aufgaben der Metaphysik damit besser fortkommen, dass wir annehmen, die Gegenstände müssen sich nach unserer Erkenntnis richten... Es ist hiermit eben so, als mit den ersten Gedanken des *Kopernicus* bewandt, der, nachdem er mit der Erklärung der Himmelsbewegungen nicht gut fort wollte, wenn er annahm, das ganze Sternheer drehe sich um den Zuschauer, versuchte, ob es nicht besser gelingen möchte, wenn er den Zuschauer sich drehen und dagegen die Sterne in Ruhe ließ" [3]. Und wenn Kopernikus für Nietzsche "der größte und siegreichste Gegner des Augenscheins" [4] ist, dann wird darüber hinaus die Kritik des Sehens als konstitutives Element der neuzeitlichen Physik angesehen. Demnach musste der Standpunkt- oder Sehweisenverweisenheit des Wahrnehmens und Erkennens Rechnung getragen werden. Dadurch sollte es möglich werden, den äußeren Schein zu erkennen, hinter dem sich das Wesentliche verbirgt. Das Denken wurde zu einer prüfenden Instanz des Sehens und der Zweifel am "ersten Blick" bestimmte fortan die Wahrheitssuche<sup>2</sup>: *Die Erklärbarkeit rangierte vor der unmittelbaren Anschauung*. Man war zunehmend darauf gefasst, dass die Welt nicht so ist, wie sie sich zeigt. Aber – und darin zeigt sich ein wesentlicher Aspekt der neuzeitlichen Sehweise - sie lässt sich so zeigen wie sie ist. Die Sichtbarmachung des So- nicht- Sichtbaren und Unsichtbaren wird zu einem wichtigen Motiv der naturwissenschaftlichen Forschung. Die kopernikanische Revolution begründete somit eine neue Sehweise, deren Konsequenzen in der folgenden Neuzeit erst noch gezogen und durchgesetzt werden mussten.

### 3. Sehen mit "bewaffnetem" Auge

Das perspektivische Denken führte einerseits zur Wiederentdeckung einer bereits bei den Vorsokratikern verbreiteten Ansicht, dass sich die sichtbaren Dinge dem Auge ganz anders darstellen, als sie es wirklich sind<sup>3</sup>. Der neuzeitliche Perspektivismus ging andererseits in einem wesentlichen Aspekt über den der Griechen hinaus. Besonders im Bereich der Malerei entwickelte sich ein aus-

<sup>2</sup> René Descartes bringt die neue Wissenschaftlichkeit auf den Punkt, wenn er von der Annahme ausgeht, dass "alles, was ich sehe, ...mir ...für falsch (gilt); ich lasse nichts mehr gelten von dem, was meine trügerische Erinnerung mir vorführt"[5].

<sup>3</sup> Die Auffassung, dass die Dinge nicht so sind, wie sie erscheinen stammt aus der antiken perspektivischen Bühnenmalerei, die von Anaxagoras und Demokrit auf kosmologische Fragen übertragen wurde (vgl. [17, S. 619]).

gesprochenes Bedürfnis, nicht nur perspektivisch zu denken, sondern Phänomene der Perspektive mit technischen Hilfsmitteln zu realisieren und demonstrieren (Bild 2).

Die instrumentelle Unterstützung des perspektivischen Sehens zu Beginn der Neuzeit fiel zusammen mit der Erkenntnis einer in verschiedenen Bereichen augenfällig gewordenen Disproportion zwischen den Möglichkeiten der menschlichen Sinne und der Beschaffenheit der Welt<sup>4</sup>. Man war also in gewisser Weise mental auf so etwas wie das Teleskop vorbereitet. Das macht verständlich, dass Galilei nur aufgrund einer Beschreibung des in Holland aufgetauchten Instruments dessen Möglichkeiten für die Astronomie erkannte, in kürzester Zeit ein eigenes Fernrohr konstruierte und es wohl erstmalig auf den Himmel richtete.

Damit ging er deutlich über Kopernikus hinaus. Er sah den Blick von der Sonne auf die Erde nicht als bloße perspektivische Operation und Metapher an, sondern als nachweisbares, menschliches Vermögen, "sich trotz der Gebundenheit an die

#### Zur Geschichte der Linse

Im Altertum gab es bei Ägyptern, Griechen und Römern geschliffene Linsen aus Quarz und Glas. Sie wurden als Brenngläser, nicht aber als Sehhilfen verwendet. Als Brille tauchte die Linse in der Mitte des 13. Jahrhunderts auf.

Die Qualität der Linse hängt von der Qualität des Glases und der Schleiftechnik ab. Gutes Glas wird aus weißem Sand, sorgfältig gereinigtem Kalk und Sodaasche hergestellt. Die Kunst der Glasherstellung beherrschte man schon vor 1200 auf der Insel Murano bei Venedig.

Seit dem 13. Jahrhundert wurde Glas zur Herstellung von Linsen in norditalienischen Städten verwendet. Auch zum Schleifen der Gläser wurde Sand verschiedener Körnungen verwendet. Das matt geschliffene Glas wird mit einer Form aus weichem Pech und einer weichen Schmirgelmasse poliert bis die Oberfläche spiegelnd glatt ist.

