

Sichtbarkeit jenseits des Lichts

Zur Bedeutung des Sehens in der modernen Physik

H. Joachim Schlichting,

Westfälische- Wilhelms- Universität Münster (schlichting@uni-muenster.de)

(Eingegangen: 28.04.2003; Angenommen: 14.07.2003)

Kurzfassung

Die Linse ermöglicht den mikroskopischen und teleskopischen Blick in „Welten“, die dem „unbewaffneten“ Blick prinzipiell verschlossen sind. Die nach ihrer Entdeckung einsetzenden naturwissenschaftlichen Bemühungen, die Mikro- und der Makrowelt zu erschließen, stießen bald an eine Grenze, die in der Natur des Lichts erkannt wurde. Dadurch wurde eine Entwicklung in Gang gesetzt, die schließlich zur Überwindung der optischen Sichtbarkeit führte und die Voraussetzungen für die moderne Mikrophysik und Kosmologie schuf. Dem Sehen kommt dabei nach wie vor eine große Bedeutung zu und wirft die didaktisch relevante Frage auf, welche Beziehungen zwischen dem Bild, dem als Konstrukteur handelnden Beobachter und der Realität auszumachen sind.

Sokrates: *Wenn auch in den Augen Gesicht ist und, wer sie hat, versucht es zu gebrauchen...: so weißt du wohl, wenn nicht ein drittes Wesen hinzukommt, welches eigens hierzu da ist seiner Natur nach, dass dann das Gesicht doch nichts sehen wird...*

Glaukon: *Welches ist denn dieses, was du meinst?*

Sokrates: *Was du das Licht nennst*

Plato [1].

Das Sehen spielt in den Naturwissenschaften eine hervorragende Rolle. Galilei überwand die naturgemäßen Grenzen des Sehens, indem er ganz im Geiste des zu seiner Zeit wiederentdeckten perspektivischen Sehens die Möglichkeiten des Teleskops erkannte und damit eine konzeptuelle Revolution auslöste, die zur neuzeitlichen Physik führte [2]. Indem das natürliche Sehen als steigerungsfähig erkannt wurde und zu optischen Sehprothesen als Mittel der Erkenntnisgewinnung führte, wurden die Makrowelt des ganz Großen und die Mikrowelt des ganz Kleinen „unter die Lupe“ genommen. Dazu gehörte schließlich auch das bisher als Medium des Sehens unhinterfragt hingenommene Licht selbst.

1. Das Licht – Medium der Sichtbarkeit

In der naturwissenschaftlichen Praxis der Neuzeit sollte sich beim Umgang mit optischen Geräten bald herausstellen, dass deren Möglichkeiten und Grenzen von der Natur des Lichtes abhängen. Auffallend waren von Anfang an die u.a. für die mit farbigen Effekten einhergehenden Beeinträchtigungen des Blicks. Isaac Newton (1643 - 1727) kam diesen Verfärbungen auf die Spur, als er ein Bündel Sonnenlicht durch ein Glasprisma schickte und auf diese Weise ein ganzes Spektrum farbiger Lichtbündel in reproduzierbarer Reihenfolge erzeugte (Bild 1). Er kam zu dem revolutionären Schluss, dass das Prisma das weiße Licht in farbiges Licht zerlegte. Mehr noch: Die Möglichkeit, das weiße Licht durch eine

Wiedervereinigung des farbigen Lichts zurückzugewinnen, überzeugte ihn davon, dass weißes Licht aus Licht aller Farben zusammengesetzt ist.

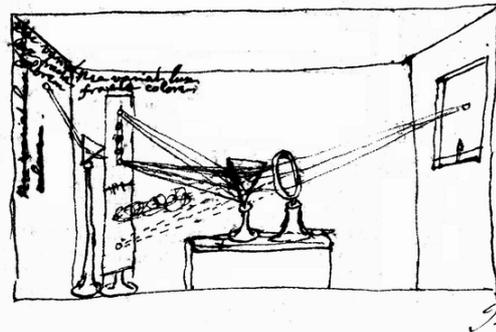


Bild 1: Newtons Versuchsaufbau zur spektralen Zerlegung des Lichts

Wieder einmal spielte beim Fortschritt der Physik die Wechselwirkung von Licht und Materie eine wichtige Rolle. Wieder war es geschliffenes Glas, diesmal in Form eines Prismas, das zu zahlreichen neuen Entdeckungen führen sollte. Die newtonsche Erkenntnis, wonach das farbige Licht als das Elementare und das weiße Licht als das Zusammengesetzte, Komplexe anzusehen sei, widersprach dem gesunden Menschenverstand in eklatanter Weise. Johann Wolfgang von Goethe (1749 – 1832), der mehr als die Hälfte seines Werkes naturwissenschaftlichen Arbeiten widmete, ging in seiner Farbenlehre mit allen ihm zu Gebote stehenden wissenschaftlichen und rhetorischen Mitteln gegen die newtonsche Sicht an. Doch es zeigte sich wieder einmal, was Goethe selbst im Hinblick auf die übrigen Ergebnisse der Naturwissenschaften als wesentlich erkannte: "Die größten Wahrheiten widersprechen oft geradezu den Sinnen, ja fast immer. Die Bewegung der Erde um die Sonne - was kann dem Augenschein nach absurder sein? Und doch ist es die größte, erhabenste, folgenreichste Entdeckung, die je der Mensch gemacht hat, in meinen Augen wichtiger als die ganze Bibel" [3].

Nach Newton bestand das Licht aus kleinsten Teilchen. Die Gesetze der geometrischen Optik und die im wesentlichen vom ihm entwickelte neuzeitliche Mechanik dürften zu dieser Ansicht beigetragen haben. Sie konnte sich jedoch nicht durchsetzen, weil im Umgang mit den optischen Geräten die Wellennatur des Lichtes immer offensichtlicher wurde. Damit ließ sich u.a. das Phänomen der Beugung physikalisch erklären und als Ursache für das begrenzte Auflösungsvermögen von Mikroskopen ausmachen. Ausgehend von der Vorstellung des Lichts als einer Art Sonde, mit der die feinen Mikrostrukturen abgetastet und sichtbar gemacht werden, kann die Wellenlänge des Lichtes anschaulich gesehen als Maß für die Feinheit dieser Sonde betrachtet werden. Für Strukturen, die kleiner als die Wellen-

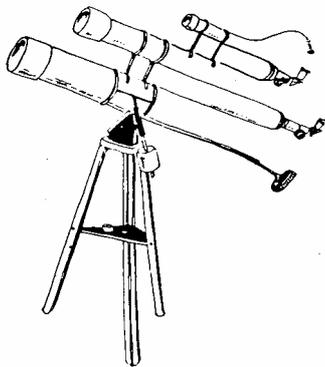


Bild 2: Wie wirklich ist die Wirklichkeit jenseits der Grenze der „Sichtbarkeit“? (V. Rencin)

länge sind, ist das Licht einfach zu grob. Damit stieß die Forschung bei der optischen Erschließung des Mikrokosmos an eine ultimative Grenze und die "Entdeckungsreise" hin zu immer kleineren Strukturen geriet vorerst ins Stocken.

