

Von Parsec- und Nanoräumen Die Spannweite der Raumdimensionen in der Physik

1. Vorbemerkungen

Ein Blick ins Konversationslexikon sowie die anderen Referate der Matreier Gespräche des Jahres 2005 zeigen, dass die Begriffsbezeichnung "Raum" für vielerlei unterschiedliche Begriffsinhalte verwendet wird, die mehr oder weniger eng in analogischer Beziehung zum physikalischen Raum stehen. Insbesondere differenziert die deutsche Sprache nicht zwischen dem Begriff "Raum" im Sinne von englisch "room" und dem Begriff "Raum" im Sinne von englisch "space". Was den physikalischen Begriff "Raum" anbetrifft, so steht dieser Begriff - wie im Beitrag "Hierarchische Strukturen im Bereich der Physik" der Matreier Gespräche des Jahres 2003 ausgeführt wurde (Klinger, W. 2003) - in der Hierarchie physikalischer Begriffe an oberster Stelle und wird im allgemeinen im Sinne von englisch "space" verwendet.

Die Begrifflichkeit des dreidimensionalen Raums erfordert - ob dies dem Menschen nun bewusst wird oder nicht - ein Bezugssystem. Ein solches, wie auch immer geartetes Bezugs- oder Koordinatensystem spielt bei der Ausbildung der Raumvorstellung des Menschen eine ganz wesentliche Rolle. Der Versuch des Physikers Isaac Newton, den physikalischen Begriff "Raum" zu definieren, lautet demnach auch: Unter Raum versteht man das durch Entfernungsmessung in drei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen exakt ausmessbare Vakuum, in dem sich die Körper der Makrophysik bewegen. Die Newtonsche Vorstellung eines absoluten Raumes musste im 20. Jahrhundert im Rahmen der Einsteinschen Relativitätstheorie allerdings aufgegeben werden. Denn die Michelsonschen Experimente zur Messung der Lichtgeschwindigkeit in bewegten Bezugssystemen hatten ergeben, dass alle Inertialsysteme, d.h. Koordinatensysteme, die sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, gleichberechtigt sind.

Sowohl in der Ontogenese als auch in der Phylogenese des Menschen sind die zur Raumerfahrung und Raumerfassung des Menschen dienenden Bezugssysteme zunächst egozentrisch. Mit der Eroberung immer größerer Raumgebiete findet dann zunehmend eine Dezentralisierung sowie eine Relativierung der Bezugssysteme statt. Ein Kind erlebt sich zunächst als Mit-

telpunkt, von dem aus es seine dreidimensionale Umwelt erobert. Erst im Laufe der Zeit tritt eine Dezentralisierung und Relativierung von diesem egozentrischen Bezugssystem ein. Mit zunehmender Eroberung seiner dreidimensionalen Umwelt nimmt der Heranwachsende wahr, dass dezentralisierte, außerhalb seiner Person liegende Bezugssysteme zur Festlegung und Beschreibung räumlicher Gegebenheiten oft wesentlich geeigneter sind.

Auch bei der phylogenetischen Entwicklung der Raumvorstellung der Menschheit findet ein sukzessiver Prozess der Dezentralisierung der Bezugssysteme statt. Dieser Prozess hängt ganz wesentlich vom jeweiligen Stand der naturwissenschaftlichen Erkenntnis sowie der Höhe der Techniken einer Gesellschaft ab. Der Entwicklungsstand des naturwissenschaftlichen Denkens und der Technik findet seinen Niederschlag komprimiert zusammengefasst im Weltsystem einer Gesellschaft.

Von Bedeutung ist hier das Verhältnis zwischen Relativem und Absolutem sowie zwischen Subjektivem und Objektivem. Im Universum der so genannten primitiven, d.h. ursprünglichen Gesellschaften wird nichts als relativ zur Position des Beobachters bzw. des Subjekts begriffen. Selbst Träume werden nicht als relativ zum Subjekt verstanden und bilden Teil der physikalischen Realität. Die Sterne werden als kleine Objekte betrachtet, die auf der Höhe der Wolken angebracht sind. Ihre Bewegung ist weder autonom noch unbedingt regelmäßig. Ein Kind beispielsweise glaubt sich durch das Kommen und Gehen des Mondes verfolgt, seine Bewegungen werden also von ihm bestimmt. Sterne ziehen den Menschen voran und weisen ihnen den Weg. Das Universum hat ein Zentrum, und dieses absolute Zentrum liegt in der Gemeinschaft, zu der das Subjekt gehört. Der Raum (als solcher) hat somit ein Zentrum, das dem Gebiet des Dorfes entspricht. Das Universum des Primitiven ist aber nicht nur egozentrisch, es ist auch phänomenistisch, d. h. die beobachtete Realität wird nicht von der physikalischen Realität unterschieden, die aus den Erscheinungen abgeleitet werden kann. Eine Unterscheidung der Erscheinungen und der objektiven Realität setzt eine ständige Dezentrierung des Denkens voraus, d. h. eine mögliche Unterscheidung des Objektiven und des Subjektiven (*Piaget, J. 1975*).

2. Raumvorstellungen vom Universum in Antike und Mittelalter

Ein entscheidender Schritt zur objektiven Wahrnehmung von Naturerscheinungen und damit zur Dezentrierung wurde von den Chaldäern, einem aramäischen Volksstamm in Mesopotamien, ca. 1000 v. Chr. vollzogen. Ihre

Vorstellungen vom Universum waren zunächst noch von einer primitiven Mythologie geprägt. Ihre Beobachtungen des Himmels und der Gestirne waren mit einer soziomorphen Astrologie verbunden. Den chaldäischen Priesterastrologen gelang es nun erstmals, eine Technik der Zeitmessung zu entwickeln, die eine Bestimmung der Bewegung der Himmelskörper erlaubte. Sie entwickelten eine Sonnenuhr, indem sie die Länge des Schattens eines Stabes maßen. Damit erhielten sie die Zeit als Funktion der Sonnenbahn. Diese Zeitmessung führte sie zu der außerordentlich wichtigen Entdeckung - erstmals in der damaligen Welt -, dass sich Sonne, Mond und Sterne auf unabhängigen, autonomen Bahnen bewegen, von denen sie nicht abweichen; dass diese Bahnen also insbesondere nicht von lebenden oder gestorbenen Wesen oder von jahreszeitlichen Festen abhängen (*Simonyi, K. 1990, 52*).

Einen weiteren wichtigen Schritt auf dem Weg zu einem Weltbild im Sinne unserer heutigen Auffassung stellt die griechische Naturphilosophie dar, deren Beginn gewöhnlich in das Jahr 585 v. Chr. gelegt wird, in dem Thales von Milet eine Sonnenfinsternis vorausgesagt haben soll. Die Beobachtung der Himmelskörper (Sonne, Mond, Planeten und Fixsterne) wurde immer präziser. Die Vorstellung, dass die Erde eine Scheibe sei, wurde zunehmend in Frage gestellt. Anaximander (ca. 610 - 646 v. Chr.) etwa hielt die Erde für einen Zylinder und behauptete, dass die Sonne so groß sei wie die Erde oder vielleicht sogar 20 -28 mal so groß. Die Pythagoräer (ca. 569 - 475 v. Chr.) entwarfen zum ersten Mal ein kosmologisches Weltmodell, in dem die Erde nicht mehr im Mittelpunkt stand. Sie fassten die Erde als Kugel auf und schrieben ihr eine Bewegung um das im Mittelpunkt der Welt gelegene zentrale Feuer zu. Dieses Zentralfeuer wird außerdem von West nach Ost von Sphären, d. h. von durchsichtigen Kugeln, umkreist, an denen die Himmelskörper, nämlich die Erde, eine Gegenerde, der Mond, die Sonne, 5 Planeten und die Fixsterne, befestigt sind, und die Abstände der einzelnen Sphären entsprechen den musikalischen Harmonien (daher der Begriff Sphärenklänge).

