

Das Mikroskop (17. Jh.)

Der wunde Punkt in der Harveyschen Theorie des Blutkreislaufs war der fehlende Nachweis, dass Arterien und Venen wirklich verbunden sind. Harvey konnte nur annehmen, dass die Verbindung existiert, aber wegen ihrer Winzigkeit vom Auge nicht wahrgenommen werden konnte. Auch zum Zeitpunkt seines Todes war die Frage noch unentschieden, und es wäre wohl für alle Zeiten so geblieben, wenn die Menschheit sich auf ihre unbewaffneten Augen hätte verlassen müssen.

Die alten Griechen hatten bereits erkannt, dass gekrümmte Spiegel und mit Wasser gefüllte hohle Glaskugeln Vergrößerungseffekte bewirken. In den ersten Jahrzehnten des siebzehnten Jahrhunderts fing man an, mit Linsen zu experimentieren, um die Vergrößerung soweit wie möglich zu erhöhen. Inspiriert wurde man dazu durch den großen Erfolg des Fernrohrs, das Galileo Galilei zuerst 1609 in der Astronomie angewandt hatte.

Allmählich kamen Vergrößerungsinstrumente oder Mikroskope (nach dem Griechischen: „das Kleine betrachten“) in Gebrauch. Zum ersten Mal wurde die biologische Wissenschaft durch ein Instrument auf eine breite Basis gestellt und beträchtlich an Umfang vermehrt. Dieses Instrument gestattete dem menschlichen Auge, die ihm gesetzten Grenzen zu überwinden. Es ermöglichte den Naturforschern, kleine Lebewesen mit einer sonst unmöglichen Genauigkeit zu beschreiben, und den Anatomen, Strukturen zu finden, die mit dem bloßen Auge nicht sichtbar waren.

Der **holländische Naturforscher Jan Swammerdam (1637 - 80) verwandte seine Zeit auf die mikroskopische Beobachtung von Insekten** und fertigte von jeder winzigen Einzelheit ihrer Anatomie wundervolle Zeichnungen an. Er entdeckte auch, dass das Blut nicht einheitlich rot gefärbt war, wie es dem Auge erschien, sondern dass es unzählige winzige Körper enthielt, die ihm ihre Farbe gaben. (Wir kennen heute diese Körper als **rote Blutkörperchen**.)

Der englische **Botaniker Nehemiah Grew (1641 - 1712) untersuchte Pflanzen unter dem Mikroskop, insbesondere ihre Fortpflanzungsorgane**. Er beschrieb die ihnen zugehörigen und von ihnen erzeugten Pollenkörner. Ein holländischer Anatom, **Regnier de Graaf (1641 - 73)** stellte ähnliche Untersuchungen bei Tieren an. Er studierte die **Feinstruktur der Hoden und Eierstöcke**. Insbesondere beschrieb er gewisse kleine Strukturen des Eierstocks, die noch heute „Graafsche Follikel“ genannt werden.

Dramatischer als alle diese Entdeckungen war die des italienischen Physiologen Marcello Malpighi (1628 - 94). Auch er untersuchte Pflanzen und Insekten. Aber schon früh widmete er sich unter anderem der Erforschung der Lunge des Frosches. Hier fand er ein Gewirr von Blutgefäßen, die zu klein waren, um einzeln sichtbar zu sein und die in allen möglichen Richtungen untereinander verbunden waren. Als er diese kleinen Blutgefäße weiter zurück bis zur Einmündung in größere verfolgte, fand er heraus, dass es sich bei letzteren um Venen (in der einen) und um Arterien (in der anderen Richtung) handelte.

Arterien und Venen waren also wirklich durch eine Menge verzweigter Blutgefäße miteinander verbunden, die wegen ihrer Feinheit vom Auge nicht wahrgenommen werden konnten. Das aber hatte **Harvey** gerade vermutet. Diese mikroskopisch kleinen Gefäße wurden „**Kapillargefäße**“ genannt (aus dem Lateinischen, das übersetzt „haarähnlich“ heißt, obgleich sie tatsächlich viel feiner als Haare sind). Die Entdeckung wurde im Jahre 1660 bekannt, drei Jahre nach Harveys Tod. Sie vervollständigte die Theorie des Blutkreislaufs.

Aber auch Malpighi brachte die Mikroskopie nicht entscheidend voran. Das geschah durch den holländischen Kaufmann **Anton van Leeuwenhoek (1632 -1723)**, für den die Mikroskopie nur ein Hobby war.