Diese Grenze war diesmal nicht der Unvollkommenheit der menschlichen Sinne anzulasten, sondern lag einzig in der Natur des Lichtes begründet. Anders als bei der Brechung des Sichtbarkeitspostulats war selbst eine gedankliche Überschreitung dieser Grenze der Sichtbarkeit nur möglich, wenn man das Licht als Medium des Sehens in Frage stellte. Dieser Schritt muss damals jedoch außerhalb des Vorstellungsvermögens gelegen haben, weil Sichtbarkeit nicht anders als im Medium des Lichts denkbar war. Erst im Rahmen Quantenphysik, die als Ergebnis einer ähnlich umwälzenden wissenschaftlichen Revolution wie die der kopernikanischen die klassische Physik ablösen sollte, gelang es durch eine abermalige Neubestimmung dessen, wie Sichtbarkeit zu steigern sei, den Blick über die optische Grenze hinauszutreiben.

2. Jenseits der optischen Sichtbarkeit

Der Weg in die Welt jenseits der optischen Sichtbarkeit ist eng mit Entdeckungen verbunden, die zu einer empirischen Untermauerung der bereits bei den Vorsokratikern rein spekulativ vorweggenom-

menen atomistischen Struktur der Materie führten. Dabei spielte einmal mehr die instrumentelle Verfeinerung bei der Erforschung der Natur in den verschiedensten Bereichen eine entscheidende Rolle.

Mit Hilfe der Waage überzeugte man sich in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts davon (Proust, Dalton), dass sich verschiedene Stoffe (auch bei sehr kleinen Mengen) nur in ganz bestimmten Mengenverhältnissen kleiner ganzer Zahlen verbanden (Gesetz von den konstanten und multiplen Proportionen). Dadurch wurde auf Elemente verwiesen, die aus "atomaren" Entitäten bestehen.

Isaac Newton hielt es für "wahrscheinlich, dass Gott am Anfang die Materie in festen, massiven, harten, undurchdringlichen und beweglichen Partikeln formte,...dass diese primitiven Teilchen aufgrund ihrer Festigkeit unvergleichlich härter sind als irgendwelche aus ihnen zusammengesetzten porösen Körper, ja so hart, dass keiner sie abnutzen oder zerbrechen kann" (Übers. HJS) [4]. Auch dem Licht schrieb er korpuskulare Eigenschaften zu.

Dass man derartige Mikroobjekte für real zu halten begann, zeigte auch die kühne fluidmechanische Interpretation der elektrischen Phänomene als Ladungsstrom in massiven Drähten, der später als aus diskreten Teilchen bestehend erkannt wurde. Dadurch wurde die Anschauung einer gewissen Porosität bei festen Stoffen nahegelegt.

Trotz dieser und zahlreicher anderer empirischen "Beweise" für den Atomismus, wurde er lange Zeit nicht allgemein anerkannt. Selbst große Naturwissenschaftler wie Ernst Mach und Wilhelm Oswald sprachen sich noch gegen Ende des 19. Jahrhunderts vehement gegen die Existenz von Atomen aus. Mach sah Atome als "Gedankendinge...(die) wir nirgends wahrnehmen" können, an. Er war allenfalls bereit, Atome als "provisorische Hilfsvorstellungen" und "mathematisches Modell zur Darstellung der Tatsachen" [5] zu akzeptieren. Was den Gegnern des Atomismus fehlte, war offensichtlich der sichtbare Nachweis der Atome. Jedenfalls soll Ernst Mach jeden, der die Existenz von Atomen behauptete, gefragt haben: "Ham's ans g'sehn?"¹

Die Selbstverständlichkeit, mit der auch hier wieder der Sichtbarkeit über allen Zweifel erhabene Beweiskraft beigemessen wird, zeugt von der Zähligkeit des Sichtbarkeitspostulats (siehe [2]), auch wenn es mittlerweile optische Hilfsmittel einbezieht. Die nichtoptischen empirischen Befunde für eine atomare Welt jenseits der optischen Schwelle wurden jedoch immer überzeugender, auch wenn der Nachweis durch Streuversuche (Rutherford-Streuxperiment, Röntgenstreuung) noch keine visualisierbaren Hinweise auf die Existenz von Molekülen und Atomen lieferten (siehe unten).

¹ Diese positivistische Einstellung erinnert sehr stark an das von Andreas Osiander stammende Vorwort von Kopernikus' *De Revolutionibus*, in dem die neue Sehweise nur als Hypothese ausgewiesen wurde.

3. Der optische Barcode der Stoffe

Alle Chemie ist Astronomie

Johann Wilhelm Ritter

Nachdem Joseph Fraunhofer (1787- 1827) bei der Untersuchung der spektralen Eigenschaften von Glassorten für achromatische Fernrohre auf eine invariante gelbe Linie im Spektrum des Lichtes einer Kerze stieß und herausfinden wollte, ob diese auch im Sonnenspektrum vorhanden sei, entdeckte er zahlreiche unterschiedlich breite und starke dunkle Linien. Diese Linien erwiesen sich als charakteristisch für das Sonnenlicht. Sie ließen sich auch im Lichte der Venus ausmachen, womit man als bewiesen ansah, dass Venus Sonnenlicht reflektiert. Das Licht von Fixsternen wies andere Linienspektren auf.

Die Verbindung zwischen dem Sonnenspektrum und irdischen Spektren stellte Fraunhofer her, als er feststellte, dass die helle Linie im Licht einer Kerze, die - wie später Kirchhoff und Bunsen herausfinden sollten - vom Natrium herrührte, mit den beiden von Fraunhofer mit D bezeichneten Linien des Sonnenspektrums zusammenfielen.