Eine Zusammenfassung und Synthese der sich teilweise widersprechenden Erkenntnisse und Ideen der Antike im Rahmen eines alles umfassenden Weltbildes ist uns durch Aristoteles überliefert. Aristoteles teilt das Universum in eine Welt unterhalb und oberhalb des Mondes ein. Die Erde ist sphärisch und befindet sich im Mittelpunkt seines Universums. In der sublunaren Kugel ist alles aus den vier Elementen Feuer, Wasser, Luft und Erde zusammengesetzt. Oberhalb des Mondes ist alles unerschaffen und unzerstörbar. In diesem Bereich führt Aristoteles ein fünftes Element, nämlich die

Quintessenz ein, die er als Äther bezeichnet. Aus ihm bestehen die Himmelskörper. Die natürliche Bewegung der terrestrischen Elemente ist senkrecht nach unten, die des Äthers jedoch kreisförmig. Die Himmelsgebilde sind perfekt sphärisch. Die Sterne und Planeten bestehen aus dem fünften Element. Sie sind an konzentrischen Kugelschalen aufgehängt und bewegen sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit auf Kreisbahnen. Das aristotelische Weltbild, das mehr als 2000 Jahre die bedeutendsten Gelehrten fasziniert hat, ist in seinen wesentlichen Zügen nur qualitativ.

Durch immer exaktere, quantitative Beobachtungen ergaben sich in der Folgezeit gravierende Widersprüche zur Idee der gleichförmig-kreisförmigen Bewegung der Planeten. Diese Widersprüche waren aber nicht stark genug, um einen Paradigmenwechsel vom geozentrischen zum realistischeren heliozentrischen Weltbild herbeizuführen. Bedeutsame Fortschritte bei Einzelproblemen wurden entweder außer Acht gelassen oder es wurde versucht, offensichtlich widersprechende Beobachtungen in das aristotelische Weltbild zu integrieren. So hat der Astronom Ptolemäus (100 - 160 n. Chr.) zur Aufrechterhaltung des aristotelischen Dogmas der gleichförmigen Kreisbewegung der Planeten Epizyklen, Deferentenkreise und Äquanten eingeführt. Damit gelang es ihm, die - teilweise sogar rückläufigen - Bewegungen der Planetenbahnen halbwegs genau zu erklären und zu berechnen (*Simonyi, K. 1990, 97*).

Generationen von Astronomen haben sich im Laufe der Zeit mit dem äußerst komplexen ptolemäischen Weltensystem auseinandergesetzt. Aufgrund immer genauerer Messergebnisse in Bezug auf die Position der Himmelskörper haben sie Unstimmigkeiten festgestellt und versucht, diese durch Abänderung und Verfeinerung des ptolemäischen Theoriengebäudes zu integrieren. Ein Paradigmenwechsel vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild fand erst im 17. Jahrhundert statt.

Ein erster Schritt hin zu diesem Paradigmenwechsel erfolgte bereits im 16. Jahrhundert durch Kopernikus (1473 - 1543). Kopernikus postulierte in seinem 1543 erschienenen Werk "De revolutionibus orbium coelestium" ("Über die Umdrehungen der Himmelsbahnen") das heliozentrische Weltbild, d. h. Erde sowie Planeten kreisen um die im Zentrum ruhende Sonne. Ihm zu Ehren wird dies heute als kopernikanisches Weltbild bezeichnet. Kopernikus ging jedoch auch in seinem heliozentrischen Weltbild immer noch von den exakt kreisförmigen, mit gleichförmiger Geschwindigkeit durchlaufenen aristotelischen Bahnen der Himmelskörper aus, so dass auch er die ptolemäische Epizykeltheorie zu Hilfe nehmen musste, um die beobachteten Bahn-

abweichungen ausgleichen zu können. Aus diesem Grunde wird das kopernikanische System - im Gegensatz zum geostatischen System mit einer ruhenden Erde - oftmals auch als heliostatisches System, d. h. mit einer ruhenden, aber nicht im Zentrum stehenden Sonne, bezeichnet (*Simonyi, K. 1990, 178*).

Zum Durchbruch des heliozentrischen Weltbilds kam es erst, als Johannes Kepler (1571 – 1630) aufgrund der von Tycho de Brahe (1546 - 1601) äußerst exakt gemessenen Bahndaten der Planeten - insbesondere des Mars - erkannt hatte, dass sich die Planeten auf elliptischen Bahnen bewegen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht; dass die Verbindungslinie Planet-Sonne in gleichen Zeiten gleich große Flächen überstreicht; und dass das Verhältnis der Quadrate der Umlaufzeiten zweier verschiedener Planeten genau so groß ist wie das Verhältnis der dritten Potenzen ihrer großen Ellipsenhalbachsen. Diese nach Kepler benannten Gesetzmäßigkeiten, die er in seinen beiden Büchern "Astronomia nova" (erschienen 1609) und "Harmonices mundi" (erschienen 1619) mathematisch formuliert hat, sind in hervorragender Übereinstimmung mit den Messdaten. Häufig wird daher das Jahr 1609 als Geburtsstunde der modernen Astronomie angesehen.

Galileo Galileis (1564 - 1642) Bewegungsgesetze, insbesondere aber Isaac Newtons (1642 - 1727) Gravitationsgesetz lieferten schließlich die physikalische Begründung für das heliozentrische Weltbild und somit die endgültige Bestätigung von Kopernikus.

Bekanntlich hat die katholische Kirche dieses heliozentrische Weltbild vehement abgelehnt. Schriften, die das kopernikanische System als Realität behandelten, wurden erst seit 1835 nicht mehr im Index aufgeführt, und der Fall Galileo Galilei fand erst im Jahre 1992 - Galileis 350. Todesjahr - durch die Rehabilitation Galileis einen rühmlichen Abschluss. Nach heutiger Auffassung stehen das heliozentrische und das geozentrische Weltbild nicht im Widerspruch. Es handelt sich hier vielmehr um eine Dezentralisierung des geozentrischen Bezugssystems. In beiden Bezugssystemen lassen sich die Planetenbahnen berechnen. Doch neben einer wesentlich größeren Anschaulichkeit ist der Rechenaufwand viel geringer, wenn das Koordinatensystem in den Sonnenmittelpunkt gelegt wird. In unserem Universum existiert kein ausgezeichneter Mittelpunkt. Jeder beliebige Punkt des Universums kann als Bezugspunkt dienen. In der modernen Astronomie werden die Koordinatensysteme der jeweiligen Fragestellung optimal angepasst.

3. Raumdimensionen im Universum der modernen Astronomie

Bis ins hohe Mittelalter hinein waren astronomische Beobachtungen im wesentlichen auf unser Sonnensystem sowie auf einzelne helle Sterne unserer Milchstraße beschränkt. Mit dem bloßen Auge konnte man damals nicht tiefer in den Weltenraum vordringen. Der Grund hierfür liegt im verhältnismäßig geringen Auflösungsvermögen unseres Auges. Das Auflösungsvermögen gibt an, welchen Abstand zwei Punkte in einer bestimmten Entfernung haben müssen, damit sie vom Auge noch als getrennte Punkte wahrgenommen werden können (Abb. 1). Das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges beträgt etwa nur eine Bogenminute Winkelabstand und ist damit viel zu gering, um die Mehrzahl der Sterne unserer Milchstraße als getrennte Himmelskörper wahrnehmen zu können. Die Erkenntnis, dass die milchige Straße am Nachthimmel eine ungeheure Ansammlung von sonnenähnlichen Sternen ist, war somit den Astronomen der Antike und des Mittelalters nicht zugänglich.