Die ersten Benutzer des Mikroskops, einschließlich Malpighi, hatten völlig richtig Linsensysteme benutzt, die eine stärkere Vergrößerung als eine einzelne Linse hervorbringen konnten. Die von ihnen benutzten Linsen waren jedoch unvollkommen. Sie besaßen auf

der Oberfläche Unebenheiten und im Inneren Blasen. Versuchte man eine zu starke Vergrößerung, dann erschienen die Einzelheiten verschwommen.

Van Leeuwenhoek benutzte dagegen einzelne Linsen, die nur so groß waren, dass sie aus kleinen blasenfreien Stückchen Glases hergestellt werden konnten. Er schliiff diese solange mit peinlicher Genauigkeit, bis er klare Bilder in bis zu 200 facher Vergrößerung erhielt. Die Linsen waren in einigen Fällen nicht größer als ein Stecknadelkopf, reichten aber für seine Zwecke vollkommen aus.

Er sah sich alles durch seine Linsen an und konnte die roten Blutkörperchen und die Kapillargefäße mit mehr Einzelheiten und größerer Genauigkeit beschreiben, als es die ursprünglichen Entdecker Swammerdam und Malpighi gekonnt hatten. Van Leeuwenhoek sah, wie sich Blut durch die Kapillaren im Schwanz einer Kaulquappe bewegte, so dass er die Harveyschen Theorie bestätigen konnte. Einer seiner Assistenten sah die Spermatozoen, die winzigen, einer Kaulquappe ähnlichen Körper im männlichen Samen.

Am aufsehenerregendsten war jedoch die Entdeckung, die er bei der Betrachtung von stehendem Wasser durch seine Linsen machte. Er sah winzige Gebilde, die dem bloßen Auge verborgen blieben, die aber mit allen Anzeichen des Lebens ausgestattet waren. Diese „Animalcules“ (wie er sie nannte) sind heute als „**Protozoen**“ bekannt. Das Wort stammt aus dem Griechischen und bedeutet „**Urtiere**“. Es wurde somit deutlich, dass nicht nur Gegenstände, sondern auch Lebewesen von solcher Winzigkeit existierten, die mit dem nackten Auge nicht wahrgenommen werden konnten. Ein weites und neues biologisches Gebiet eröffnete sich hier vor den erstaunten Augen der Menschen. **Das war die Geburtsstunde der Mikrobiologie (Untersuchung mikroskopisch kleiner Organismen).**

Im Jahre 1683 erblickte Van Leeuwenhoek kaum sichtbare Lebewesen, die noch erheblich kleiner als die Protozoen waren. Seine Beschreibungen sind notwendigerweise undeutlich. Aber es erscheint ganz sicher, dass sein Auge als erstes in der Geschichte das sah, was später unter dem Namen „**Bakterien**“ bekannt werden sollte.

Die einzige andere Entdeckung dieser Epoche, die in ihrer Bedeutung an die von Van Leeuwenhoek heranreicht, wenigstens was ihre Auswirkungen anbetrifft, war die des **englischen Wissenschaftlers Robert Hooke (1635 -1703)**. Er war von dem Mikroskop fasziniert, und seine Untersuchungen zählen zu den besten der frühen Arbeiten. Im Jahre 1665 veröffentlichte er ein Buch mit dem Titel „Micrographia“, das einige der hervorragendsten Zeichnungen mikroskopischer Beobachtungen enthält, die jemals angefertigt worden sind. Die bedeutendste Einzelbeobachtung war die einer dünnen Korkscheibe. Wie Hooke bemerkte, bestand diese aus winzigen rechteckigen Kammern. Er nannte sie „Zellen“ (ein geläufiger Ausdruck für kleine Räume). In späteren Jahre sollte diese Entdeckung weittragende Konsequenzen haben.

Während des achtzehnten Jahrhunderts führte die Mikroskopie ein Schattendasein, hauptsächlich deshalb, weil das Instrument die Grenze seiner Wirksamkeit erreicht hatte. Erst im Jahre 1773, fast hundert Jahre nach Van Leeuwenhoeks erster Beobachtung, gelang es dem dänischen Mikrobiologen Otto Friederich Müller (1730 - 84), die Bakterien so gut zu erkennen, dass er Gestalt und Form der verschiedenen Typen beschreiben konnte. Die ersten Mikroskope hatten u. a. den Fehler, dass ihre Linsen das weiße Licht in Regenbogenfarben zerlegten. Kleine Objekte waren von Farbringen umgeben („chromatische Aberration“), die ein Erkennen kleinster Einzelheiten unmöglich machten. Erst um das Jahr 1820 war man in der Lage, „achromatische Mikroskope“ zu bauen, die bei der Beobachtung solche Farbringe nicht aufwiesen.