Gustav Kirchhoff (1824 – 1887) und Robert Bunsen (1811 - 1899) setzten die Arbeit Fraunhofers systematisch fort und entwickelten die Spektralanalyse zu einer äußerst empfindlichen Methode, chemische Elemente zu charakterisieren. Sie erkannten, dass jeder Stoff ein eigenes Spektrum besitzt, das ähnlich unwandelbar und fundamental für den Stoff ist wie etwa das Atomgewicht. Mit der Spektralanalyse gelang es nach der Teleskopie ein weiteres Mal, die irdische Begrenztheit zu durchbrechen und den Himmelskörpern physikalisch noch näher zu kom-

rallinien im Licht der Sterne zu einer erfolgreichen Suche entsprechender Stoffe auf der Erde an, auf die man aufgrund ihres nur spurensweisen Vorkommens nur schwerlich gestoßen wäre. Der Ausspruch Max Ernsts: "Es entstehen Zusammenhänge zwischen einem Sternhaufen und einem Schmetterlingsflügel unter dem Mikroskop" [7] erscheint so gesehen nicht übertrieben.

Die Übereinstimmung von Spektrallinien des Lichtes von Himmelskörpern mit denen von irdischen Lichtquellen trug dazu bei, sich vom invarianten und für bestimmte Stoffe typischen Charakter zu überzeugen und führte zu einer schrittweisen Auffüllung des Periodensystems der Elemente. Umgekehrt ließen sich schließlich Sternspektren, die in systematischer Weise davon abwichen, indem sie nach rot oder violett verschoben erschienen mit Hilfe des Doppler-Effektes als Zeichen für die teilweise rasanten Bewegung der Sterne interpretieren. Was aufgrund der großen Entfernungen auf direkte Weise nicht möglich war, die Bewegung der Sterne zu beobachten, ließ sich nunmehr an den Spektren ablesen.

Die fundamentale Bedeutung der Spektren besteht darin, dass sie wie Barcodes von Waren, als Steckbriefe der Elemente angesehen werden können und gewissermaßen äußere Zeichen der inneren Beschaffenheit der allen Stoffen zugrunde liegenden Atome darstellen. Mit ihrer Entdeckung wurde der Beginn einer neuen Ära der optischen Erschließung der atomaren Welt eingeläutet. Gleichzeitig entstand eine bis dahin nie geahnte Verbindung zwischen dem Mikro- und Makrokosmos, die als ein wesentlicher Ausgangspunkt der modernen Kosmologie angesehen werden kann.

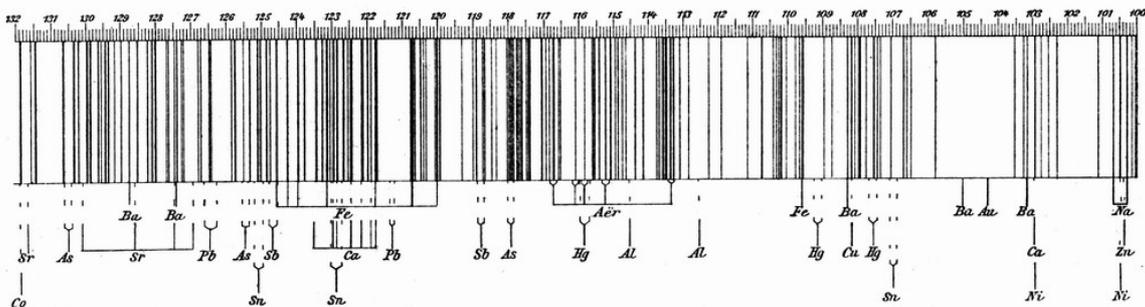


Bild 3 Kirchhoff vergleicht das Sonnenspektrum mit den Spektren irdischer Elemente [8].

men. Die Spektren der Sterne erlaubten chemische Fernanalysen und auf dieser Grundlage, die individuelle Beschaffenheit dem irdischen Blick zugänglich zu machen. Das Diktum Alexander von Humboldts, dass "alle Weltkörper... für unsere Erkenntnis nur homogene gravitierende Materie: ohne ... elementare Verschiedenheit der Stoffe" [6] seien, war damit überwunden.

Umgekehrt – und das zeigt nach Galileis folgenreichem Fernrohrblick zum Mond (siehe [2]) erneut die Reflexivität des Blicks zum Himmel und zur Erde zurück – regte die Entdeckung unbekannter Spekt-

Niels Bohr gelang es, die Linienspektren des Wasserstoffs in quantitativer und zugleich anschaulicher Weise mit der inneren Struktur des Wasserstoffatoms zu verknüpfen. Auf dieser Grundlage konnten, die bereits 1895 von Röntgen entdeckten durchdringenden Strahlen als hochenergetische „Licht“-quanten identifiziert werden, die durch Elektronenstöße aus dem Innern der Elektronenschale von Atomen ausgelöst werden. Da Röntgenstrahlen aufgrund ihrer hohen Energie eine sehr viel kleinere Wellenlänge als sichtbares Licht besitzen, erkannte man bald, dass man damit eine sehr feine Sonde zur

Erschließung von Mikrostrukturen jenseits der lichtmikroskopischen Auflösung zur Hand hatte (siehe unten).

Die durch das bohrsche Modell gegebene Anschauung der Atome als winzige Planetensysteme erwies sich zwar insofern als zu grob, als infolge der quantenphysikalischen Beschreibung submikroskopische Objekte nicht nur als Teilchen, sondern auch als Welle anzusehen waren. Ihr heuristischer Wert für die weitere Entwicklung der Naturwissenschaften sollte jedoch nicht unterschätzt werden.

Die durch die Quantenmechanik gegebene Zurücknahme der Anschauung sollte jedoch paradoxerweise auf einer höheren Stufe eine neue Ära der Visualisierung des Mikrokosmos begründen, die in der Elektronenmikroskopie ihre technische Realisierung fand. Aufgrund der Doppelnatur massebehafteter Mikroobjekte ließ sich den Elektronen wie dem Licht und anderer elektromagnetischer Strahlung eine Wellenlänge zuordnen. Mit Elektronen sollte es daher möglich sein, wie mit Hilfe elektromagnetische Strahlung, mikroskopische Strukturen zu untersuchen. Dass sich der Gedanke, ein Mikroskop für Elektronenstrahlen zu entwickeln, schließlich auch technisch umsetzen ließ, ist vor allem der elektrischen Ladung der Elektronen zu verdanken, die eine gezielte elektromagnetische Steuerung der Strahlen ermöglichte, wodurch die Funktion der optischen Linsen bei der Abbildung nachgestellt werden konnte (siehe unten).

4. Spurenlesen – Fotografie zur Fixierung von Ereignissen

Einen Gegenstand beschreiben heißt insbesondere, die an ihm sichtbaren oder mit Hilfsmitteln sichtbar gemachten Merkmale erfassen und systematisieren. Von Gegenständen, die nur unter bestimmten Bedingungen oder nur zeitweise zur Verfügung stehen, werden Abbilder hergestellt, die sich dann in Ruhe studieren lassen.