<sup>4</sup> So konnte Michel de Montaigne wenige Jahre vor der "Entdeckung" des Fernrohres die noch über das Fernrohr hinausgehende Feststellung machen, die sich "wie ein Stück archaischer Futurologie liest: wenn es der Natur eines Tages gefallen sollte, uns ihr Inneres zu öffnen und uns mit dafür ausgerüsteten Augen den Mechanismus ihrer Verfahren unverhüllt erblicken zu lassen - welchen Mißbrauch und welche Fehlrechnungen würden wir dann in unserer erbärmlichen Wissenschaft aufdecken. Wohl nicht ein einziger Gegenstand würde sich als zutreffend erkannt erweisen". Das Fernrohr liegt hier geradezu auf der Hand, so dass der deutsche Übersetzer der "Essais" an dieser Stelle den anachronistischen Rat erteilt, "...nehmt Fernrohre zu Hilfe, um euch davon mit euren eigenen Augen zu überzeugen"[9].

Erwähnt sei aber auch, dass durch den Einfluss von Thomas Digges und Giordano Bruno, die von der Unendlichkeit des Universums ausgingen, Galileis Blick zum Himmel nicht ganz unvoreingenommen war.

Erde begrifflich des Weltalls zu bemächtigen, in 'universal' gültigen Begriffen zu denken, und sogar vielleicht kosmische Gesetze so anzuwenden, daß sie als Prinzipien eines auf der Erde stattfindenden Tuns dienen konnten" [8, S. 258]. Dabei sollte das Teleskop als Hilfsmittel des Sehens eine wesentliche Rolle spielen.

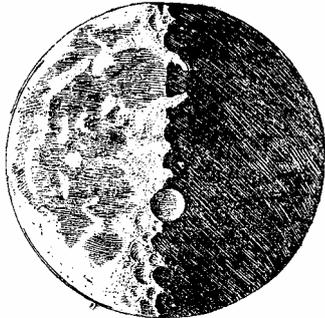


Bild 1: Zeichnung des Mondes von Galilei.

Galilei richtete das selbst gebaute und gegenüber den Vorläufern wesentlich verbesserte Teleskop zunächst auf den Mond. Er glaubte dort Strukturen, Meere, Berge, Flüsse zu sehen, die ihn stark

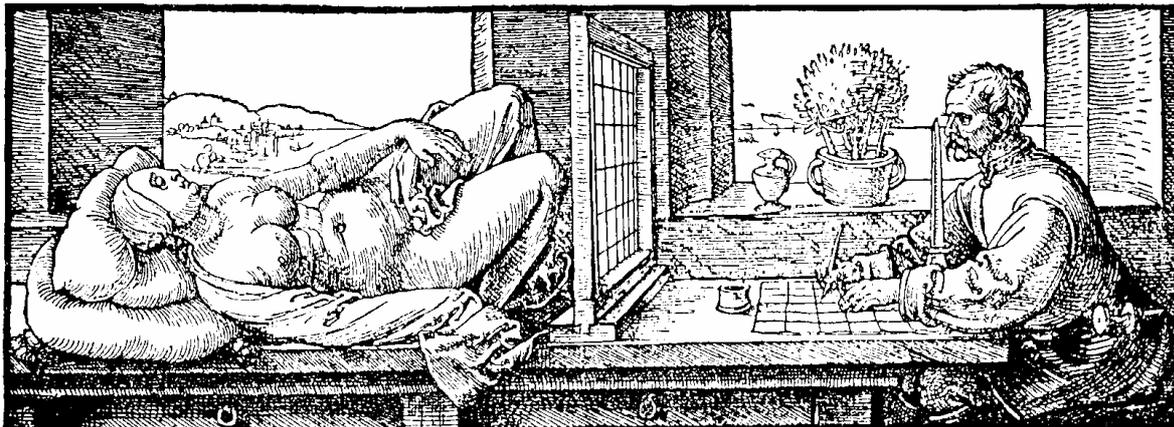


Bild 2: Zeichner mit dem liegenden Weib von Albrecht Dürer: Die nicht nur den Intellekt ansprechende vielgestaltete, farbenprächtige und pralle Realität wird aus der Perspektive des unbeteiligten, objektiven Blicks mit Hilfe von Apparaten reduziert auf das Messbare und Berechenbare.

an die Oberfläche der Erde erinnerten, zumindest wenn man diese gedanklich aus einer höheren Warte in den Blick nahm, wozu er offenbar als einer der Wenigen in der damaligen Zeit imstande war. Er blieb jedoch nicht bei der Schlussfolgerung stehen, dass der Himmelskörper Mond eine Art Erde sei. Er ging einen Schritt weiter und sah in einer Art Umkehrschluss die Erde als Himmelskörper. Galilei war eben "ein Mann von einer vertrackt reflektierten Optik. Er richtete das Fernrohr auf den Mond, und was er sieht, ist die Erde als Stern im Weltall", [7, S. 22].

Galilei sieht also in einem sehr indirekten, aber für die aufkommende neuzeitliche Physik typischen Blick die Erde als Himmelskörper und Himmelskörper als Gegenstände an, die man im Prinzip anfassen kann (Paul Valéry). Er wird

dadurch ermutigt, mit dem neuen Gerät weitere sichtbare Beweise für die kopernikanische Sehsweise zu suchen. Angesichts des eklatanten Widerspruchs zwischen der kopernikanische Idee einer in zweifacher Weise bewegten Erde und dem Augenschein sieht er darin eine der großen Herausforderungen der empirischen Naturwissenschaften.

Als er mit dem auf den Jupiter gerichteten Fernrohr entdeckt, dass der bekannte Planet von Monden umkreist wird, glaubt er das geozentrische Dogma, wonach sich alle Himmelskörper ausnahmslos um die Erde als Zentrum des Kosmos drehen, durch den bloßen Anblick stürzen zu können (Bild 4). Doch so einfach war es nicht. Entweder verweigerte man ihm den Blick in das Rohr, weil es nicht angehen kann, dass man dort sieht, was angeblich am Himmel ist, oder der Blick durch das Rohr bestärkte nur noch die ablehnende Haltung. Galilei war über diese Erfahrung geradezu schockiert und beklagt sich darüber, dass seine Bemühungen, die Wahrheit durch den eigenen Blick vor Augen zu führen, als "magische Beschwörungen" angesehen werden<sup>5</sup>.