Eine wesentliche Wende brachte hier die Erfindung des Fernrohrs. Die ersten astronomischen Fernrohre gehen auf Galilei und Kepler zurück. Beide Fernrohrtypen benutzen sphärische Glaslinsen. Das Auflösungsvermögen eines Fernrohrs hängt im wesentlichen vom Durchmesser seiner Öffnung ab. Es ist um so größer, je größer die Öffnung des Fernrohrs ist (zu Auflösungsvermögen und Strahlengang der beiden Fernrohrtypen z. B. *Bergmann, L. / Schäfer, C. 1993, 172*).

Das Auflösungsvermögen von Galileis Fernrohr war bereits so groß, dass er damit vier der Jupitermonde entdecken konnte. Er stellte damit ebenfalls fest, dass die kontinuierliche, nebelartige Milchstraße aus einer Vielzahl einzelner Sterne bestand und dass die Venus - ähnlich wie der Mond - einzelne Phasen durchläuft. All diese Entdeckungen galten als wichtige Bestätigung für die Gültigkeit der Keplerschen Gesetze und des kopernikanischen Systems.

Optische Geräte, die auf der Brechung des Lichtes in Glaskörpern beruhen, weisen eine Reihe von Abbildungsfehlern auf. Besonders störend sind bei astronomischen Beobachtungen die Farbfehler. Isaac Newton wurde seinerzeit beauftragt zu untersuchen, worauf dieser Farbfehler beruht, um Abhilfe schaffen zu können. Newton entdeckte in diesem Zusammenhang die Dispersion des Lichtes, d. h. dass weißes Licht beim Durchgang durch ein Glasprisma in die verschiedenen Spektralfarben aufgespalten wird. Aufgrund seiner Ergebnisse schloss er irrtümlicherweise, dass sich Farbfehler bei opti-

schen Instrumenten mit Glaslinsen nicht beheben lassen. Er konstruierte deshalb ein Teleskop, das mit der Abbildung von Hohlspiegeln arbeitet und somit keine Farbfehler aufweist (Abb. 2; siehe auch Konstruktion und Strahlengang von Spiegelteleskopen z. B. in <http://de.wikipedia.org/wiki/Newton-Teleskop> oder *Bergmann, L. / Schäfer, C. 1993, 177*). In der modernen Astronomie werden solche Spiegelteleskope vielfach eingesetzt. Zur Steigerung ihres Auflösungsvermögens und der Lichtsammelleistung betragen ihre Durchmesser heute bis zu 12 Meter. Mit ihnen ist es möglich, ganze Galaxiehaufen und deren Strukturen in der Tiefe des Universums bis zu mehreren Milliarden Lichtjahren sichtbar zu machen.

Neben der Entwicklung von Teleskopen mit möglichst hoher Auflösung stellt die Bestimmung der Entfernungen astronomischer Objekte eine weitere enorme Herausforderung der Astronomie dar. Bereits in der Antike wurde versucht, astronomische Entfernungen zu bestimmen. Doch damals gelang es lediglich, den Erddurchmesser und den Abstand Erde-Mond größenordnungsmäßig halbwegs richtig zu bestimmen. Genaue Messungen von Entfernungen wurden erst aufgrund der mit Teleskopen verfeinerten Messtechniken möglich. Die hierbei ermittelten Distanzen sind so riesenhaft groß, dass in der Astronomie neue Längeneinheiten eingeführt werden mussten.

Für Entfernungen innerhalb des Sonnensystems wurde die Längeneinheit 1 Astronomische Einheit (Abkürzung 1 AE) definiert (Abb. 3). Sie entspricht in guter Näherung der großen Halbachse der Umlaufbahn der Erde um die Sonne ($1 \text{ AE} = 1,49597870691 \cdot 10^8 \text{ m}$, d. i. 149,59787 Millionen Kilometer).

Für Entfernungen im zwischengalaktischen Raum wurde die Längeneinheit 1 Parallaxensekunde (Abkürzung 1 Parsec = 1 pc) eingeführt (Abb. 3). Ein Parsec ist die Entfernung, von der aus die astronomische Einheit, d. h. also der mittlere Abstand Erde-Sonne unter einem Winkel von einer Bogensekunde ($1'' = 1/3600^\circ$) erscheint. Die Länge 1 pc entspricht somit $3,08567758130573 \cdot 10^{16} \text{ m}$, das sind ca. 31 Billionen Kilometer oder ca. 3,26 Lichtjahre, wobei 1 Lj die Strecke ist, die Licht in einem Jahr im Vakuum zurücklegt. (Die Maßeinheit 1 Lj = $9,5 \cdot 10^{12} \text{ km}$ ist im Internationalen Einheitensystem seit 1978 nicht mehr zulässig, wird aber in der Astronomie weiterhin verwendet).

Zur Entfernungsmessung sonnennaher Sterne wird die so genannte Methode der Parallaxe eingesetzt (Abb. 4). Als Basislinie dient der Erdbahndurchmesser. Mit Hilfe dieser Basislinie und des zu messenden Parallaxenwinkels p ist der Abstand s des Sternes von der Basislinie leicht zu berechnen.

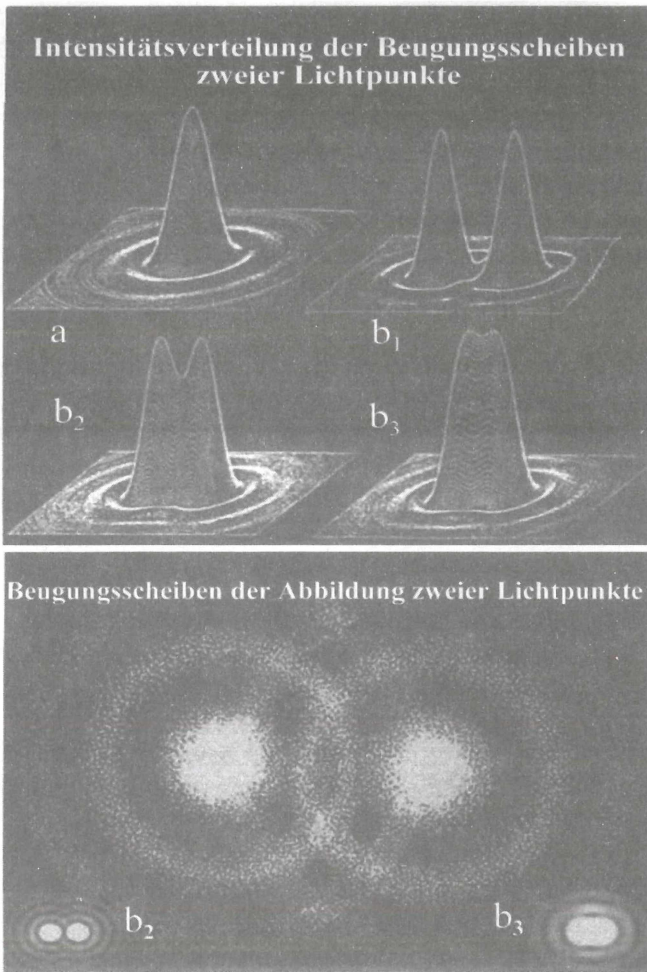


Abb. 1: Optisches Auflösungsvermögen von Punktlichtquellen

Wegen der Wellennatur des Lichtes ist die Helligkeitsverteilung der Abbildung eines Lichtpunktes durch optische Instrumente (z. B. Auge, Teleskop, Mikroskop) nicht punktförmig. Es entsteht vielmehr stets eine Beugungsscheibe (a), deren Breite um so schmaler ist, je größer der Durchmesser der Öffnung des abbildenden Systems gewählt wird. Zwei Lichtpunkte werden beim Abbilden nur dann aufgelöst, wenn ihr Abstand so groß ist, dass sich die Maxima ihrer Beugungsscheiben nicht (b₁) oder nur so weit überlappen, dass die Einsenkung zwischen den beiden Maxima nicht weniger als 15% ihrer maximalen Helligkeit beträgt (b₂). Im Falle (b₃) können die beiden Lichtpunkte nicht mehr als getrennte Punkte wahrgenommen werden (vgl. z.B. <http://www.greiergreiner.at/hc/aufloesung.htm>).