Quelle: Asimov: "Geschichte der Biologie", G. Fischer

Sehen - Begreifen - Verändern

Eine kleine Geschichte der Mikroskopie

Christof Dejung

Durch die Mikroskopie wurde der Mikrokosmos entdeckt und beherrschbar. Immer neue Innovationen ermöglichten Einblick in immer kleinere Welten. Der historische Rückblick zeigt jedoch, dass sich technische Neuerungen nicht automatisch durchsetzten, sondern zuerst in der Forschungsgemeinschaft um Akzeptanz ringen mussten.

Die ersten Lichtmikroskope kamen Ende des 16. Jahrhunderts auf. Sie wurden nur selten zu planmässiger Forschung eingesetzt und dienten in erster Linie der Unterhaltung. Man mikroskopierte alles, was einem in die Finger kam - meist Flöhe, die in der damaligen Gesellschaft nicht zur Mangelware zählten.

Einer der ersten, der die mikroskopierte Objekte exakt beschrieb und aufzeichnete, war der holländische Tuchhändler Antonie van Leeuwenhoek. Ihm wurde bald klar, dass das Instrument mehr bot als nur «allerley ergötzliches». Im Jahre 1683 machte er in einem seiner regelmässigen wissenschaftlichen Briefe an die Royal Society of London eine verblüffende Bemerkung. Er erklärte, in seinem Mund gebe es mehr Lebewesen als Menschen in den Niederlanden. Dabei bezog er sich dabei auf die zahllosen «Animalcula», die er gesehen hatte, als er Proben von seinem Zahnbelag unter seinem handgebauten Lichtmikroskop untersuchte. Solche «kleinen Tierchen» fanden sich auch in anderen Proben - etwa in einem Tropfen Teichwasser oder in einer Prise Erdreich. Leeuwenhoek sah damit als erster Mensch jene Lebewesen, die wir heute als Bakterien bezeichnen.

Kein Botaniker mehr ohne Mikroskop

Die von Leeuwenhoek gemachten Entdeckungen konnten erst über hundert Jahre später in ein wissenschaftliches Denkgebäude integriert werden. Vor dem 19. Jahrhundert existierte weder die Zellenlehre in der Biologie, noch hatte man eine Ahnung, dass die von Leeuwenhoek entdeckten Bakterien Krankheiten verursachen konnten.

Dies änderte sich ab 1800, als man begann, die optischen Eigenschaften des Mikroskops systematisch zu verbessern. Die verschiedenen Neuerungen, die bis in die 1830er Jahre erfolgten, führten zu einer grundlegenden Umkrempelung der Naturwissenschaften.

In der Biologie begründeten Matthias Jakob Schleiden 1838 und Theodor Schwann 1839 die Zellentheorie: Zellen galten von nun an als Grundbausteine von Pflanzen und Tieren. Zu ihrem Studium wurde der Gebrauch des Mikroskops als unerlässlich angesehen. So führte Schleiden in den vierziger Jahren an: «Wer Botaniker oder Zoologe werden will ohne Mikroskop, ist mindestens ein eben so grosser Thor, als wer den Himmel beobachten will ohne Fernrohr. »

Bis sich diese Ansicht als allgemeines Paradigma durchgesetzt hatte, war es zu einer erbitterten Auseinandersetzung über die Rolle der neuen Instrumente in der Naturwissenschaft gekommen. Der französische Anatomiker Marie François Xavier Bichat etwa hatte zu Beginn des 19. Jahrhunderts vehement gegen den Gebrauch des Mikroskops protestiert. Wenn man einen Gegenstand mit Hilfe eines Instrumentes betrachte, so verliere er seine ganzheitliche Struktur. Deshalb könne nur die Beobachtung von lebenden Objekten die wahre Natur der Dinge aufzeigen. Auch andere Wissenschaftler waren der Ansicht, dass man des Mikroskops nicht bedürfe, da es ja noch so viel zu entdecken gebe, was auch ohne dieses Gerät zugänglich sei (Chadarevian 1994).