Die etwa zeitgleich mit der Wiederentdeckung der Perspektive zu Beginn der Neuzeit wiederentdeckte Camera Obscura² wurde schon sehr bald als Möglichkeit erkannt, zu untersuchende Gegenstände mit technischer Hilfe sich selbst aufzeichnen zu lassen. Sonnenfinsternisse beispielsweise, die sich kaum direkt beobachten lassen, wurden schon sehr früh mit Hilfe einer begehbaren Lochkamera auf eine Leinwand projiziert, und als Abbild beobachtet oder nachgezeichnet³.

Der dem Objektivitätsdenken entspringende Wunsch, dass sich Lochkamerabilder selbst „mal-

² Die Camera obscura war bereits Aristoteles bekannt und spielte aufgrund der Möglichkeit, perspektivische Ansichten "automatisch" zu entwerfen zu Beginn der Neuzeit eine wichtige Rolle in der Malerei.

³ Johannes Kepler entdeckte, dass es dabei zu groben Aufzeichnungsfehlern kommen kann, und löste in diesem Zusammenhang erstmalig das sogenannte Sonnentalerproblem (siehe etwa [11]).

ten“, führte schließlich zur Fotografie [9]. Dabei wurde die schon länger bekannte Tatsache ausgenutzt, dass Licht der Intensitätsverteilung entsprechende stoffliche Veränderungen hervorzurufen vermag. Als man mit Silbernitrat eine Substanz fand, bei der Licht einerseits eine Schwärzung hervorrief, die andererseits chemisch gestoppt und damit fixiert werden konnte, hatte man eine praktikable Methode zur Hand, Lochkamerabilder "aufzunehmen" und

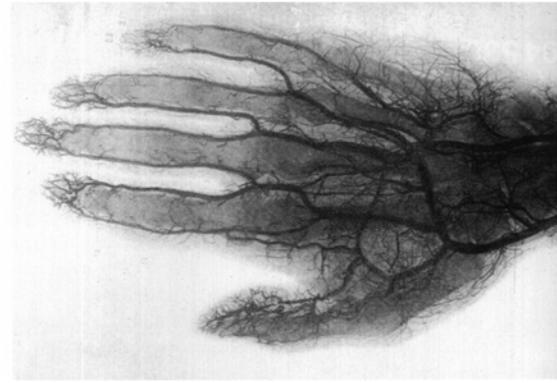


Bild 4: Röntgenfotografie der Blutgefäße einer Hand [10]. Durch Injektion von geeigneten Stoffen lässt sich der Kontrast gegenüber dem übrigen Gewebe erheblich erhöhen.

Gegenstände zu "fotografieren". In Kombination mit Linsensystemen konnten dabei mikroskopische und teleskopische Möglichkeiten auf die Kamera übertragen werden.

Einmal mehr war es zu einer fruchtbaren Verbindung von Chemie und Optik gekommen. Auch wenn die modernen CCD-Kameras nicht mehr die chemische, sondern die elektrische Wirkung des Lichtes zur Aufzeichnung ausnutzen, ist es im Prinzip dabei geblieben, dass von einem beleuchteten Gegenstand ausgehende Information gespeichert wird. Die Aufzeichnung ist von der Art, dass sie dem Auge im wesentlichen denselben Eindruck vermittelt, wie er vom Original hervorgerufen wird bzw. würde, wenn dies auf direkte Weise nicht möglich ist. Beispielsweise wären sehr schnell ablaufende oder sehr lichtschwache Vorgänge anders als durch entsprechend kurze oder entsprechend lange Belichtungen für den Menschen nicht sichtbar.

Wenn heute vom Medienzeitalter die Rede ist, dann hat die Fotografie und ihre moderne Weiterentwicklung bis hin zu Film, Fernsehen und Computer einen wesentlichen Anteil daran. Darin zeigt sich einmal mehr die Dominanz des Sehens und der Visualisierung nicht nur in den Wissenschaften.

Die Fotografie besitzt in der naturwissenschaftlichen Forschung von Anfang an einen wichtigen Stellenwert. Über die Möglichkeiten der Dokumentation hinaus gelingt es mit der Fotografie abermals, Unsichtbares zu visualisieren. Man denke nur an die Sichtbarmachung äußerst lichtschwacher Objekte durch genügend lange Belichtungszeiten.

5. Unsichtbare Strukturen im Lichte unsichtbarer Strahlungen

Die Bedeutung der Fotografie für die Mikro- bzw. Nanophysik geht vor allem auf den Umstand zurück, dass die Schwärzung von Fotoplaten nicht nur durch sichtbares Licht, sondern - wie sich bald herausstellen sollte - auch durch unsichtbare Strahlungen hervorgerufen wird.

Im Jahre 1895 entdeckte Wilhelm Conrad Röntgen (1845 – 1923) eine unsichtbare Strahlung, die wie sichtbares Licht charakteristische Spuren auf fotografischen Schichten hinterließ, aber ganz anders als sichtbares Licht feste Gegenstände durchdrang und einen Schattenriss der inneren Struktur des Gegenstandes entwarf. Die Möglichkeit, den menschlichen Körper zu "röntgen" und auf diese Weise Skelett und innere Organe sichtbar zu machen, entwickelte sich in kürzester Zeit zu einem der wichtigsten diagnostischen Verfahren in der Medizin (Bild 4).

Um die damals kursierende Vermutung zu prüfen, dass Röntgenstrahlung ein Fluoreszenzphänomen darstellt, stellte Henri Becquerel (1852 – 1908) fest, dass Pechblende auf einer lichtdicht verpackten Fotoplatte eine Schwärzung hervorruft, die auf eine weitere unsichtbare und durchdringende Strahlung schließen ließ. Diese radioaktive Strahlung sollte sich bald als ein Schlüssel zur inneren Struktur der Atome erweisen.