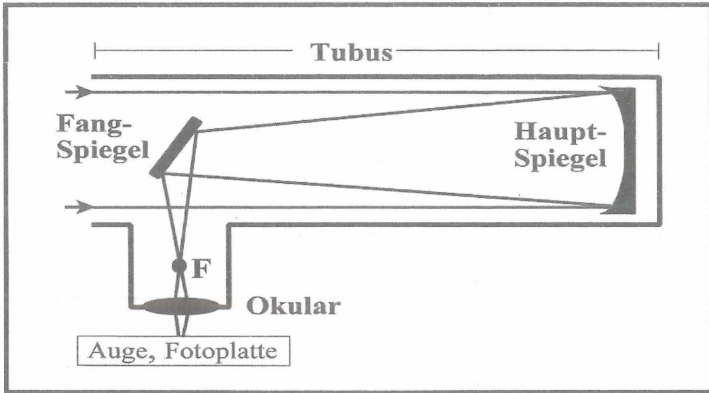


Abb. 2: Newtonsches Spiegel-Teleskop:
Prinzipieller Aufbau mit optischem Strahlengang

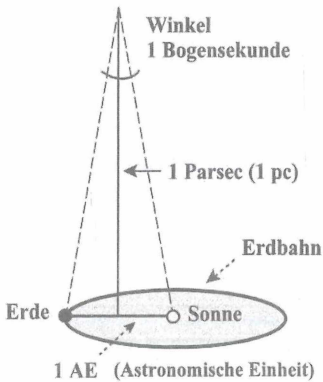


Abb. 3: Zur Definition der Längeneinheiten "Astronomische Einheit" und "Parallaxensekunde" (abgekürzt Parsec):

1 Astronomische Einheit (1 AE) entspricht $1,495\,978\,706\,91 \cdot 10^8$ km, das sind ca. 149 Millionen Kilometer oder 8,31 Lichtminuten.

1 Parsec (1 pc) entspricht $3,085\,677\,581\,305\,73 \cdot 10^{13}$ km, das sind ca. 31 Billionen Kilometer oder 3,26 Lichtjahre.

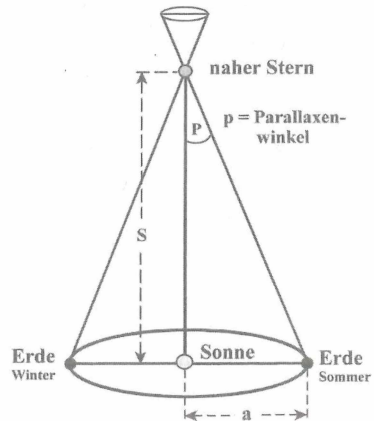


Abb. 4: Bestimmung der Entfernung sonnennaher Sterne mit Hilfe der Parallaxenmethode:

Der Abstand s eines Sternes lässt sich aus dem Erdbahndurchmessers $2a$ und dem gemessenen Parallaxenwinkels p mittels der Gleichung $s = a \cdot \text{tg } p$ berechnen.

Die Entfernungen zu den Sternen, die wir mit bloßem Auge am Himmel sehen, liegen etwa alle zwischen 1 pc und 1000 pc. Unser Milchstraßensystem hat einen Durchmesser von etwa 30 kpc. Die uns am nächsten benachbarte Galaxie, der Andromedanebel, ist bereits 800 kpc, d. h. 2,6 Millionen Lichtjahre entfernt. Es ist klar, dass hier die Entfernungsmessung mit Hilfe der Parallaxenmethode völlig versagt. Denn bei diesen Entfernungen beträgt der Parallaxenwinkel bereits weniger als ein Millionstel Bogensekunde, und das ist nicht mehr messbar. Für solche und noch größere Entfernungen müssen daher andere, nämlich indirekte Methoden der Entfernungsmessung herangezogen werden.

Eine dieser Methoden macht davon Gebrauch, dass die Helligkeit einer punktförmigen Lichtquelle mit dem Quadrat ihrer Entfernung vom Beobachter abnimmt. Es gibt nun eine Reihe von Sternen, deren Helligkeit man aufgrund verschiedener physikalischer Gesetzmäßigkeiten kennt bzw. abzuschätzen weiß. Zu solchen Objekten gehören bestimmte Sternarten wie z. B. Cepheiden, Supernovae der Klasse I A, wie auch Galaxiekern und Quasare.

Bei der Bestimmung astronomischer Entfernungen spielen vor allem die Cepheiden eine dominierende Rolle. Cepheiden sind eine Klasse von veränderlichen Sternen besonders hoher Leuchtkraft, deren Helligkeit sich streng periodisch verändert (*Hoffmeister, C. / Richter, G. / Wenzel, W. 1990*). Zwischen der Periode der Helligkeitsschwankungen dieser Sterne und ihrer absoluten Helligkeit besteht eine feste Beziehung. Aus dem Unterschied zwischen der absoluten und der gemessenen scheinbaren Helligkeit kann somit der Abstand eines Cepheiden vom Beobachter berechnet werden. Hat man in den Tiefen des Weltalls in einer neu entdeckten Galaxie einen Cepheiden festgestellt, so braucht man nur die Periode seiner Leuchtkraftschwankungen messen, um auf seine absolute Helligkeit zu schließen. Aus dieser und seiner ebenfalls gemessenen scheinbaren Helligkeit wird dann seine Entfernung berechnet. Fast alle ermittelten astronomischen Entfernungen von Galaxien beruhen auf Cepheidenmessungen. Mit Hilfe des lichtstarken Hubble-Space-Teleskops können in immer weiter entfernten Galaxien nun auch erheblich schwächere Cepheiden noch wahrgenommen werden. Damit wurde der uns von der Erde aus zugängliche Beobachtungsradius von zunächst nur ca. 4 Mpc auf mehr als 20 Mpc (d.h. ca. 65 Milliarden Lichtjahre) erweitert.

Ähnlich nimmt man an, dass bei Supernova-Sternexplosionen im wesentlichen immer die gleiche Energie frei wird, sodass man mit Hilfe des $1/r^2$ -Gesetzes aus der beobachteten scheinbaren Helligkeit einer Supernova auf ihren Abstand zum Beobachter schließen kann.