Bakterien im Visier der Wissenschaftler

In der Medizin verhalf das Mikroskop dem Menschen zu einer Waffe gegen Krankheiten wie Pest, Pocken, Tuberkulose, oder Milzbrand. Gegen diese Seuchen war man bis gegen Ende des 19. Jahrhunderts machtlos gewesen. Der Gebrauch des Mikroskops führte zur Entstehung einer neuen wissenschaftlichen Disziplin: der Bakteriologie. 1876 legte Robert

Koch seine Ergebnisse über die Milzbranderreger vor. Koch fand dank seines Mikroskops die kleinen Stäbchen in verschiedenen Organen von an Milzbrand gestorbenen Tieren. Es gelang ihm, sie auf Nährboden zu züchten, und ihr Wachstum und ihre Sporenbildung zu beobachten. Die Identifizierung bestimmter Bakterientypen als Erreger von Infektionskrankheiten war geglückt. Krankheiten und Seuchen konnten von nun an medizinisch bekämpft werden. Die Wissenschaft kam damit ihrem Ziel, die Natur zu beherrschen, ein gutes Stück näher.

Die Fertigung von Mikroskopen wurde ab Mitte des 19. Jahrhunderts nicht mehr von einzelnen Mechanikern vorgenommen, sondern erfolgte in speziellen Unternehmen. Zum bedeutendsten Hersteller von mechanisch-optischen Geräten wurde der 1846 in Jena eingerichtete Betrieb von Carl Zeiss. 1866 trat der Physiker Ernst Abbe in den Betrieb von Zeiss ein, um wissenschaftliche Grundlagen für den Bau der Mikroskope zu erarbeiten. Abbe konnte 1875 nachweisen, dass das Auflösungsvermögen der Lichtmikroskope durch die Wellenlänge des Lichtes begrenzt wird. An dieser Grenze war man Ende des Jahrhunderts angekommen (vgl. Abschnitt LICHTMIKROSKOPIE).

Elektronenmikroskop wurde anfangs belächelt

Das Lichtmikroskop bot der Naturwissenschaft eine schier unerschöpfliche Fülle von Anwendungsmöglichkeiten. Die Forscher und Forscherinnen hatten deshalb keinen Bedarf nach neuen bildgebenden Untersuchungstechniken. Nur so ist es zu erklären, dass zwei Entdeckungen, die Mitte der 1920er Jahre gemacht worden waren, fast ungehört verhallten. Man fand nämlich einerseits heraus, dass bewegte Elektronen in einem elektrischen Feld eine Wellenlänge haben, die um 100.000mal kürzer ist als die Wellenlänge des Lichts, und entdeckte andererseits, dass stromdurchflossene Spulen auf diesen Elektronenstrahl wie magnetische Linsen wirken. Damit waren theoretisch die Voraussetzung gegeben, mikroskopische Bilder von ungeahnter Auflösung zu machen; die Idee des Elektronenmikroskops war geboren (vgl. Kasten ELEKTRONENMIKROSKOPIE). 1932 meldeten die Berliner Wissenschaftler Ernst Ruska und Bodo von Borries das Transmissionselektronenmikroskop als Patent an. Mit dem Elektronenmikroskop konnten zum ersten Mal Einzelheiten sichtbar gemacht werden, die bisher nur geahnt worden waren. Biologen und Naturwissenschaftler rissen sich jedoch keineswegs darum, Bilder mit dem Elektronenmikroskop machen zu können. Dafür waren drei Gründe verantwortlich: Erstens macht die Tatsache, dass Elektronenstrahlen nur im Vakuum existieren können, für die Untersuchung von biologischen Objekten aufwendige Präparationsverfahren notwendig. Zweitens war die Belastung der Objekte durch die Elektronen anfänglich so hoch, dass die Objekte unter dem Elektronenstrahl schlichtweg verkohlten. Und drittens konnten die Naturwissenschaftler beim Elektronenmikroskop die Untersuchungen nicht mehr im eigenen Labor machen, sondern mussten sich in spezielle Elektronenmikroskop-Zentren begeben, wo sie von der Kompetenz der dortigen Techniker abhängig waren.