Über die Schattenabbildung hinausgehend wurde die Röntgenstrahlung bald als Sonde zur Erschließung nanoskopischer Strukturen erkannt, für die das Licht zu "grob" ist. So konnte Max von Laue (1879 – 1960) im Jahre 1912 in einem berühmten Experiment gleichzeitig den atomaren Aufbau von Kristallen und die Wellennatur der Röntgenstrahlung demonstrieren. Er nutzte dabei aus, dass die Röntgenstrahlen an den Gitterebenen von Kristallen reflektiert werden und miteinander interferieren. Das mit einer Fotoplatte aufgezeichnete Beugungsbild ist ein Muster von Intensitätsmaxima, die unter bestimmten

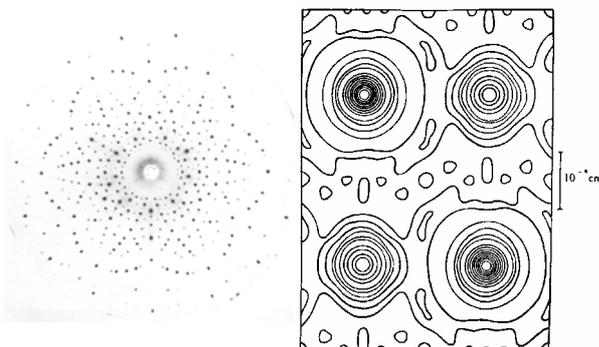


Bild 5: Links: Röntgenbeugungsdiagramm eines Quarzkristalls. Rechts: Höhenliniendarstellung der kristallinen Struktur von Kochsalz, berechnet aus dem Beugungsdiagramm.

Ausfallswinkeln entstehen (Bild 5). Dieses Beugungsmuster stellt das Kristallgitter in einem abstrakten „reziproken“ Raum dar, aus der sich die

Kristallstruktur im „realen“ Raum mit Hilfe einer Fouriertransformation rechnerisch ermitteln lässt.

6. Elektronen- und Rastersondenmikroskopie

Trotz der Erfolge der Röntgenstrukturanalyse blieb der Wunsch nach Bildern ungebrochen, die wie bei der Lichtmikroskopie reale Strukturen auf eine direktere Weise darstellen. Er fand letztlich in der Elektronenmikroskopie, die auf der Grundlage von Vorarbeiten von Ernst Ruska 1933 und Erwin Müller 1951 entwickelt wurde, seine zumindest teilweise Erfüllung. In ihren Möglichkeiten und ihrer Anwendungsbreite setzt die Elektronenmikroskopie in gewisser Weise die Lichtmikroskopie mit Elektronenstrahlen fort. Elektronen sind Quantenobjekte und verfügen über Wellen- und Teilcheneigenschaften. Beide Aspekte sind in der Elektronenmikroskopie von Bedeutung. Aufgrund der sehr kleinen Wellenlänge beschleunigter und zu Strahlen gebündelter Elektronen können mit ihnen Strukturen bis hin zu den Atomen aufgelöst werden. Ihre elektrische Ladung, eine typische Teilcheneigenschaft, ermöglicht es, die Elektronenstrahlen mit Hilfe elektromagnetischer Felder ähnlich wie durch Lichtmikroskoplinsen zu manipulieren.

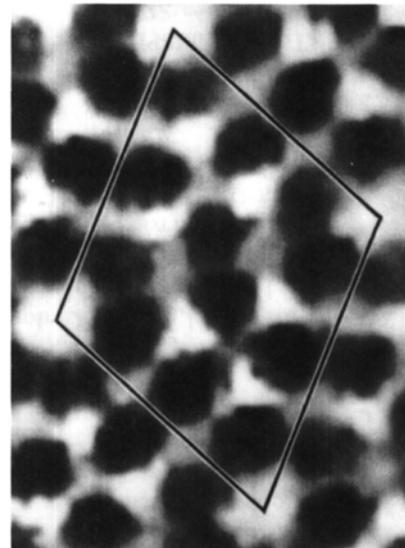


Bild 6: Rastertunnelmikroskopaufnahme von Atomen in einem Siliziumkristall. Die dunklen Bereiche stellen die Atome dar, die verschwommenen grauen Bereiche dazwischen geben die Positionen der Elektronenbindungen wieder, die die Kristallstruktur zusammenhalten (aus [12]).

In jüngster Zeit sind Varianten der Elektronenmikroskopie entwickelt worden, bei der keine Elektronenstrahlen mehr verwendet werden. Die abzubildende Struktur wird mit einer äußerst feinen Spitze, die bis auf wenige Atomradien an die Oberfläche herangeführt wird, abgetastet. Aufgrund ihrer Quantennatur ist es den Elektronen in der Metallspitze dann möglich, den winzigen Zwischenraum zwischen Spitze und Oberfläche zu „durchtunneln“. Indem die Oberfläche mit der Spitze abgerastert und dabei der sehr

empfindlich mit dem Abstand zwischen Spitze und Oberfläche variierende Tunnelstrom registriert wird, lässt sich die Topographie der Oberfläche äußerst genau ermitteln.

Eine auf diesem Rastertunnelmikroskop⁴ aufbauende Weiterentwicklung stellt das Rasterkraftmikroskop dar, das den Abstand zwischen Spitzen- und Oberflächenatomen durch die Kraft bestimmt, mit der eine elastisch angebrachte Sonde ausgelenkt wird. Dadurch wird der Anwendungsbereich der unter dem Begriff der Rastersondenmikroskopie zusammengefassten Methoden auch auf nichtleitende Materialien erweitert.

Zeigen nun die bildhaften Darstellungen der Rastersondenmikroskopie die Oberfläche eines Gegenstandes wie sie an und für sich ist? Dagegen spricht zum einen das „Kopenhagener Bildverbot“ [13]. Demnach wird aufgrund der heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation das abzubildende Objekt durch die Einwirkung des Beobachters in unkontrollierbarer Weise verändert, und es stellt sich die Frage, inwiefern die Rastersondenbilder etwas Reales darstellen. Denn aus „kopenhagener“ Sicht sind letztlich nur Korrelationen zwischen den Dingen real nicht aber die Dinge selbst [14].

Wenn wir uns die punktförmige Schwärzung, die ein Elektron auf einem Monitor hinterlässt, als durch ein Teilchen hervorgerufen vorstellen und uns fragen, wo das Teilchen vor diesem Ereignis war, so gibt es darauf im Sinne der Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik nicht nur keine Antwort, sondern sie lässt bereits die Frage als sinnlos erscheinen. Mit Sicherheit kann man - etwa beim Rastertunnelmikroskop - nur sagen, dass ein Tunnelstrom gemessen wird, der in komplizierter Weise die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen im Substrat und in der Tunnelspitze widerspiegelt. So gesehen sind die schließlich konstruierten Bilder allenfalls eine gemeinsame Darstellung von Spitze und Oberfläche, wobei die genaue Form der Spitze i.a. unbekannt ist und sich im Verlauf der Messung durch Umlagerungen einzelner Atome sogar spontan verändern kann⁵. Doch angesichts der Tatsache, dass man in den Bildern etwas sieht, dass sich mit der Erwartung in

nahezu idealer Weise deckt, treten diese Einschränkungen des Blicks in den Nanokosmos vollkommen in den Hintergrund. So gesehen mag es paradox erscheinen, „daß ausgerechnet der zutiefst quantenmechanische Tunneleffekt uns Bilder aus der atomaren Welt liefert, deren anschauliche Greifbarkeit keinen Platz läßt für quantenmechanische Unbestimmtheiten und Seltsamkeiten. Der Widerspruch löst sich bei näherer Betrachtung auf: Schon durch die Wechselwirkung mit ihren Nachbarn stehen die Atome in einem Kristallgitter gewissermaßen unter ständiger Observation, so daß quantenmechanische Beobachtungseffekte weitgehend vernachlässigt werden können“ [12, S. 237].