Vielleicht fehlte dem im perspektivischen Sehen

geschulten Galilei in der Einschätzung seiner Kollegen der perspektivische und reflexive Blick. In der Tat musste seine Behauptung, ein Blick in das für diese völlig unbekannte Rohr würde ihnen vorher nie gesehene Himmelskörper offenbaren, wie eine Art Beschwörung erscheinen. Denn was sahen die Kollegen, wenn sie in das auf den Jupi-

<sup>5</sup> Weil das Fernrohr nicht aus den Wissenschaften selbst hervorging, sondern einem eher als unseriös angesehenen Milieu entstammte, wurde es verdächtigt, ein Instrument der Sinnestäuschung zu sein. Hinzu kommt, dass die optische Qualität der frühen Fernrohre infolge der chromatischen Abberation von schlechter Qualität war und auch ohne paradigmatische Vorbehalten den Eindruck einer optischen Täuschung hervorgerufen haben musste.

ter mit seinen Monden gerichtete Fernrohr blickten, bzw., was hätten sie sehen können, wenn sie diesen Blick nicht verweigert hätten? Jemand, der nie zuvor einen Blick durch ein Fernrohr getan hatte, konnte günstigstenfalls einige weiße Flecken sehen, von denen einer etwas größer und heller war als die anderen. Und was hatten diese



Bild 4: Jupiter mit Monden in drei verschiedenen Konstellationen, wie sie Galilei im Fernrohr gesehen haben muss.

in dem neuen, röhrenartigen Gerät auftauchenden Flecken mit weit entfernten Himmelskörpern zu tun? Konnten sie für jemanden, der die Theorie des Fernrohres nicht kannte, eine andere Qualität haben als die einer optischen Täuschung? Georg Christoph Lichtenberg sollte später einmal darauf aufmerksam machen, dass man auch dann Sterne sehen kann, "wenn man sich die Augen drückt". Und auch die Erfahrung der "Funken, die beim Niesen vor den Augen entstehen" [10, S. 115], legen andere Deutungen für die weißen Flecken im Rohr nahe als ausgerechnet reale Himmelskörper.

Allerdings war Galilei nicht nur von Gegnern umgeben. Johannes Kepler (1571 – 1630), ein junger Astronom, der noch nicht in das herrschende Paradigma der aristotelischen Physik hineinsozialisiert war, sah "auf welcher erfinderische Weise der Geist von Galilei...dies Fernrohr wie eine Leiter gebraucht, um zu den letzten und höchsten Mauern des sichtbaren Weltalls zu steigen, alles öffentlich beleuchtet und von jener Höhe aus auf unsere Hütten, das heißt, die Planeten herabblickt" [11].

Diese Einschätzung ist insofern erstaunlich, als Kepler zwar die Möglichkeiten des Fernrohres erkannte und selbst ein wesentlich verbessertes herstellte, aber davon so gut wie keinen Gebrauch machte<sup>6</sup>.

Hier zeigt sich, dass es nicht nur um das Fernrohr in seinen tatsächlichen Möglichkeiten ging, sondern auch und vor allem um die dadurch nahegelegten gedanklichen Möglichkeiten der Erweiterung. "Das Fernrohr ist ein Verstärker nicht nur im optischen Sinne, sondern auch in einem emi-

<sup>6</sup> "Er war vom Typus derjenigen, die zwei Jahrhunderte später den Planeten Neptun rechnerisch entdecken sollten, bevor und damit er optisch gefunden werden konnte. Wenn es der Inbegriff aller theoretischen Intentionen der Astronomie gewesen war, für jeden Zeitaugenblick den Ort eines Himmelskörpers mit derselben Genauigkeit zu berechnen, mit der man ihn beobachten kann, so war es der Paradedfall ihrer Vollendungen, dasselbe für einen noch unbekanntem Himmelskörper zu leisten [17, S. 718f].

nent geschichtlichen: die Voraussetzungen, auf denen sein Aufstieg beruht, werden von seinen Leistungen quantitativ potenziert und qualitativ übertragen" [17, S. 721].

In der Tat sollte das auf diese Weise befreite Denken zu einer beispiellosen Entwicklung der Astronomie und Naturwissenschaft führen und den seit Jahrtausenden invarianten optischen Horizont in dem Maße verschieben, wie man sich ihm instrumentell und begrifflich annäherte. Hannah Arendt zufolge betrachtete die Naturwissenschaft die erdgebundene Natur fortan, "als ob sie gar nicht mehr auf der Erde, sondern im Universum lokalisiert wäre, als ob es ihr gelungen wäre, den archimedischen Punkt nicht nur zu finden, sondern sich auf ihn zu stellen und von ihm aus zu operieren" [8, S. 18].