Eine Maschine wird zum wissenschaftlichen Instrument

Wie es die Betreiber der Elektronenmikroskope dennoch schafften, dass ihre Maschinen von der Wissenschaft akzeptiert wurden zeigt als Fallbeispiel die Etablierung der Elektronenmikroskopie in den USA zu Beginn der vierziger Jahre. Auch die Forschungsabteilung der Radio Corporation of America (RCA) hatte anfänglich Mühe, die Mediziner, Biologen oder Chemiker dazu zu bewegen, Bilder durch das Elektronenmikroskop herstellen zu lassen. Neben technischen Problemen, die man im Lauf der Zeit in den Griff bekam, bestand das Problem vor allem darin, dass die neue Technik von den meisten Naturwissenschaftlern nicht ganz ernst genommen wurde. Die Firmenleitung von RCA setzte deshalb ein hochkarätiges Komitee ein, das zusammen mit dem Betreuer des RCA-Transmissionselektronenmikroskops, Thomas Anderson, dafür zu sorgen hatte, dass das Elektronenmikroskop von den Naturwissenschaftlern benutzt wurde. Sie erreichten dies durch zwei Massnahmen: Erstens achteten sie peinlich genau

darauf, dass alle veröffentlichten Bilder, die mit dem Elektronenmikroskop gemacht wurden, gewissen Mikroskopierstandards genügten. Zweitens bemühte man sich, diese Bilder so zu interpretieren, dass keine Konflikte mit anderen topmodernen Analysemethoden entstanden. Die Elektronenmikroskopie sollte so in die bereits bestehenden Wissensbestände der Biologie integriert werden. Man wollte unbequemen Disputen mit den Anhängern von anderen Forschungsmethoden aus dem Weg gehen, um die Akzeptanz der neuen Technik nicht unnötig zu gefährden.

In der Nachkriegszeit setzten sich die bei RCA entwickelten Standards für die Präparierung der zu mikroskopierenden Objekte und für die Art der Bildproduktion und -interpretation weltweit durch (Rasmussen 1996).

Das Beispiel der Elektronenmikroskopie zeigt, dass es für die Entwicklung und Etablierung von wissenschaftlichen Apparaturen entscheidend ist, dass zwischen den Vertretern unterschiedlicher Institutionen (Hochschulinstiute, Unternehmen, wissenschaftliche Gemeinschaften, usw.) mit ihren jeweils eigenen Interessen Allianzen gebildet werden können. Innovationen sind immer das Resultat von sozialen Prozessen.

Im Laufe solcher Innovationsprozesse verändert sich der Anwendungsbereich eines Instruments. Alte Ziele geraten aus dem Blickfeld, und neue gewinnen an Bedeutung. So hat die Entwicklung des Lichtmikroskops wesentliche Impulse durch das Aufkommen der modernen Naturwissenschaft erhalten. Umgekehrt verändert ein neues Instrument die wissenschaftliche Disziplin, für die es konzipiert wurde. Die Herausbildung der Bakteriologie war nur dank des Lichtmikroskops möglich, und die Molekularbiologie fand ihren Anfang darin, dass es mit Hilfe des Elektronenmikroskops möglich wurde, den DNS-Faden sichtbar zu machen.

Mit Atomen spielen

Licht- und Elektronenmikroskope sind durch ein gemeinsames Merkmal gekennzeichnet: Unabhängig von der Betriebsart «tasten» sie das Objekt mit einem Medium wie Licht oder Elektronen ab. Eine dem Prinzip nach völlig andere Art der Mikroskopie wurde mit der Rastersondenmikroskopie Anfang der achtziger Jahre entwickelt. Der grosse Unterschied liegt darin, dass nicht die von der Probe reflektierte oder gestreute Strahlung analysiert wird, sondern eine extrem kleine Sonde in unmittelbare Nähe der Probe gebracht und eine bestimmte Wechselwirkung zwischen Sonde und Probe gemessen wird (vgl. Abschnitt RASTERSONDENMIKROSKOPIE).

Absolute Stille herrschte in den nächtlichen High-Tech-Labors der IBM-Rüschlikon, als die beiden Physiker Gerd Binnig und Heinrich Rohrer im Frühling 1981 eine Messung durchführen wollten, die eigentlich den Gesetzen der klassischen Physik zuwiderläuft. Auf einem Gerät Marke Eigenbau – das die beiden anfangs gar nicht als Mikroskop definierten – wollten sie durch sogenanntes Vakuumtunneln ein Verfahren entwickeln, um die Oberfläche von technologisch relevanten Materialien besser verstehen zu lernen. Mit Vakuumtunneln wird das Phänomen bezeichnet, wonach Elektronen durch ein Vakuum hindurch zwischen zwei elektrischen Leitern hin- und herhüpfen. Der Tunneleffekt hängt stark von der Distanz zwischen den Leitern ab; nähert man die eine Oberfläche um 0,1 Nanometer* an, verstärkt sich der Tunnelstrom um das Zehnfache. In der vibrationsfreien Stille jener Märznacht 1981 gelang es Binnig und Rohrer, die Distanzabhängigkeit experimentell zu messen, eine Leistung, für die sie 1986 den Nobelpreis für Physik erhielten – übrigens zusammen mit Ernst Ruska, dem Vater des Elektronenmikroskops.