7. Graustufen und Falschfarbenbilder

Die Bilder atomarer Strukturen, die in einem ursprünglichen Verständnis gar kein Aussehen haben, unterscheiden sich grundsätzlich von Strukturen, die in einem Lichtmikroskop sichtbar werden. Während bei der Lichtmikroskopie Objekte im Prinzip durch bloße Vergrößerung über die menschliche Wahrnehmungsschwelle gehoben werden, gelingt die Visualisierung nichtoptisch erhobener Daten (also etwa durch Röntgeninterferenzen oder Tunnelströme) erst auf der Grundlage anerkannter physikalischer Theorien und praktischer Einfühlung in die mögliche Topographie des Objekts. Die Umwandlung der Daten in ein ansehbares Bild wird dann beispielsweise mit einer Art Höhenliniendarstellung (Bild 5 rechts) erreicht, die dem durch die Bestimmung von Beugungsbildern ermittelten Potential der Elektronenwolke der jeweiligen Gitteratome entspricht und eine topografische Anschauung des Objekts vermittelt.

Aber auch im Falle der Rastersondenmikroskopie, die gerne wie bei der Lichtmikroskopie als direkte Vergrößerung von Nanostrukturen angesehen wird, müssen Abstände, Ströme, Kräfte durch geeignete Graustufen oder Falschfarben (sic!) visualisiert werden, um ein "realistisch" aussehendes Bild z.B. eines Kristallgitters zu erhalten (Bild 6). Dabei verdankt sich der vermeintliche Realismus der Extrapolation der in der sichtbaren Welt gemachten Erfahrung, dass beispielsweise abstoßende Wechselwirkungen in der Regel durch materielle Wände hervorgerufen werden.

Derartige "bildgebende" Verfahren werden auch in anderen Bereichen, etwa in der Medizin ausgenutzt. So kommt man beispielsweise mit einer speziellen Weiterentwicklung der Abbildung des Körperinneren durch Röntgenstrahlung, etwa bei der Computertomografie, zu sehr realistischen Bildern.

Ein anderes in der Medizin inzwischen weit verbreitetes bildgebendes Verfahren nutzt das Reflexions- bzw. Brechungsvermögen von in ihrer Dichte variierenden Körperteilen aus. Das vom Gesichtspunkt des Sehens Interessante daran ist die rechnerische Umsetzung nichtoptischer physikalischer Vorgänge, die Rückschlüsse auf die Struktur des Körpers ermögli-

⁴ Das erste Rastertunnelmikroskop wurde von G. Binnig und H. Rohrer 1982 vorgestellt. Moderne Rastertunnelmikroskope können Abstände senkrecht zur Oberfläche auf 1/100 Atomdurchmesser auflösen.

⁵ Das zeigt sich beispielsweise darin, dass ein auf der Oberfläche liegendes Atom nicht als Erhöhung, sondern als Vertiefung oder überhaupt nicht zu „sehen“ ist. Oder anstatt der erwarteten Kugelpackung wird ein Wellenmuster wie auf der Oberfläche eines Gewässers sichtbar. Je genauer man eine Oberfläche abbilden möchte, desto geringere Abstände und desto größere Tunnelströme sind erforderlich. Dadurch kommt es aber auch zu Veränderungen der Oberfläche durch die Sondenspitze. Die Beeinflussung des zu Beobachtenden durch die Beobachtung ist daher nicht zu vermeiden ([12], dort weitere Literaturhinweise).

chen. Beim Ultraschall ist es die rechnerische Auswertung von Messungen der Laufzeit und Intensität der Echos, die die ausgesendeten Ultraschallsignale an den Inhomogenitäten des Körpergewebes hervorrufen. Da die rechnerische Auswertung in Echtzeit erfolgt, hat man keinen Zweifel daran, beispielsweise die auf dem Bildschirm erscheinenden Abbilder von Organen und vor allem von möglichen pathologischen Abweichungen direkt zu sehen.

Im Unterschied zu Mikroobjekten hat man in diesen Fällen jedoch eine Möglichkeit, die berechneten Bilder an der Realität zu überprüfen und die Visualisierungen entsprechend zu normieren. Denn man kennt menschliche Organe und Knochen auch aus direkter Anschauung.

Aber auch mehr oder weniger direkt, weil durch Licht oder andere elektromagnetische Strahlen hervorgerufene Bilder etwa aus den Tiefen des Weltalls müssen oft auf der Grundlage der kosmologischen Theorien rechnerisch manipuliert werden, um zu "verständlichen" Ansichten zu werden. Als Beispiel seien hier das merkwürdige Phänomen der Zwillingquasare Q 0957 A, B genannt, die identische Spektren und dieselbe Rotverschiebung aufweisen.

Das Rätsel löst sich, wenn man von der gravitationalen Linsenwirkung einer zwischen Objekt und Beobachter liegenden massereichen Galaxie ausgeht, die diese Fata Morgana-Erscheinung hervorruft. Subtrahiert man die Spuren des oberen Zwilling elektronisch von dem unteren, so kommt deutlich eine das Licht ablenkende und dadurch aufteilende Galaxie zum Vorschein (Bild 7).

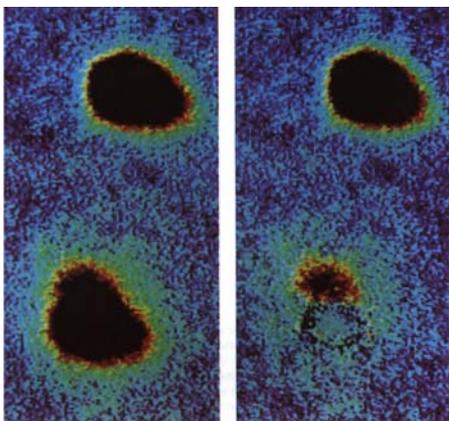


Bild 7: Eine Galaxie zwischen Beobachter und Quasar lenkt das Licht so ab, dass es von zwei Objekten zu kommen scheint (aus: [15]).