Optische Teleskope öffnen zwar ein wichtiges, aber dennoch nur ein sehr schmales Fenster im elektromagnetischen Spektrum zur Beobachtung des Weltraums. Der Einsatz von Radioteleskopen, Infrarot-Teleskopen, Röntgen-Teleskopen, insbesondere aber auch von Teleskopen, die auf Erdumlaufbahnen stationiert sind, wie z. B. das Hubble-Weltraum-Teleskop (*Lindberg Christensen, L. 2000*), sowie Raumsonden haben uns eine Flut neuer Informationen über den Weltraum geliefert. Mit Hilfe dieser Instrumente wurden die Existenz nicht nur neuer Galaxien, sondern ganzer Galaxiehäufen entdeckt. Der gegenwärtig mit den größten Radio- und Spiegelteleskopen zugängliche Teil des Weltalls hat einen Radius von mehr als 10 Milliarden Parsec (das sind über 30 Milliarden Lichtjahre). In diesem Bereich befinden sich schätzungsweise 100 Milliarden Galaxien, die teilweise sehr viel größer sind als unser Milchstraßensystem. (Umfangreiches astronomisches Bildmaterial in Farbe sowie Kommentare zu den einzelnen Aufnahmen finden sich z. B. unter <http://deepsky.astronomie.info/objects.de.php> oder <http://www.mpe.mpg.de> oder <http://hubblesite.org/gallery>).

Unser Weltall ist zeitlich keineswegs statisch. Sterne entstehen aus dem Kollaps genügend großer und massereicher Gaswolken. Sie durchlaufen diverse Entwicklungsstadien, die - je nach Masse - einige Millionen Jahre bis über 10 Milliarden Jahre dauern können. Je nach Ausgangsmasse enden sie dann als weiße Zwerge, als Neutronensterne oder als Schwarze Löcher.

Bei der Spektralanalyse des Sternenlichtes von Galaxien wurde anfangs des 20. Jahrhunderts von einer Reihe von amerikanischen Astronomen beobachtet, dass die Spektren extragalaktischer Sternsysteme eine starke Rotverschiebung der Spektrallinien aufweisen. Edwin P. Hubble (1889 - 1953) stellte nun fest, dass zwischen den Entfernungen der Galaxien und ihrer Rotverschiebung eine grobe Proportionalität besteht. Je größer die Entfernung zweier Sternsysteme ist, desto größer ist auch ihre Rotverschiebung. Deutet man diese Rotverschiebung als Dopplereffekt, so ist daraus zu schließen, dass die Sternsysteme eine von uns weggerichtete Fluchtbewegung ausführen, d. h. je größer die Entfernung zweier Galaxien ist, desto größer ist auch ihre relative Fluchtgeschwindigkeit. Es gilt das Hubblesche Gesetz: Expansionsgeschwindigkeit v des Universums = Hubblekonstante H mal Abstand d der Galaxie vom Beobachter. Wir haben es also nicht mit einem räumlich statischen sondern mit einem expandierenden Universum zu tun. Die logische Schlussfolgerung daraus ist: Wenn sich alle galaktischen Objekte voneinander wegbewegen, dann müssen sie sämtlich alle einmal in einem Punkt konzentriert gewesen sein. Damit war die Theorie des Urknalls geboren. Mit

Hilfe der am weitesten von uns weg gelegenen Galaxien lässt sich errechnen, dass der Urknall vor ca. 13 Milliarden Jahren stattgefunden haben muss (Kippenhahn, R. 1989).

Es wurde bereits erwähnt, dass das Weltsystem einer Gesellschaft den Stand ihrer naturwissenschaftlichen Erkenntnis und die Leistungsfähigkeit ihrer Technik widerspiegelt. Auch unser heutiges Weltbild spiegelt den Stand unserer naturwissenschaftlichen Erkenntnis und Technik wider: Das zur Zeit weitgehend akzeptierte Urknallmodell stellt den Versuch dar, die auf dem Planeten Erde gefundenen physikalischen Gesetze sowie das aufgrund astronomischer und astrophysikalischer Beobachtungen gewonnene Datenmaterial (siehe Tabelle 1) möglichst widerspruchsfrei im Rahmen einer einheitlichen Theorie zu beschreiben. Das heute von den Astronomen allgemein anerkannte Standardmodell der Kosmologie ist das Urknallmodell, das viele der beobachteten Phänomene zufriedenstellend beschreibt. Wie die Vergangenheit gezeigt hat, können solche Theorien immer nur vorläufig sein. Neue astronomische Entdeckungen, Fortschritte in der Physik sowie exaktere Messtechniken können schnell dazu führen, dass unsere heutige Vorstellung vom Weltraum in wesentlichen Punkten abgeändert werden muss oder dass das - momentan akzeptierte - Urknallmodell gar durch ein völlig neues kosmologisches Modell zu ersetzen ist.

Vermutete Daten unseres Universums	
Durchmesser	46 Mrd. Lichtjahre
Alter	13,77 Mrd. Lichtjahre
Masse	$8,5 \cdot 10^{52} - 10^{53}$ kg
Anzahl an Galaxien	ca. 100 Mrd.
Anzahl der Teilchen	$4 \cdot 10^{78} - 6 \cdot 10^{79}$
Anfangstemperatur	$1,41679 \cdot 10^{32}$ K
Heutige Temperatur	2,7 K (-270,45 °C)
Mittlere Dichte	$10^{-27} - 5 \cdot 10^{-27}$ kg/m ³
Kritische Dichte	$9,7 \cdot 10^{-26}$ kg/m ³
Hubble-Konstante	ca. 71 (+/- 6) km/(s · Mpc)
<p>Tabelle 1: Würde das Universum nicht expandieren, so entspräche der Radius des beobachtbaren Bereichs des Universums aufgrund der endlichen Lichtgeschwindigkeit genau dem Alter des Universums, mäße also 13,7 Milliarden Lichtjahre. Da das Universum aber beschleunigt expandiert, hat sein Volumen mittlerweile einen Radius von 46 Milliarden Lichtjahren erreicht (http://de.wikipedia.org/wiki/Universum).</p>	

4. Eroberung des Mikrokosmos

Astronomie und Astrophysik haben dem Menschen einen Makrokosmos erschlossen, dessen räumliche Ausdehnung um mehr als 100 Trillionen mal größer ist (Faktor 10^{20}) als die Raumdimensionen des Mesokosmos, in den der Mensch hineingeboren ist (Größenordnung ca. 10^3 km). Auch die Erschließung des Mikrokosmos ist ganz entscheidend mit der Entwicklung immer leistungsfähigerer Geräte und Apparaturen mit immer höherem Auflösungsvermögen verbunden. Das unbewaffnete Auge hat ein Auflösungsvermögen von etwa 1 Bogenminute, d. h. zwei Punkte im Abstand von 0,1 mm können aus einer Entfernung von 35 cm gerade noch als getrennte Punkte wahrgenommen werden. Die kleinsten, ohne Instrumente noch auflösbaren Raumdimensionen im Mesokosmos liegen somit im Bereich von einem Zehntel Millimeter. Mit den höchstaflösenden Geräten dringt man heute jedoch in Raumdimensionen vor, die im Bereich von Nanometern, d.h. im Bereich von Atomdurchmessern liegen, wobei die Länge 1 Nanometer den milliardsten Teil eines Millimeters bedeutet ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).

4.1 Erschließung mikroskopischer Raumdimensionen mit Hilfe optischer Geräte

Das einfachste optische Instrument, das dazu dient, die Sehleistung des Menschen im Bereich des Mikroskopischen zu erhöhen, ist die uns allen bekannte Lupe. Lupen werden bis zu einer 25-fachen Vergrößerung hergestellt, d.h. es können damit noch Strukturen im $10 \mu\text{m}$ -Bereich wie z. B. Pollen, Urtierchen, Riesenbakterien, Pflanzenzellen usw. aufgelöst werden ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$).