Die Entdeckung von Binnig und Rohrer führte zur Entwicklung des Rastertunnelmikroskops, das zum ersten Mal den Blick in atomare Tiefen erlaubte und es ermöglichte, geheime, selbst dem Elektronenmikroskop verborgene Vorgänge millionenfach vergrössert und dreidimensional wiederzugeben.

Es ist kaum vorstellbar, in welchen winzigen Dimensionen sich diese Forschung bewegt. Die Sonde des Rastertunnel-Mikroskops besteht aus einem dünnen Wolframdraht. Sein Ende

ist zu einer feinen, etwa einen halben Millimeter langen Spitze ausgezogen. Um sich vorzustellen, wie spitz diese Spitze tatsächlich ist, muss man sie in Gedanken fünfmillionenmal vergrössern: Sie ist dann so gross wie das Matterhorn ñ zweieinhalb Kilometer von Zermatt bis zum Gipfel. An der höchsten Stelle des Gipfels ragt ein Nagel empor, dessen Spitze sich in Bruchteilen von Millimetern an ein Sandkorn herantastet. Der Nagel entspricht der vordersten Spitze der mikroskopischen Sonde; an ihrem äussersten Ende sitzt ein einziges Wolframatom. Das Sandkorn wiederum entspricht dem zu untersuchenden Atom (Bachmann 1997).

Der englische Physiker Ernest Rutherford, dem es 1919 gelang, den Aufbau des Atoms nachzuweisen, hätte sich wohl nicht träumen lassen, dass nur Jahrzehnte später Wissenschaftler mit Hilfe von Rastersondenmikroskopen diese Atome nach Lust und Laune herumschieben würden. Denn diese Geräte sind nicht nur Messinstrumente, sondern auch Werkzeuge für Manipulationen in der Welt des Kleinsten. Nobelpreisträger Heinrich Rohrer bringt die Visionen der Nanoforscher auf den Punkt: «Neues sehen und Verstehen ist der Anfang, um etwas besser, aber vor allem um etwas Neues zu machen. Schliesslich möchte man mit den Atomen wie mit Murmeln, mit Molekülen wie mit Lego-Bausteinen umgehen ... können» (zit. nach Heinzelmann 1994, S. 7).

Genauso wie ein mechanischer Druck auf einen Gegenstand diesen verändern kann, vermag eine verstärkte Wechselwirkung zwischen Mikroskopspitze und Oberfläche letztere lokal zu verändern. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten für Physik, Chemie, aber auch für Metallurgie, die Messtechnik oder die Molekularbiologie. Was die Phantasie der Nanowissenschaftler am meisten beflügelt, ist das gezielte Hinzufügen, Verschieben und Wegnehmen von Atomen. Ein Atom lässt sich von einer Spitze «aufgabeln» und an einer beliebigen Stelle wieder ablegen. Illustre Beispiele solcher Manipulationsmöglichkeiten sind der nur 5 Nanometer hohe Namenszug IBM, den Don Eigler und Erhard Schweizer mit 35 Xenonatomen auf ein Stück Nickel bastelten, oder der Archimedische Ausruf "Heureka", den Thomas Jung von der Uni Basel in die Spur einer CD einschrieb.

Sinnvolle Ergänzungen

Im Gegensatz zu den Anfängen der Licht- und zur Elektronenmikroskopie wurde die Raster-Sondenmikroskopie von der naturwissenschaftlichen Forschung äusserst rasch akzeptiert. Mit einer der Gründe dürfte sein, dass die Elektronenmikroskope rund dreissig mal teurer sind als zum Beispiel ein Tunnelmikroskop und deshalb nur an speziellen Elektronenmikroskop-Zentren betrieben werden können. Tunnelmikroskope können dagegen auch von einzelnen Labors beschafft werden, was den Forschern eine neue Autonomie beschert.