8. Sehen durch Rechnen: Simulierte Sichtbarkeit

Die rechnerische Verwandlung empirischer Daten in einleuchtende Bilder gewinnt immer mehr Bedeutung. Dabei geht es darum, aufgrund einer plausiblen Theorie nichtvisuelle Daten (z.B. Ultraschallechos) zu visualisieren oder nicht plausible Bilder, die z.B. durch zunächst nicht erkennbare Störungen deformiert wurden, auf eine störungsfreies, plausibles Bild zurückzuführen (z.B. Zwillingquasar).

Es gibt aber auch Daten die keinen empirischen Ursprung haben, aber dennoch zu sinnvollen Bildern führen können. Grundsätzlich lassen sich beliebige Daten in Bilder überführen.

Genannt seien hier zum einen die Computersimulationen, die heute nicht nur in der naturwissenschaftlichen Forschung einen großen Stellenwert besitzen. Mit Hilfe der Monte-Carlo-Methoden gelingt es beispielsweise, makroskopische Eigenschaften von Systemen aus dem Verhalten zufällig erzeugter Zustände einiger Milliarden Atome im wahrsten Sinne des Wortes zu "ermitteln". Dabei wird die physikalische Erkenntnis ausgenutzt, dass das makroskopische Geschehen von Systemen durch wenige Größen wie Temperatur und Dichte bestimmt ist, die sich als statistische Mittelwerte über die atomaren Bestandteile bestimmen lassen.

Auf diese Weise gelingt nicht nur die physikalische Beschreibung von Systemen, die mit analytischen Methoden der statistischen Physik nicht erfasst werden können, sondern es lassen sich auch Abbildungen erzeugen, die etwa mit den entsprechenden Rastersondenaufnahmen der entsprechenden realen Systeme verglichen werden können. Und dies nicht nur unter dem Gesichtspunkt der gegenseitigen Vergewisserung, sondern auch in der kritischen Absicht einer Hinterfragung der Ergebnisse

Ein weiterer Aspekt der mit Computersimulationen verbundenen Möglichkeiten besteht in der Visualisierung realer Vorgänge in abstrakten Räumen, die u.U. An- und Einsichten erlaubt (siehe z.B. [16]), die in realen Räumen unzugänglich sind. Man denke etwa an das Beispiel chaotischer Vorgänge, die im Realraum als bloßes Spiel des Zufalls erscheinen und sich im nur mit Hilfe de Computers zugänglichen Zustandsraum des Systems als ästhetisch ansprechende hochgeordnete Gebilde erweisen. Es ist kaum übertrieben zu behaupten, dass erst die Möglichkeit eines "Blicks" in den Zustandsraum die physikalische Bedeutung chaotischer bzw. allgemein nichtlinearer Systeme vor Augen führte.

In diesem Zusammenhang sei auch das über den engen Bereich der Wissenschaften hinaus bekannt gewordene Apfelmännchen, das als eine Konkretisierung des beeindruckenden und anders kaum zugänglichen unendlichen Formenreichtums anzusehen ist, der in einem mathematischen Ausdruck verborgen sein kann (Bild 8).

Mit Hilfe von Computersimulationen können aber nicht nur räumlich unzugängliche Aspekte der Realität zugänglich gemacht werden. Auch Vorgänge, die zu schnell oder zu langsam ablaufen, lassen sich visualisieren. So kann man beispielsweise in Zeitrafferdarstellungen die Entfaltung eines Gebirges miterleben oder ein Anblick jener merkwürdigen Deformationen von Objekten simulieren, der sich uns böte, wenn man sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegte. Ganz allgemein bieten computergenerierte Visualisierungen dem menschlichen Vorstellungsvermögen angemessene Zugänge zu abstrakten

Ausdrücken, die wohl für die meisten Menschen nur eine nichts sagende Zusammenstellung von Zeichen bedeuteten.

Das didaktische Potenzial derartiger Simulationen ist bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Es wäre beispielsweise zu untersuchen, inwiefern Visualisierungen an sich abstrakter Objekte und Vorgänge eine rein gedanklichen Repräsentation (die ja auch zumindest streckenweise durch kaum erfassbare Anschauungen begleitet werden) unterstützen und vertiefen könnten.



Bild 8: Visualisierte Abstraktion: Umwandlung der Mandelbrotiteration für einen kleinen Ausschnitt.

9. Sehen als Konstruktion

Das Teleskop und das Mikroskop, die den Aufbruch in neue bis dahin unbekannte und unzugängliche Welten ermöglichten, haben insofern falsche Erwartungen geweckt, als man von der aus antiker Sicht her selbstverständlichen Annahme ausging, optische Totalität wäre bereits theoretische Definitivität, und eine ad infinitum durchgängige direkte Übersetzbarkeit ins anschaulich Visuelle vorzufinden glaubte. Mehr noch: In gewisser Weise wurde erwartet, "man würde die erschlossenen Figuren der Atome nur zu sehen brauchen, um die Eigenschaften aller Dinge als deren Wirkungen mit Sicherheit zu begreifen und mehr als dies nicht zu beanspruchen" [17, S. 718]. Bacons Ansicht, Demokrit "würde ... entzückt gewesen sein und gemeint haben, dass (mit dem Mikroskop) das Mittel, die Atome zu sehen, gefunden wäre" [18], vermittelt einen Eindruck von dieser Erwartung. In entsprechender Weise ging Arthur Schopenhauer für den Bereich der Astronomie davon aus, dass "sobald wir die Welträume frei durchlaufen könnten und teleskopische Augen hätten" das Universum verständlich vor uns läge [19].