Eine wesentlich größere Steigerung des Auflösungsvermögens erreicht man mit dem um 1600 herum erfundenen Lichtmikroskop (vgl. hierzu z. B. *Bergmann, L. / Schäfer, C. 1993, 158*). Das Lichtmikroskop ist auch heute noch eines der wichtigsten optischen Instrumente überhaupt. Es hat dem Menschen ermöglicht, winzige Objekte wahrzunehmen, zu interpretieren und zu manipulieren, die vorher unbekannt und damit auch nicht beeinflussbar waren. Die Mikroskopie hat daher einen entscheidenden Anteil an der Erweiterung unseres räumlichen Vorstellungsvermögens im Bereich unserer mikroskopischen Umwelt. Vielfältige Beweise dafür liefert die Anwendung des Mikroskops in der Medizin, der Biologie, der Mineralogie, der Metallurgie und heute auch in der technischen Manipulation von Mikroobjekten.

Ein Mikroskop besteht i.a. aus drei konvexen Glaslinsen, der Kondensorlinse, dem Objektiv und dem Okular (Abb. 5). Die Kondensorlinse sorgt für

optimale Beleuchtung des zu vergrößernden Objektes. Das Objektiv erzeugt ein vergrößertes reelles Bild, das dann mit dem Okular als Lupe betrachtet und damit nochmals vergrößert wird. Seit seiner Erfindung hat das Mikroskop zahlreiche Verbesserungen erfahren, durch die das Auflösungsvermögen immer weiter gesteigert werden konnte. Für die unterschiedlichsten Anwendungszwecke wurde eine Reihe von Sonderformen entwickelt, auf die an dieser Stelle aber nicht eingegangen werden soll.

Die Theorie für das Auflösungsvermögen des Mikroskops wurde von Ernst Abbé (1840 - 1905) bereits im Jahre 1873 entwickelt (*Bergmann, L. / Schäfer, C. 1993, 406*). Er zeigte, dass das Auflösungsvermögen eines Lichtmikroskops aufgrund der Beugung der Lichtwellen an dem zu vergrößernden Objekt ganz wesentlich von der Wellenlänge des verwendeten Lichtes abhängt. Je kürzer die Lichtwellenlänge ist, desto höher ist das Auflösungsvermögen, d. h. um so feinere Details des betrachteten Objekts können noch als getrennt wahrgenommen werden. Nach der Abbéschen Theorie werden Strukturen, die feiner sind als die halbe Wellenlänge des bei der Abbildung verwendeten Lichts, von Lichtmikroskopen nicht mehr aufgelöst. Die Grenze des Auflösungsvermögens von Lichtmikroskopen liegt somit bei Verwendung von blauem Licht (Wellenlänge $\lambda = 450 \text{ nm}$) für visuell unterscheidbare Strukturen bei etwa $200 \text{ nm} = 0.2 \text{ }\mu\text{m}$ (d. h. also bei ca. 2 Zehntausendstel eines Millimeters).

4.2 Erschließung mikroskopischer Raumdimensionen mit Hilfe des Elektronenmikroskops

Ein bedeutender Fortschritt in der Mikroskopietechnik beruht auf der Erkenntnis von Luis de Broglie (1892 - 1987), dass Elektronen nicht nur Teilchen- sondern auch Wellencharakter besitzen (*de Broglie L. 1924*). Diese Tatsache nutzten die Elektrotechniker M. Knoll (1897-1969) und E. Ruska (1906-1988) im Jahre 1935 zur Konstruktion eines Elektronenmikroskops (*Knoll M. / Ruska, E. 1932*) aus. Anstelle von Lichtbündeln wird beim Elektronenmikroskop ein in einer Vakuumapparatur hochbeschleunigter Elektronenstrahl verwendet, denn die Wellenlänge hochenergetischer Elektronen ist wesentlich kleiner als die des sichtbaren Lichtes. Zur Abbildung dienen Magnetspulen, die im Prinzip wie optische Linsen arbeiten (Abb. 5): Ganz analog zur Ablenkung von Lichtbündeln in brechenden Medien, wie z. B. Glas, werden Elektronen aufgrund ihrer elektrischen Ladung in entsprechenden linsenförmig geformten Magnetfeldern fokussiert bzw. defokussiert. Ähnlich wie beim Fernsehapparat entsteht dann das Bild des zu vergrößern-

den Objekts entweder durch Auftreffen der Elektronen auf einem fluoreszierenden Schirm, oder es wird mit Hilfe einer fotografischen Platte registriert.

Hochbeschleunigte Elektronen haben Wellenlängen, die bis zu 1000 mal kürzer sind als die bei Lichtmikroskopen verwendeten Lichtwellen. Man erreicht damit ein Auflösungsvermögen bis zu 0,2 nm. Mit diesem Auflösungsvermögen können z. B. Viren, die inneren Strukturen von Zellen, DNA-Moleküle oder auch der atomare Gitteraufbau von Kristallen sichtbar gemacht werden (Urban, K. 1990). Zur Demonstration der bemerkenswerten Unterschiede im Auflösungsvermögen von Lichtmikroskop und Elektronenmikroskop zeigt Abbildung 6 die Aufnahmen von Erythrocyten (rote Blutkörperchen).

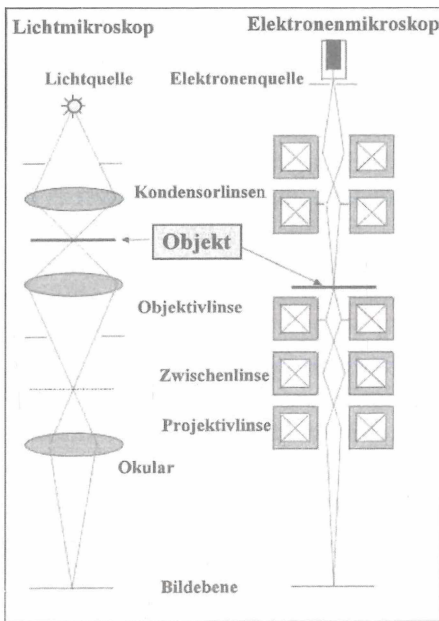
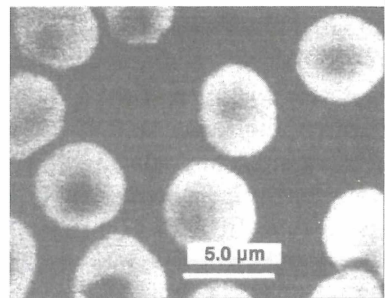
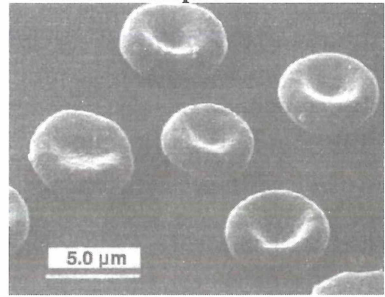


Abb. 5: Schematischer Aufbau und Strahlenverlauf im Licht- und Elektronenmikroskop



Lichtmikroskopische Aufnahme



Elektronenmikroskopische Aufnahme

Abb. 6: Lichtmikroskopische und elektronenmikroskopische Aufnahmen von Erythrocyten (rote Blutkörperchen) bei gleicher Vergrößerung (Vergrößerungsfaktor ca. 4000) zur Illustration des wesentlich höheren Auflösungsvermögens eines Elektronenmikroskops gegenüber dem Lichtmikroskop (Flegler, S. 1995)