Nun ist aber deswegen die Elektronenmikroskopie keineswegs ein alter Hut. Denn die Raster-Sondenmikroskopie hat auch ihre Grenzen. Diese werden paradoxerweise durch ihre Genauigkeit gesetzt: Aufgrund der starken Vergrösserung kann mit dieser Technik jeweils nur ein ganz kleiner Ausschnitt der Probe untersucht werden. Die Rastersondenmikroskopie kommt deshalb vor allem im atomaren Bereich zum Einsatz. Bei vielen Forschungsgebieten liegt der interessante Bereich aber darüber. Die Biologen beispielsweise interessieren sich stärker für Moleküle und Zellbestandteile als für einzelne Atome. Und genau in diesem Bereich liegen die Stärken der Elektronenmikroskopie. Elektronenmikroskopie und Rastersondenmikroskopie stehen deshalb heute nicht mehr in einem derart starken Konkurrenzverhältnis, wie es noch Mitte der achtziger Jahre, nach der Entwicklung des Rastertunnelmikroskops, der Fall war. Ebenso wie beim Übergang von der Licht- zur Elektronenmikroskopie hat die neue Technik die alte nicht ersetzt, sondern sie ergänzt.

Ausgewählte Literatur:

- Christian Bachmann. So wird Unsichtbares sichtbar. In: Strom, Juni 1997, S. 10ñ13.
- Soraya de Chadarevian. Sehen und Aufzeichnen in der Botanik des 19. Jahrhunderts. In: Der Entzug der Bilder, hg. von Michael Wetzel und Herta Wolf, München 1994, S. 121ñ144.
- Elsbeth Heinzelmänn. Nanotechnik. Technische Rundschau. Juli 1994.
- Nicolas Rasmussen. Making a Machine Instrumental: RCA and the Wartime Origins of Biological Electron Microscopy in America, 1940-1945. In: Studies in History and Philosophy of Science, Vol. 27, No. 3, 1996, S. 311-349.
- Jerry Rzeznik. Das Mikroskop: gestern, heute, morgen. Ehningen bei Böblingen 1988.

Die verschiedenen Mikroskoptypen:

Lichtmikroskopie

In einem Lichtmikroskop entsteht die Vergrößerung dadurch, dass Licht vom Präparat durch zwei Glaslinsen dringt, die Objektivlinse und das Okular. Es werden grundsätzlich zwei Mikroskopierverfahren voneinander unterschieden:

Bei der *Durchlichtmikroskopie* hat das Licht das Untersuchungsobjekt durchdrungen, bevor es das Objektiv erreicht. Durchlicht kann man nur verwenden, wenn das Objekt von Natur aus durchsichtig ist oder aus einem sehr dünnen Schnitt besteht, der das Licht durchscheinen lässt. Bei der *Auflichtmikroskopie* wird das Licht von der Oberfläche des Objekts reflektiert. Auflicht benutzt man, wenn das Objekt undurchsichtig ist. Diese Technik kommt deshalb vor allem in den Materialwissenschaften zum Einsatz.

Aufgrund der Wellenlänge des Lichts können gewöhnliche Lichtmikroskope höchstens eine 1500fache Vergrößerung erreichen. Die Grenze der Auflösung liegt bei 0,2 Mikrometer.

Elektronenmikroskopie

Bei den Elektronenmikroskopen existieren zwei Haupttypen:

Das *Transmissions-Elektronenmikroskop* (TEM) funktioniert nach einem ähnlichen Prinzip wie ein Lichtmikroskop, das mit Durchlicht arbeitet. Nur wird beim TEM der Lichtstrahl durch einen Elektronenstrahl ersetzt, und es werden anstelle von optischen Linsen elektromagnetische Linsen verwendet. Das Bild entsteht beim TEM dadurch, dass je nach der atomaren Dichte in den einzelnen Regionen des Objekts der Elektronenstrahl durch die Atome des Objekts unterschiedlich stark abgelenkt wird. Da Elektronen Teilchen mit geringem Durchdringungsvermögen sind, müssen TEM-Präparate ausserordentlich dünn sein. Ausserdem kann der Elektronenstrahl nur im Vakuum funktionieren; biologische Untersuchungsobjekte müssen deshalb durch Trocknen oder Gefrieren präpariert werden, um im lebensfeindlichen Vakuum innerhalb des TEM untersucht werden zu können. Die Auflösungsgrenze des TEM liegt bei etwa einem Millionstel Millimeter.