#### 4. Die Technisierung der Naturforschung

*Wenn das, was wir nicht sehen können,  
nicht existent sein soll,  
ist unsere Vorstellung erbärmlich.*

Michel de Montaigne (1588)

Indem das Fernrohr neue Horizonte der Sichtbarkeit im tatsächlichen wie im übertragenen Sinn eröffnete wurde der Gegenstandsbereich der Naturforschung auf ungeahnte Weise erweitert. Die Empirie drang bis an die Grenzen der Wirklichkeit vor. Als technisches Hilfsmittel bereitete das Fernrohr den Weg für den weiteren Einsatz der Technik. Als notwendige Konsequenz "erzwang die Technik von der Theorie einen Wandel ihrer Vergegenständlichung. In seinem Ertrag bestätigte das technische Gerät seine vorher gar nicht zu begründende Notwendigkeit und verstärkte zugleich damit den Verdacht, daß der Mensch

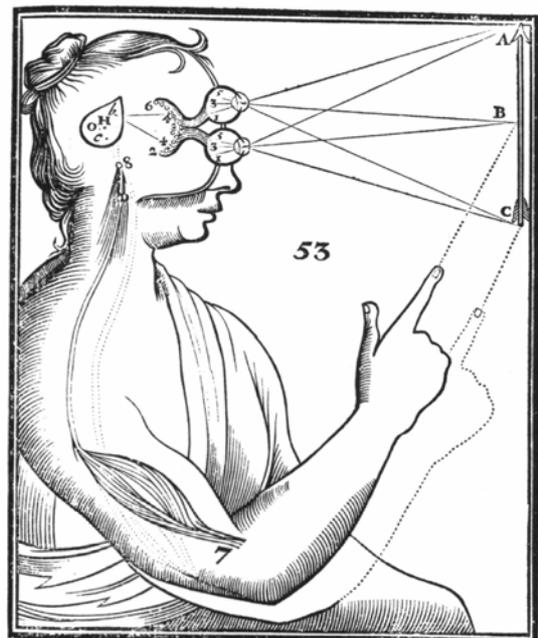


Bild 3: Das Auge erscheint bei Descartes bereits als im Menschen eingebautes "Instrument" zum Sehen.

immer weiterer Technisierung bedürftig sein könnte. ...Nicht nur die Einsicht in das Naturgesetz *ermöglicht* die Technik, sondern die *Berufung* auf das Naturgesetz *legitimiert* ihre Resultate" [7, S. 19, 21].

Neue Erfahrungsbereiche ergaben sich auch aus der Vielfalt der durch die Linse gegebenen Möglichkeiten, die Sichtbarkeit zu manipulieren. So gerieten durch die Linse nicht nur aufgrund ihrer Entfernung kleine Gegenstände, sondern auch tatsächlich kleine und daher unsichtbare Gegenstände in den "Blick" der Forscher.

Allerdings ließ die damit verbundene Entwicklung des Mikroskops noch einige Jahre auf sich warten. Ein Bedürfnis über das Fernrohr als Sehhilfe hinauszugehen, war zunächst kaum zu spüren. Selbst Galilei, der mit dem Fernrohr Revolutionäres zu Wege brachte, zeigte kein ausgeprägtes Interesse am Mikroskop als es denn zur Verfügung stand. Die Erwartung, unter dem Mikroskop großartige Entdeckungen machen zu können, war schon deshalb gering, weil anders als beim Makrokosmos auf keine wie auch immer gearteten Vorerfahrungen zurückgegriffen werden konnte. Es gab so gut wie keine wissenschaftliche Tradition der Mikroskopie. Der Mikrokosmos musste als Gegenstand wissenschaftlicher Forschung erst noch entdeckt werden. Vielleicht spielte dabei außerdem noch eine eher psychologisch bedingte Zurückhaltung eine gewisse Rolle, wonach Kleines auch in der Bedeutung klein sei. Das Große und vor allem Gegenstände, die außerhalb der bisher bekannten Welt zu entdecken waren, erschienen wesentlich spektakulärer als die winzigen und daher von vornherein beherrschten, unterlegenen Gegenstände auf der Erde.

Hinzu kamen technische Probleme, die die Entwicklung der Mikroskopie verlangsamt haben dürften. Zum einen erwies sich die Konstruktion des Mikroskops im Vergleich zum Fernrohr als wesentlich komplizierter und aufwändiger. Um das Mikroobjekt der Untersuchung überhaupt zugänglich zu machen, musste es zunächst einmal so präpariert werden, dass es ausreichend beleuchtet bzw. durchleuchtet werden konnte<sup>7</sup>. Auch die Anforderungen an die Präzision der mechanischen Konstruktion sowie die Fertigkeiten und Techniken beim Schleifen der winzigen Linsen waren wesentlich höher als beim Fernrohr. Man hatte es zum anderen mit einem völlig anders gearteten Gegenstand zu tun. Während bei astronomischen Beobachtungen (abgesehen von der Untersuchung der Mondoberfläche) im wesentlichen helle Punkte, also strukturlose Objekte in Augenschein genommen wurden, zeichneten sich

<sup>7</sup> Hier zeigt sich einmal mehr, dass die neuzeitliche Methode, das zu beobachtende Objekt für die Beobachtung passend herzurichten, nicht nur im theoretischen, sondern im unmittelbar praktischen Sinne unabdingbar waren.

die Mikroobjekte gerade durch ihre (dreidimensionale) Struktur und ihren Detailreichtum aus. Sie waren daher sehr viel schwieriger zu fokussieren, und Linsenfehler wie chromatische und sphärische Aberration schlugen stärker zu Buche als beim Fernrohr.

Schließlich sei auch noch die Verachtung erwähnt, die den neuen Instrumenten nicht nur von den Wissenschaftlern der alten Schule entgegengebracht wurden. So beklagte Descartes (1596 – 1650) im Jahre 1637, dass die neuen, so "nützlichen und bewundernswerten Instrumente nicht durch die Wissenschaft, sondern zuerst nur durch Erfahrung und Glück gefunden wurden" [6]. Diese "Schande" sollte in der Folgezeit insofern getilgt werden, als in zunehmenden Maße die technischen Hilfsmittel durch die Wissenschaft selbst nahegelegt und hervorgebracht wurden, der sie dienten. Eine Anwendung für den Alltag sollten sie allenfalls in zweiter Linie erlangen.