4.3 Erschließung mikroskopischer Raumdimensionen mit Hilfe des Rastertunnelmikroskops

Eine weitere Steigerung des Auflösungsvermögens bis hin zur Auflösung von Strukturen im Bereich molekularer und atomarer Dimensionen ermöglicht das Rastertunnelmikroskop (STM). Dieses Mikroskop (Abb. 7) arbeitet nach einem ganz anderen Prinzip als das bisher beschriebene Licht- und Elektronenmikroskop:

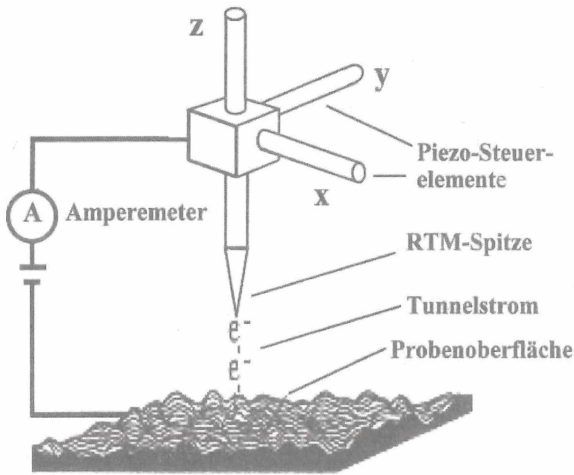


Abb. 7: Schematischer Aufbau eines Rastertunnelmikroskops (RTM).

Mit Hilfe eines Amperemeters wird der durch $e - - e$ - angedeutete Tunnelstrom gemessen. Die von einem Computer gesteuerten Piezo-Steuer-elemente bewegen die RTM-Spitze so in x-, y-, und z-Richtung, dass einerseits der Tunnelstrom (in z-Richtung) konstant bleibt und andererseits die x-y-Ebene zeilenweise abgetastet wird.

Mit einer äußerst feinen, elektrisch leitenden Nadel, deren Spitze im günstigsten Fall aus nur einem einzigen Atom besteht, tastet man die zu untersuchende Oberfläche zeilenweise ab. Mit Hilfe einer von Piezoelementen gesteuerten mechanischen Vorrichtung wird die Nadelspitze im Abstand von ca. 1 nm, (das sind 1 - 2 Atomdurchmesser) über die Fläche geführt. Liegt zwischen Nadel und einer elektrisch leitenden Fläche eine niedrige elektrische Spannung (Größenordnung 10 Volt), so fließt aufgrund eines quantenmechanischen Effekts auch ohne mechanischen Kontakt zwischen Nadel und Oberflächenatomen ein so genannter Tunnelstrom. Die Nadel wird nun mit

Hilfe der Piezosteuerelemente so gesteuert, dass der vom Abstand abhängige Tunnelstrom stets konstant ist. Das bedeutet: Bei Erhöhungen auf der Oberfläche muss sich die Nadel heben, bei Vertiefungen muss sich die Nadel absenken, damit der Tunnelstrom konstant bleibt. Mittels der in senkrechter Richtung registrierten Bewegung der Nadel erhält man so ein Profil der durch die Atome der Fläche verursachten Hebungen und Senkungen der Nadel. In dieser Weise wird die Fläche mit der Nadelspitze sukzessive zeilenweise abgetastet. Die Profile der einzelnen Zeilen werden dann per Computer zu einem Bild der Oberfläche zusammengefügt. Auf diese Weise erhält man ein detailliertes Bild der Topographie einer Fläche im Nanometerbereich. Das Auflösungsvermögen der Abbildung wird einerseits durch die Feinheit der Nadel bestimmt, andererseits dadurch, wie gut die Nadel den atomaren Strukturen der Fläche folgen kann.

Die Überwindung der außerordentlich großen experimentellen Schwierigkeiten, die einer Umsetzung dieser Ideen lange Zeit im Wege standen, gelang erstmals 1981 den Physikern Gerd Binnig und Heinrich Rohrer, die dafür 1986 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurden (*Binnig, G. / Rohrer, H. / Gerber, C. / Weibel, E. 1982*). Mit einer besonderen Technik (z. B. Gleichstromätzen eines 0,5 mm dicken Wolframdrahtes) gelangt es, Nadeln herzustellen, deren Spitze im Extremfall aus nur einem einzigen Atom besteht. Mit solchen Nadeln beträgt das Auflösungsvermögen beim Rastertunnelmikroskop in waagerechter Richtung ca. 0,2 nm und in senkrechter Richtung ca. 0,01 nm! Atomdurchmesser liegen in der Größenordnung von 0,1 nm, d. h. das Auflösungsvermögen des Rastertunnelmikroskop ermöglicht es, die Struktur einzelner Atome und Moleküle abzutasten. Man ist damit also in der Lage, feinste Details von atomaren Strukturen zu untersuchen (Abb. 8). Scangeschwindigkeiten liegen zur Zeit typischerweise zwischen 0,5 und 10 Hz. Das bedeutet, dass pro Sekunde eine Zeile hin und wieder zurück abgetastet wird. Bei einer Bildauflösung von 250 × 250 Bildpunkten bis hin zu 500 × 500 Bildpunkten ergibt sich somit eine Messdauer von ca. 1 Minute bis hin zu 20 Minuten pro Abbildung.

Für spezielle Anwendungsgebiete hat die dem Rastertunnelmikroskop zugrunde liegende Idee zur Entwicklung einer ganzen Reihe weiterer Raster-sondenmikroskope geführt, wie z. B. dem Rasterkraftmikroskop, dem Magnetkraftmikroskop, dem optischen Rasternahfeldmikroskop und dem Rasterelektronenmikroskop. Das Rasterkraftmikroskop funktioniert ganz ähnlich wie das Rastertunnelmikroskop (*Binnig, G. / Quate, C.F. / Gerber, C. 1986*). Mit ihm wird die Kraft gemessen, die zwischen einer an einer Blattfeder

befestigten Spitze und den Atomen einer Oberfläche wirkt (van-der-Waals-Wechselwirkung). Mit Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskopen ist es sogar möglich, einzelne Atome zu manipulieren, sie z. B. von einer Kupferoberfläche aufzuheben und an einem anderen Ort der Oberfläche wieder niederzusetzen (Abb. 8).

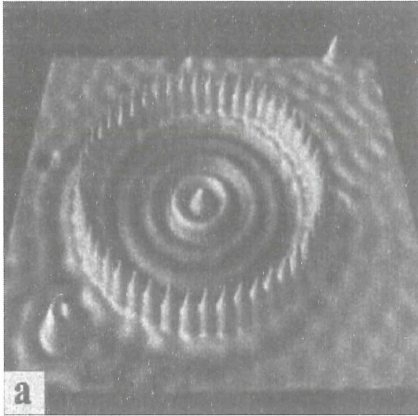


Abb. 8: (a) Rastertunnelmikroskopaufnahme (STM) eines kreisförmigen "Pferchs" auf einer Kupferplatte bestehend aus 48 Eisenatomen (Durchmesser 14 nm). Die Kreise im Inneren des Pferchs zeigen stehende Wellen, erzeugt durch elektronische Oberflächenzustände. Sie geben die quantenmechanische Aufenthaltswahrscheinlichkeit der eingeschlossenen Elektronen an (Crommie, F. et. al. 1993).