Den TEM haftet der Nachteil an, dass sie Oberflächen massiver Körper nicht darzustellen vermögen. Dies hat zur Entwicklung des *Rasterelektronenmikroskops* (REM) geführt. Das REM ist einem optischen Mikroskop vergleichbar, das mit Auflicht arbeitet. Beim REM wird ein sehr feiner Elektronenstrahl auf das Präparat gerichtet. Wenn der Strahl auftrifft, werden andere Elektronen aus der Oberfläche des Objektes herausgeschlagen und strahlen radial nach aussen ab. Diese Elektronen werden von einem Detektor gesammelt und zur Herstellung eines Lichtpunktes auf einem Bildschirm verwendet. Das Bild wird aufgebaut, indem der Elektronenstrahl das Präparat in einer Serie von Zeilen abtastet - ein Verfahren, das man Rasterabtastung nennt -, und dabei auf einem Bildschirm eine Folge von Lichtpunkten erzeugt, welche schliesslich zu einem vollständigen Bild

zusammengesetzt werden können. Das REM liefert deshalb plastische und realistisch wirkende Bilder von ganzen Objekten oder Organismen.

Rastersondenmikroskopie

Bei den Rastersondenmikroskopen erfolgt die Bilderzeugung durch die Wechselwirkung zwischen einer beweglichen Sonde und dem Objekt. Sie benötigen deshalb keine Linsen zur Bildwiedergabe. Bei den Rastersondenmikroskopen können drei Typen voneinander unterschieden werden:

Das Scanning Tunneling Microscope oder *Rastertunnelmikroskop* (RTM) funktioniert nach folgendem Prinzip: Alle elektrisch leitenden Körper sind von einer hauchdünnen Elektronenwolke umgeben. Rückt man mit einer sehr feinen Nadel bis auf zirka 1 Nanometer an einen anderen leitenden Körper heran, so berühren sich die beiden Elektronenwolken zu einem sogenannten "Tunnel". Nach Anlegen einer Spannung fließt zwischen den beiden ein elektrischer Strom, der wegen der Art seiner Entstehung Tunnelstrom genannt wird. Die Elektronenwolke, die die Oberfläche der Probe bedeckt, folgt dabei jeder Unebenheit. Schon ein einzelnes Atom beult die Elektronenwolke um den Betrag seines Durchmessers aus. Kommt die Abtastnadel in die Nähe einer solchen "Beule", so nimmt der Tunnelstrom überproportional zu. Die Änderungen der Spannung an der Abtastnadel werden Zeile für Zeile auf einem Schreiber oder einer Bildröhre registriert und zeichnen auf diese Weise ein dreidimensionales Bild der Probe.

Das Atomic Force Microscope oder *Rasterkraftmikroskop* (RKM) misst jene Kräfte, die beim Gleiten über die atomaren Gebirgszüge auf die Nadelspitze einwirken. Diese können magnetischer Natur sein, es können aber auch Reibungskräfte und elektrostatische Kräfte registriert werden. Da das RKM ohne Tunnelstrom arbeitet, eignet es sich besonders für die Untersuchung nichtleitender Materialien.

Auch für das Licht gibt es eine Rastersondenmethode: das Scanning Near-Field Optical Microscope oder *Optische Rasternahfeldmikroskop* (ORNМ): Als Sonde wird hier eine Lichtquelle benutzt, deren Abstand zur Probenoberfläche deutlich kleiner ist als die Wellenlänge des Lichts. Intensität, Wellenlänge und Polarisationszustand des Lichts erlauben grundsätzlich die gleichen optischen Untersuchungsmethoden, wie sie in der konventionellen Lichtmikroskopie eingesetzt werden.

Im Gegensatz zur Elektronenmikroskopie können mit der Rastersondenmikroskopie die Proben in ihrer natürlichen Umgebung untersucht werden. Eine aufwendige Präparation erübrigt sich. Interessant ist, dass die geschilderten Rastersonden-Methoden nicht nur als Mikroskope, sondern immer häufiger auch als Werkzeuge eingesetzt werden können. In diesem Fall wird die Sonde dazu benutzt, mittels eines elektrischen Stromes chemische Bindungen zu verändern (RTM), mittels einer kontrolliert angelegten Kraft Atomgruppen zu verschieben (RKM) oder mittels Lichtenergie Material zu erwärmen (ORNМ).

Erschienen in: BULLETIN, Magazin der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 269, April 1998, S. 6-11.