Das Mikroskop erschließt den Wissenschaften eine bisher nicht gesehene und ungeahnte, neue Welt. Diese Mikrowelt ist insofern inmitten der Lebenswelt angesiedelt, als sie im Prinzip jedem vertrauten Gegenstand zugrunde liegt, ohne dass sie deswegen leichter zugänglich wäre als jene fernen Welten, von deren Existenz das Fernrohr kündigt. Die Metapher der *Welt*, die für diese "zweite Schatzkammer der Natur" (Christian Huyghens) verwendet wird, verweist einerseits auf die Bedeutung und Dimension eines sich unter dem Mikroskop öffnenden neuen Erfahrungsbereichs, der sich statt ins unendlich Große ins unendlich Kleine erstreckt. Andererseits erinnern die völlig neuartigen mikroskopischen Entdeckungen



Bild 5: Spermatozoe eines Hundes von Leeuwenhoek.

an die Entdeckungen der neuen Kontinente der Erde und spannen die Erwartung, dass im Mikroskopischen die großen Entdeckungen noch bevorstünden.

Unabhängig voneinander nahmen sich zahlreiche Wissenschaftler des Mikroskops an. Obwohl Robert Hooke (1635-1703) vor allem mikrostrukturelle Details bekannter Objekte, Pflanzen und Tiere beschrieb und 1665 unter dem Titel: *Microrographia or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses* publizierte, sollte dieses Werk von großer Durchschlagskraft und paradigmatischer Bedeutung für einen ganz neuen Zweig der Wissenschaften werden. Es initiierte eine ganze Reihe von mikroskopischen Studien, die sich vor allem biologischen Fragestellungen widmeten und zu einer ersten Fundierung der Mikrobiologie führten, die erst sehr viel später in der Mikrophysik ihre natürliche Fortsetzung finden sollten. Die Faszination ging zunächst weniger von typisch wissenschaftlichen Erkenntnissen aus, als vielmehr von der Funktionalität und Schönheit der sich unter dem Mikroskop darbietenden Strukturen.

Im Jahre 1683 erklärte Antoni von Leeuwenhoek (1631-1723) gegenüber der Royal Society of London, dass es in seinem Mund mehr Lebewesen als Menschen in den Niederlanden gebe. Mit einfachen, erstaunlich leistungsstarken Mikroskopen überschritt er nach Galileis Entdeckung der unsichtbaren Jupitermonde die zweite Schwelle der Unsichtbarkeit und drang in die Welt der Mikroorganismen ein. Unter seinen Mikroskopen eröffneten sich Ansichten, für die es noch keine Sprache gab: er entdeckte, Protozoen und Bakterien (Bild 5). Seine Mikroskope müssen ein Vergrößerungsvermögen von 500 erreicht haben mit einem Auflösungsvermögen von bis zu einem Mikrometer. Somit kam er mit einlinsigen Geräten an die Leistungen moderner Lichtmikroskope heran.

In Deutschland fand die neue Naturbetrachtung in Werken Barthold Heinrich Brockes einen poetischen Ausdruck. Er stilisierte den mit optischen Hilfsmitteln erschlossenen Bereich der Natur neben der Bibel und der sichtbaren Natur zu einer dritten Offenbarung hoch:

*Die dritte zeigt offenbar in den Vergrößerungsgläsern sich,*

*Und in den Telescopiis zum Ruhm des Schöpfers sichtbarlich;*

*Indem, wenn man in der Natur verborgene Größ' und Kleinheit steiget,*

*Bei einem heiligen Erstaunen der Schöpfer mehr als sonst sich zeigt*

[16, Bd.9, S. 437].

## 5. Himmlische Bedingungen auf der Erde

*Denken ist Sehen!*

Honoré de Balzac

Die Revolutionierung des naturwissenschaftlichen Sehens vor allem durch Galilei erfolgte nicht nur durch die Benutzung des Teleskops als technisches Hilfsmittel, sondern auch dadurch, dass er den einmal beschrittenen Weg, der ihn von der Betrachtung des Mondes als Erde dazu führte, die Erde als Himmelkörper anzusehen, konsequent fortsetzte. Um auf der Erde ähnlich geordnete und vorhersagbare Verhältnisse wie am Himmel zu haben, "sah" er Bewegungen, insbesondere die fallender Körper so, als fänden sie nicht auf der Erde, sondern in himmlischen Gefilden statt. Er ließ die unüberschaubare Zahl realer Fälle in dem einen, den "freien" Fall aufgehen. Dazu musste er sie aus der irdischen Umklammerung dessen, was später als Reibung, Luftwiderstand u.ä. bezeichnet werden sollte, befreien und zumindest gedanklich himmlische Verhältnisse unterstellen<sup>8</sup>. Damit bereitete er letztlich das Feld für die Vereinigung der irdischer und himmlischer Physik vor, ein Projekt, das insbesondere von Newton vollendet werden und zur Newtonschen Physik führen sollte (siehe [19]).