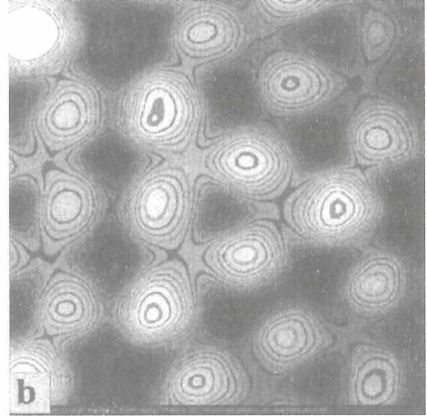


Abb. 8: (b) Rasterkraftmikroskopaufnahme (AFM), hergestellt mit einer einkristallinen Siliziumspitze. Das Bild zeigt die Atome einer Siliziumoberfläche (3,3 nm x 3,3 nm) in subatomarer Auflösung (Herz, M. et. al. 2003).

Die bildliche Darstellung des Nanoraumes eröffnet im Rahmen der Grundlagenforschung völlig neue Perspektiven. Beispielsweise lassen sich nun die Strukturen biologischer Makromoleküle (z. B. DNA-Moleküle) auf atomarer Ebene dreidimensional sichtbar machen und sehr detailliert untersuchen. Darüber hinaus kann nun auch der zeitliche Verlauf von oberflächenkatalytischen Prozessen in der chemischen Verfahrenstechnik verfolgt werden. Ebenso ist es möglich, in der Mikroelektronik die Leistungsfähigkeit von Miniaturisierungsverfahren auf atomarer Ebene zu überprüfen.

Im Bereich der praktischen Anwendung hat diese Entwicklung zu der sehr zukunftssträchtigen Nanotechnologie geführt (vgl. z. B. Wiesendanger, R.

1994). Eines ihrer Ziele ist die weitere Miniaturisierung der Halbleiterelektronik sowie die industrielle Erzeugung neuartiger Werkstoffe, wie z. B. die der Nanoröhrchen. Eine für das Alltagsleben höchst willkommene Anwendung ist etwa der Lotuseffekt, der selbstreinigende Oberflächen, beschlagfreie Spiegel etc. ermöglicht. In der Medizin dienen Nanopartikel als Kontrastmittel für bildgebende Verfahren im Bereich der Computer- und der Magnetresonanztomographie. Ebenso sind nanotechnologisch hergestellte Lebensmittelzusatzstoffe heute bereits im Einsatz. Auch die Herstellung von Apparaturen mit atomaren Abmessungen ist bereits verwirklicht, so z. B. ein Nano-Motor (Brouwer, A.M. et al. 2001), eine Molekulare Pumpe (Drexler, K.E. 1999), ein Einzelmolekül-Nanoauto (Morin, J.F. et al. 2006). Die rasanten Fortschritte, die zur Zeit in der Nanotechnologie gemacht werden, sowie ihre zukünftigen Möglichkeiten in Wissenschaft und Technik stellen eine der faszinierendsten Entwicklungen unserer Gegenwart dar.

5. Zusammenfassung

Die vom Menschen mit Hilfe seiner fünf Sinne erfassbaren Raumdimensionen sind vergleichsweise beschränkt. In Hinblick auf den Mikrokosmos hört sein räumliches Wahrnehmungsvermögen bereits bei einem Zwanzigstel eines Millimeters auf. Daher konnten in der Vergangenheit seine ins Mikroskopische gehenden Raumvorstellungen bestenfalls spekulativ sein. Ohne Hilfsmittel liegt der dem Menschen zugängliche Bereich makroskopischer Raumdimensionen allenfalls im Bereich von wenigen tausend Kilometern und verliert sich dann in den für ihn unzugänglichen Weiten des Alls. Mit bloßem Auge kann er schon die Entfernungen von Mond, Planeten und Sonne bestenfalls nur größenordnungsmäßig richtig abschätzen. Unter Zuhilfenahme seiner naturwissenschaftlichen Kenntnisse und der damit verbundenen Techniken ist es ihm aber gelungen, die Spannweite der für ihn überblickbaren physikalischen Raumdimensionen dramatisch zu erweitern. Die in Physik und Astronomie heute von uns überschaubaren Raumdimensionen vom Mikrokosmos bis zum Makrokosmos überstreichen eine Skala von über 37 Zehnerpotenzen! Die Größenordnung von 37 Zehnerpotenzen (d. i. 10^{37}) entspricht dem ungeheuer großen Faktor von zehn Sextillionen. Zur Veranschaulichung einer dermaßen unvorstellbar großen Zahl nehme man an, man hätte einen Sandhaufen mit zehn Sextillionen Sandkörnern mit je einem Durchmesser von 0,2 mm. Würde sich dieser Sand gleichmäßig auf der Erdoberfläche ablagern, so gäbe dies eine Sandschicht mit einer Dicke, in der der Mond verschwinden würde.

6. Literatur

- BROUWER, A.M. et al. (2001): Operation of a fast, photochemically powered Molecular Motor. – In: Science 291, 2124-2128.
- BERGMANN, L. / SCHÄFER, C. (1993): Optik. – In: H. Niedrig (Hg.), Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 3. Walter de Gruyter. Berlin/New York.
- BINNIG, G. / ROHRER, H. / GERBER, C. / WEIBEL, E. (1982): Surface studies by scanning tunneling microscopy. – In: Phys. Rev. Lett. 49/1, 57–61.
- BINNIG, G. / QUATE, C.F. / GERBER, C. (1986): Atomic force microscope. – In: Phys. Rev. Lett. 56, 930-933.
- CROMMIE, M.F. / LUTZ, C.P. / EIGLER, D.M. (1993): Confinement of electrons to quantum corrals on a metal surface. – In: Science 262, 218-220.
- DE BROGLIE, L. (1924): Recherches sur la théorie des quanta. – Diss. Paris.
- FLEGLER, S. et. al. (1995): Elektronenmikroskopie. – Spektrum. Heidelberg.
- HOFFMEISTER, C. / RICHTER, G. / WENZEL, W. (1990): Veränderliche Sterne. – J.A.Barth Verlag. Leipzig.
- KIPPENHAHN, R. (1989): Licht vom Rande der Welt: Das Universum und sein Anfang. – Piper Verlag. München.
- KLINGER, W. (2005): Hierarchische Strukturen im Bereich der Physik. – In: H. Heller (Hg.), Hierarchie, Matreier Gespräche 2003. Lit-Verlag. Wien, 23-40.
- MORIN, J.-F. / SHIRAI, Y. / TOUR, J. M. (2006): En Route to a Motorized Nanocar. – Org. Lett. (Letter) 8, 1713-1716.
- PIAGET, J. (1975): Gesammelte Werke. – Studienausgabe, Ernst-Klett-Verlag. Stuttgart.
- SIMONYI, K. (1990): Kulturgeschichte der Physik. – Harri Deutsch. Frankfurt a.M.
- KNOLL, M. / RUSKA, E. (1932): Das Elektronenmikroskop. – In: Zeitschrift für Physik 78, 318-339.
- LINDBERG CHRISTENSEN, L. (2000): Hubble-Weltraumteleskop – 10 Jahre, die unsere Welt verändert haben. – Hg. von European Space Agency (ESA) Publications Division, ESTEC, PO Box 299, 2200 AG Noordwijk, Niederlande; zahlreiche Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops siehe auch <http://hubble.esa.int> .

- URBAN, K. (1990): Hochauflösende Elektronenmikroskopie. – In: Physikalische Blätter 46, 77.
- WIESENDANGER, R (1994): Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy - Methods and Applications. – Cambridge University Press. Cambridge.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Matreier Gespräche - Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Wilheminenberg](#)

Jahr/Year: 2005

Band/Volume: [2005](#)

Autor(en)/Author(s): Klinger Walter

Artikel/Article: [Von Parsec- und Nanoräumen Die Spannweite der Raumdimensionen in der Physik 358-378](#)