Eines der größten Probleme bei der Visualisierung submikroskopischer Objekte und Vorgänge, also solcher, die anders als die Lichtmikroskopie nicht ohne Bruch über die Sichtbarkeitsgrenze hinweg extrapoliert werden können, besteht darin, dass es keine verlässlichen Referenzanschauungen gibt. Man ist in einer ähnlichen Situation wie jemand, der von einem Gegenstand, der nur akustische Signale

abgibt, die man bisher nicht gehört hat, ein visuelles Bild entwerfen soll. Die Umwandlung des akustischen Signals in ein optisches hilft dabei nicht viel weiter. Die submikroskopischen Objekte äußern sich in einer Weise, für die es keine Sinneswahrnehmung gibt und die keinen Wahrnehmungsbedingungen genügen. Um überhaupt einen sinnlichen Zugang zu ermöglichen, müssen die Signale erst in erkennbare, in der Regel optische Signale umgewandelt werden. Mit anderen, den Worten Hans Blumenbergs: "Die unsichtbaren Welten, in der Messgeräte die Wahrnehmung nicht nur im Hinblick auf Präzision und Reichweite überbieten, sondern auch weitgehend ersetzen und zugleich ihre Daten beliebig darbieten können - durch Zeiger, Skalenwerte, Diagramme, Kurven, Lochstreifen -, hat sich weit entfernt von den spezifisch optischen Gegenstandsstrukturen als den vertrauten und erlernten Gegebenheitsweisen einer Lebenswelt. Die Variationen dessen, was als Zugang zur Realität möglich ist, hat längst die Sphäre der Imagination, aber auch der bloßen Faktizitätsbehauptung in bezug auf den Menschen verlassen und ist zur technischen Aufgabe geworden, Informationen zu beschaffen, für die kein Organ zuständig ist, sie zu speichern und bis hin zu dem sachgemäßen Verhaltenskonzept zu verarbeiten. Das alles ist zu einer aus dem Menschen ausgegliederten Sphäre von Wahrnehmungen und Sprachen geworden" [17, S. 649].

Kurzum: Ist schon das naive Sehen das Ergebnis eines durch das kulturelle Umfeld geprägten Sozialisationsprozesses, so ist das instrumentelle Sehen im Bereich der Naturwissenschaften erst recht eine äußerst voraussetzungsvolle Konstruktion, die weit entfernt ist von aller Augenscheinlichkeit und Selbstverständlichkeit. Das naturwissenschaftliche Sehen gelingt erst auf der Grundlage einer anspruchsvollen Fachsozialisation, die eine durch theoretisches Wissen geleitete Einübung in eine experimentelle Praxis voraussetzt. Dies gilt insbesondere für den Elektronenmikroskopiker, zu dem "man nicht in einigen Wochen oder Monaten (wird), sondern erst nach jahrelanger Erfahrung" [12]. Ein Grund dafür ist weniger die Kompliziertheit der Geräte, als vielmehr die Tatsache, dass der Elektronenmikroskopiker das Endbild zu einem wesentlichen Teil selbst zu gestalten hat, wobei in der Regel nur auf wenige Hinweise auf das "Aussehen" eines wie auch immer vorzustellenden Originals zurückgegriffen werden kann.

Anders als etwa bei einer Fotografie, die man direkt mit dem Original vergleichen kann, ist man in diesem Fall jedoch auf das Bild beschränkt. Das Bild ist die einzige Möglichkeit, eine visuelle Beziehung zum Original herzustellen. Wer darin jedoch die Gefahr der Täuschungsmöglichkeiten sieht, sollte sich zum einen vor Augen halten, dass fotografische Abbildungen dreidimensionaler Objekte erst aufgrund einer (perspektivischen) Täuschung ein realistisches Aussehen erlangen. Zum anderen sollte sie

oder er sich klarmachen, dass in einem strengen Sinne auch bei direkt sichtbaren Gegenständen nichts so und da zu sehen ist, wie und wo es sich an und für sich befindet. Wenn beim Sonnenuntergang die blutrote Sonne gerade noch über dem Horizont steht, dann ist das eine doppelte Täuschung. Die Sonne ist in Wirklichkeit weiß und bereits untergegangen. Aber was heißt schon Wirklichkeit?

10. Literatur

- [1] Platon: Sämtliche Werke II. Politeia 507c . Reinbek: Rowohlt 1963, S. 219f
- [2] Schlichting, H. Joachim: Die Welt jenseits der geschliffenen Gläser. Zur Bedeutung des Sehens in der klassischen Physik. *Phydid* 1/2 (2003), S. 9 - 18
- [3] Goethe, Johann Wolfgang von: Gespräche, Bd. III/2, Zürich 1972, S. 755
- [4] Newton, Isaac: *Opticks* (1704). New York: Dover 1952, p. 400 (Book III, Quest. 31)
- [5] Mach, Ernst: *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*. Leipzig: Brockhaus 1912, S. 466f
- [6] Humboldt, Alexander von: *Kosmos IV*. Stuttgart und Augsburg: Cotta 1858, S. 7
- [7] Ernst, Max, zitiert nach: Konersmann, Ralf: René Magritte. *Die verbotene Reproduktion*. Frankfurt: Fischer Verlag 1991, S.7
- [8] Dannemann, Friedrich: *Die Naturwissenschaften in ihrer Entwicklung und in ihrem Zusammenhange*. Leipzig, Berlin: Engelmann 1913, Bd. 4, S. 318
- [9] Busch, Bernd: *Belichtete Welt. Eine Wahrnehmungsgeschichte der Fotografie* München: Hanser Verlag 1989
- [10] Robin, Harry: *The Scientific Image*. New York: Abrams 1992
- [11] Schlichting, H. Joachim: *Sonnentaler fallen nicht vom Himmel. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*. 48/4 (1995), S.199-207
- [12] Burgess, Jeremy, Marten Michael; Taylor, Rosemary: *Mikrokosmos. Faszination mikroskopischer Strukturen*. Heidelberg: Spektrum Verlag 1990, S. 198
- [13] Krug, Joachim: "Ein Auge welches sieht, das andere welches fühlt". *Bilder aus der physikalischen Nanowelt*. In: Huber, J.; Heller, M. (Hrsg.): *Konstruktionen Sichtbarkeiten. Interventionen 8*. Zürich: Hochschule für Gestaltung und Kunst & Museum für Gestaltung 1999, S. 229 – 244
- [14] Mermin, David: *What is quantum mechanics trying to tell us?* *American Journal of Physics* 66(1998), S. 753 – 767
- [15] Layzer, David: *Das Universum. Aufbau, Entdeckungen, Theorie*. Heidelberg: Spektrum Verlag 1989, S. 173
- [16] Nordmeier, Volkhard, Schlichting, H. Joachim. *Strukturbildung und Chaos. Einfache Zugänge mit Mitteln der Schulphysik*. In: *Physik in unserer Zeit* 33 (2003)
- [17] Blumenberg, Hans: *Die Genesis der kopernikanischen Welt* Frankfurt: Suhrkamp Verlag 1981

[18] Bacon, Roger: *Große Erneuerung der Wissenschaften*, S. 351. *Digitale Bibliothek Band 2: Philosophie*, S. 12757

[19] Schopenhauer, Arthur: *Die Welt als Wille und Vorstellung I*. Leipzig: Reclam Verlag 1892, S. 111