Auch hier zeigt sich die völlig neue Art der Naturbeobachtung. Nicht mehr dem Verhalten der sich selbst überlassenen Natur, sondern der nach Maßgabe anerkannter physikalischer Vorstellungen bzw. Theorien arrangierten Natur gilt das Interesse. Die reine Beobachtung wird durch die experimentell inszenierte Beobachtung ersetzt, und das sollte in der Folgezeit in zunehmendem Maße heißen, unter Einsatz technischer Instrumente und Hilfsmittel. Man betrachtet nicht das vom Baum fallende Blatt, sondern das Blatt in einem evakuierten Rohr<sup>9</sup>. Nur dadurch, dass reale Objekte und Zusammenhänge durch Idealgestalten ersetzt werden, besteht eine Chance, hinter der vielgestalteten sichtbaren Fassade eine gesetzmä-

<sup>8</sup> Für die Untersuchungen zum freien Fall durch Galilei stand bereits die Idee der Vakuumpumpe im Hintergrund. Wichtiger als die tatsächliche Realisierung war die theoretische Vorwegnahme, die darin zum Ausdruck kam, dass er keinen Zweifel daran hatte, dass auch Gegenstände geringer Dichte dem Fallgesetz unterliegen.

<sup>9</sup> Angesichts der meist als Metaleson vermittelten Vorstellung, dass die Physiker vorurteilsfrei die Natur so beobachten, wie sie an und für sich ist, d.h. ohne Manipulation, kann die Einsicht, dass durch das Experiment die zu beobachtenden Phänomene in einem tieferen Sinne erst konstruiert werden, bei den Lernenden leicht zu Lernschwierigkeiten führen. Der Physikunterricht muss auf die Voraussetzungen der physikalischen Sehweise und ihre Differenzen zur lebensweltlichen Sehweise eingehen. Den Lernenden muss klar werden, dass Physik und Common sense i.a. nicht zusammenpassen [2].

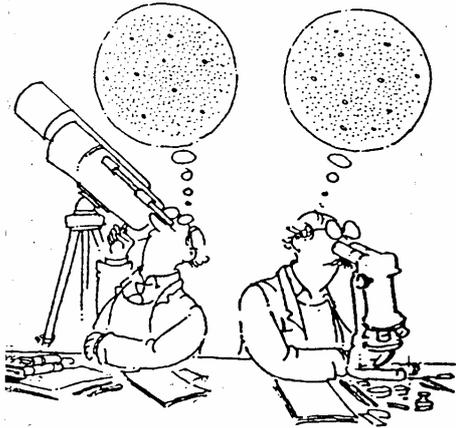


Bild 6: Das „bewaffnete“ Auge blickt in den Makro- und Mikrokosmos (Cartoon von V. Rencin).

ßige und quantitativ erfassbare Tiefenstruktur der Realität zu entdecken und sichtbar zu machen. Die Sichtbarmachung dessen, was sich aus unterschiedlichen Gründen der direkten Anschauung entzieht, sind fortan wesentliches Motiv und Anlass der physikalischen Erkenntnisbemühungen. Die Bemühungen, das von Galilei antizipierte Vakuum auch zu realisieren, führte schließlich zur Luftpumpe, einem weiteren technischen Hilfsmittel, das zwar nicht direkt die optischen Möglichkeiten des Wissenschaftlers erweiterte, aber dennoch als konsequente Fortsetzung des Weges der neuzeitlichen Physik angesehen werden kann, an dessen Anfang das Teleskop steht. Die Luft- und Vakuumpumpe steht übrigens der neue wissenschaftliche Fakten schaffenden Potenz der Linse kaum nach. Sie wurde sehr schnell zum Emblem der experimentellen Naturwissenschaft. Als wesentlicher Bestandteil der Elektronenmikroskope steht sie auch in einem direkten Zusammenhang mit der "visuellen" Erschließung submikroskopischer Strukturen.

## 6. Sichtbarkeit und Lesbarkeit

*Galilei: Auch das Sehvermögen ist vollkommen.  
Die Menschen haben sehr gute Augen.*

*Apicius: Welche schwachen Augen sind es dann,  
denen Eure Gläser zu Hilfe kommen sollen?*

*Galilei: Es sind die Augen der Philosophen*  
Bernard de Fontenelle [14]

Galileis Bemühungen, die Richtigkeit des kopernikanischen Weltbildes nachzuweisen, verstieß nicht nur gegen den allgemein anerkannten Geozentrismus, er widersprach darüber hinaus dem aristotelischen Denken auch auf eine grundsätzliche Weise. Denn bislang konnte in der Naturwissenschaft nur das Realität beanspruchen, was mit eigenen – wie es später heißen sollte – unbewaffneten Augen gesehen werden konnte (Sichtbar-

keitspostulat<sup>10</sup>). Demnach war seit den Griechen von einem Bedürfnis nach technischen Hilfen oder einem neuen Organ nichts zu spüren. Man fühlte sich als Zuschauer der Welt, in der sich zwar die Phänomene nicht immer wirklichkeitsgetreu offenbarten, was aber nicht als Hinweis darauf gesehen wurde, dass es der Wahrnehmung definitiv Entzogenes und Unsichtbares geben könnte. Der Gedanke, Auge und Welt könnten zueinander so disproportioniert sein, dass ihm wesentliche Bereiche der Wirklichkeit entzogen wären, kam daher nicht auf [7, S. 15].

Hier zeigt sich wieder einmal der für wissenschaftliche Revolutionen im Sinne Thomas. S. Kuhns

[20] typische Zirkelschluss bei dem Bemühen, das neue Denken mit Mitteln des alten Denkens durchsetzen zu können: Die Anschauung der Jupitermonde durch das Fernrohr sollte beweisen, dass es Dinge jenseits der natürlichen Sichtbarkeitsschwelle gebe. Um aber die im Fernrohr zu sehenden hellen Punkte als Trabanten des Jupiter ansehen zu können, musste die Existenz von unsichtbaren Dingen für möglich gehalten werden, das Sichtbarkeitspostulat also bereits überwunden sein.

Galilei konnte seine Gegner also um so weniger überzeugen, je stärker diese an den Grundsätzen der damals herrschenden Wissenschaft, insbesondere an dem durch den Augenschein begründeten Sichtbarkeitspostulat festhielten. Statt seine Gegner, meist Kirchenvertreter, vom neuen Weltbild zu überzeugen, hätte er sie – so ironisch das klingen mag – dazu bekehren müssen.

Die Ambivalenz des Fernrohrblicks bringt Bernard de Fontenelle in dem oben zitierten Dialog zum Ausdruck. Demnach wird durch die Linse nicht das gewöhnliche, sondern das philosophi-

<sup>10</sup> "Das Sichtbarkeitspostulat der traditionellen Astronomie, mag es sich auch als ökonomisches Prinzip rationalisieren lassen, korrespondiert den Voraussetzungen einer Anthropologie, in der Mensch und Kosmos in einer so definierten Zuordnung gesehen werden, daß keine wesentliche Inkongruenz von organischer Ausstattung und realem Bestand angenommen werden darf. Das Sichtbarkeitspostulat ist eine Konsequenz aus dem symmetrischen Bau des geozentrischen Universums und der zentralen Position des Menschen in diesem. Wenn alle Punkte des Fixsternhimmels von der Erde gleich weit entfernt sind, muß der Verdacht ausgeschlossen werden, es könne Sterne geben, die wegen ihrer Entfernung für den Menschen unsichtbar bleiben: wenn überhaupt ein Fixstern wahrgenommen werden kann, können es alle. Kein Bedürfnis nach einem Hilfsmittel ist denkbar, welches hier mehr zu leisten hätte versprechen können, als das menschliche Auge zu leisten vermag. Das Sichtbarkeitspostulat hat einen paganen Zug. Es negiert jeden Gedanken, dem Menschen nur eine beschränkte Ansicht der Welt zu eröffnen und deren Erhabenheit im Unzugänglichen eines göttlichen Vorbehaltstraumes zu denken" [17, S. 731].

sche Sehen, sprich: theoriegeleitete Sehen verbessert, das die Oberfläche des Augenscheins analytisch transzendiert. Dieses sehr voraussetzungs-volle durch Denken geleitete und erst durch Instrumente ermöglichte Sehen tritt aber andererseits gerade mit dem Anspruch auf, das voreingekommene theoretische Buchwissen zu überwinden.

Mit einem Plädoyer für das Sehen soll das Sehen überwunden werden. Gegen das Buchwissen wird die Welt als Buch gesetzt. Die sichtbaren Erfolge bei Teleskop und Mikroskop legen die Metapher der Lesbarkeit der Welt [21] geradezu nahe. Schon Galilei spricht davon, dass "die Philosophie... in dem großen Buch der Natur niedergeschrieben (ist), das uns immer offen vor Augen liegt, das wir aber erst lesen können, wenn wir die Sprache erlernt und uns die Zeichen vertraut gemacht haben, in denen es geschrieben ist. Es ist in der Sprache der Mathematik geschrieben, deren Buchstaben Dreiecke, Kreise und andere geometrische Figuren sind; ohne deren Kenntnis ist es dem Menschen unmöglich, auch nur ein einziges Wort zu verstehen" [22]. Und Henry Power entdeckt 1661 im Mikroskop den "kleinsten Druck, den wir wahrnehmen können" [15].

Das vorrevolutionäre Sehen wird schließlich als Grenzfall der neuzeitlichen physikalischen Sehweise assimiliert mit der paradox erscheinenden Konsequenz, dass man die sichtbare Welt nicht nur als einen winzigen Ausschnitt der physischen Realität betrachtet, sondern sie auch qualitativ als bloßen "Vordergrund dieser Realität, ihre belanglose Oberfläche (ansieht), an der sich nur symptomatisch das Resultat von Prozessen und Kräften darstellt. Sichtbarkeit ist selbst eine exzentrische Konfiguration, die zufällige Konvergenz heterogener physischer Ereignisreihen" [17, S. 746/47]. Das, was einmal wichtig zu wissen war, die klassifizierbaren Merkmale der äußeren Form, der Farbe, der Härte usw. erweisen sich zunehmend als bloßer Außenaspekt von mikrophysikalischen Merkmalen und Vorgängen. Selbst die durch Kepler gefundenen elliptischen Umlaufbahnen der Planeten verweisen auf etwas Tieferliegendes. Denn "was unser Auge bei diesem Umlauf gewahrt wird, ist nicht das, was den Planeten hält" [13].

In dem Maße wie die neuzeitliche physikalische Sehweise an Dominanz gewinnt, werden deren stillschweigenden Voraussetzungen vergessen. Man knüpft rhetorisch an die vorrevolutionären Zeiten an, indem man sich wieder mit der Unbezweifelbarkeit des Gesehenen gegen jegliche argumentative Kritik zu immunisieren versucht. Die Erfolge von Teleskop und Mikroskop bestärken erneut den Glauben, dass die Natur grundsätzlich und durchgängig auf sichtbaren oder sichtbar zu machenden Prozessen beruht, also Mechanismen im Sinne der Verkleinerung oder

Vergrößerung bekannter technischer Vorrichtungen sind. Es herrscht die Überzeugung, dass man "der Natur zusehen (kann), wie sie es macht, wenn man instandgesetzt worden ist, genau genug hinzusehen - immer noch steckt etwas vom antiken Zuschauer mit seinen Voraussetzungen in dieser Konzeption" [17, S. 740]<sup>11</sup>.

In diesem Sinne erhebt Jan Amos Comenius sich auf Bacon berufend in seiner *Didactica magna* das Sehen in den Rang eines Beweises. Es genügt daher das Unsichtbare mit technischen Mitteln sichtbar zu machen, um es als wahr zu erweisen. Selbst die Forderung Aristoteles, die Phänomene zu retten, lässt sich auf diese Weise bis in unsere Tage hinüberretten und zu einem didaktischen Prinzip machen. Phänomene retten etwa im Sinne Martin Wagenscheins, der diesen Slogan gegen eine Überbetonung des begrifflichen Denkens im Physikunterricht übernahm [23], beinhaltet jedoch bereits ein physikalisches Sehen, d.h. die von einem physikalischen Vorverständnis geleitete kritische Hinterfragung dessen, was sich den Augen darbietet. Konkret: Man hält den schrägen Schilfhalm im flachen Wasser nicht wirklich für abgeknickt, sondern sieht darin das physikalische Phänomen des gebrochenen Lichts.

## 12. Fazit

Mit den optischen Sehprothesen wurde im Rahmen der neuzeitlichen Naturwissenschaften das Sehen im ursprünglichen Verständnis überwunden. Das tat jedoch der Bedeutung des Sehens für die naturwissenschaftliche Forschung im tatsächlichen wie im metaphorischen Sinne keinen Abbruch. Vielmehr ist die Sichtbarmachung des Nichtsichtbaren fortan als eines der leitenden Motive der Naturwissenschaften, insbesondere der Physik anzusehen, die nicht zuletzt durch den Einsatz der Technik zu einer Beschleunigung der Erkenntnisgewinnung führte, die eine weitere Technisierung mit sich brachte, die heute bis weit in die Lebenswelt der Menschen hinein reicht.

## 13. Literatur

- [1] Aristoteles: Metaphysik. Buch A. Berlin: Aufbau Verlag 1960, S. 17
- [2] Schlichting, H. Joachim: Physik - eine Perspektive der Realität. Probleme des Physikunterrichts. Physik in der Schule 34/9, 283- 288 und 34/10, 339- 342 (1996)
- [3] Kant, Immanuel: Kritik der reinen Vernunft. Darmstadt: WBG 1956, S. 25

<sup>11</sup> Mit anderen Worten: "Fernrohr und Mikroskop bleiben dem Wirklichkeitsbegriff der anschaulichen Evidenz verhaftet, für den alle Naturprozesse prinzipiell durch das Sehen erklärbar werden, auch wenn faktisch die Zuordnung von Organ und Gegenstand abbricht [17, S. 717].

- [4] Nietzsche, Friedrich: Jenseits von Gut und Böse (1866). In: Nietzsche in drei Bänden. München: Hanser Verlag 1973, Bd. 2, S. 577
- [5] Descartes, René: Untersuchungen über die Grundlagen der Philosophie. In: Philosophische Abhandlungen. Berlin: Tilgner Verlag 1924, S. 111
- [6] Descartes, René: Dioptrique – Six premiers Discours. In: Ders.: Oeuvres et lettres, présentées par A. Bridoux, Paris 1953, S. 180
- [7] Blumenberg, H. (Hrsg.): Galileo Galilei: Sidarius Nuncius. Frankfurt: Suhrkamp 1980, S. 10
- [8] Arendt, Hannah: Vita activa oder vom tätigen Leben. München 1983
- [9] Montaigne's Gedanken und Meinungen ins Teutsche übersetzt v. J. J. C. Bode. Wien und Prag 1797, III, S. 406; zitiert nach: [17, S. 729f]
- [10] Lichtenberg, G. Chr.: Sudelbücher. München: Hanser 1975
- [11] Kepler, Johannes: Dioptrice. 1611. Praefacio. Zit. nach: [12, S. 37]
- [12] Weigl, Engelhard: Instrumente der Neuzeit, Stuttgart: Metzler Verlag, 1990
- [13] Lichtenberg, G. Chr.: Vermischte Schriften. Göttingen 1800/06, IX 305. zitiert nach: [17, S. 719]
- [14] Fontenelle, Bernard de: Nouveaux Dialogues des Morts (1683) Deutsche Übersetzung: Totengespräche. Frankfurt: Eichborn 1991, S. 205
- [15] Dr Henry Power's poem on the Microscope. In: ISIS XXI (1934), S. 37
- [16] Brockes, Barthold, Heinrich: Irdisches Vergnügen in Gott. Hamburg 1748. Zit. nach: [12, S. 81]
- [17] Blumenberg, Hans: Die Genesis der kopernikanischen Welt Frankfurt: Suhrkamp Verlag 1981
- [18] Platon: Sämtliche Werke II. Politeia 507c . Reinbek: Rowohlt 1963, S. 219f
- [19] Schlichting, H. Joachim: Wie frei ist der freie Fall? In: Sumfleth, E. (Hrsg.): Chemiedidaktik im Wandel - Gedanken zu einem neuen Chemieunterricht. Münster: Lit-Verlag 1999, S. 255
- [20] Kuhn, T.S.: Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. Frankfurt: Suhrkamp Verlag 1976
- [21] Blumenberg, Hans: Die Lesbarkeit der Welt. Frankfurt: Suhrkamp 1989
- [22] Galilei, Galileo: Il Saggiatore (Die Goldwaage) (1623); in: Opere, Ed. nazionale. Firenze, 1890 -1909, Bd. vi, p.232
- [23] Wagenschein: Martin: Rettet die Phänomene! Scheidewege 1 (1976), S. 76