

Elektronenmikroskopie in der Festkörperphysik

von P. Skalicky, Wien

Der englische Physiker William Thomson, der spätere Lord Kelvin, der 1907 gestorben ist, hat seine Forderung an ein naturwissenschaftliches Modell der Wirklichkeit so ausgedrückt: „Ich bin erst zufrieden, wenn ich von einer Sache nach meiner Vorstellung ein Modell herstellen kann. Nur wenn ich dazu in der Lage bin, kann ich die Sache verstehen.“ Wenn wir diese Aussage mit derjenigen von Richard Feynmann verknüpfen, der gesagt hat, wenn er einen fremden, intelligenten Wesen das Wesentliche unseres naturwissenschaftlichen Weltbildes mitteilen sollte, so müßte er sagen: „Alles besteht aus Teilchen, aus körnigen Strukturen“, so haben wir eigentlich schon ein gutes Motiv für die Konstruktion eines Übermikroskopes, das die materielle Strukturen auflösen kann, soweit es nur irgendwie geht. Wenn wir dann noch die Kräfte zwischen den Teilchen kennen und berechnen lernen, ist das mikroskopische Weltbild eigentlich schon fertig.

Von Galileo Galilei wird allerdings berichtet, daß er seine Freunde durch seine optischen Instrumente zunächst immer auf etwas Bekanntes sehen ließ, um sie davon zu überzeugen, daß die Abbildung wirklichen Objekten entsprachen. Dieses Problem hat sich bis heute erhalten.

Zwar kann man mit Hilfe der heutigen Elektronenmikroskopie „Atome sehen“ (man muß diese Aussage mit Vorsicht genießen), doch sind wir weit von einer Lösung aller Probleme der Festkörperphysik durch Darstellung der „körnigen Struktur“ der Materie entfernt. Die Situation ist ähnlich wie in der theoretischen Festkörperphysik: trotz ihrer enormen Fortschritte kann auch die Theorie aus Grundannahmen, die die Lage und Wechselwirkung der Teilchen im Festkörper betreffen, nicht alle seine Eigenschaften (z. B. Magnetismus, Ferroelektrizität, Supraleitung oder mechanische Eigenschaften) ausrechnen.

Die technische Entwicklung der Mikroskopie (zunächst natürlich der Lichtmikroskopie) entspricht dem Wunsch der Menschen, besser, also vor allem größer zu sehen. Mit großer Wahrscheinlichkeit gehen die ersten Mikroskopkonstruktionen auf den Holländer Zacharias Janssen im Jahre 1590 zurück, aber so ganz sicher ist das nicht, denn neuere Forschungen haben ergeben, daß er erst 1588 geboren wurde. Im Jahre 1611 hat der Mathematiker und Astronom Johannes Kepler von den holländischen Mikroskopen erfahren und war der Erste, der höhere Vergrößerun-

gen mit Hilfe eines konvexen (und nicht wie bis dahin, konkaven) Okulars erzielte. Der technische Fortschritt war für die damalige Zeit sehr schnell, also die Neugier offenbar sehr groß, Robert Hooke, ein Kurator der Royal Society in England, gab bereits 1665 auf Wunsch von Charles II einen Mikroskopischen Atlas, natürlich noch mit Zeichnungen und hauptsächlich von biologischem Material heraus. Anton van Leeuwenhoek begann dann 1670 mit dem Bau von Mikroskopen, von denen einige noch erhalten sind. In Utrecht steht eines davon, zwar zerkratzt, aber es löst bei 270-facher Vergrößerung immer noch Strukturen von $1,4 \mu\text{m}$, also nur etwas mehr als ein Tausendstel Millimeter, auf. Van Leeuwenhoek hat mit seinen Mikroskopen bereits rote Blutkörperchen gesehen, einzellige Protozoen entdeckt und sehr wahrscheinlich auch bereits Bakterien gesehen. So ganz genau wissen wir das nicht, denn er hat alles natürlich nur beschrieben und so ist die Information über vieles von dem, was er gesehen hat, mit ihm im Jahr 1723 gestorben, übrigens auch wie sein damaliges Geheimnis, Linsen von nur Stecknadelkopfgröße zu schleifen und zu polieren. Ich erwähne das alles, obwohl es nicht unmittelbar mit der Elektronenmikroskopie zu tun hat, aber doch illustriert, wie relativ weit fortgeschritten die Technik vor dreihundert Jahren schon war und welche Erwartungen daher im 20. Jahrhundert an sogenannte Übermikroskopie gestellt wurden.

Den großen Fortschritt in der Theorie der mikrosko-

pischen Abbildung ganz allgemein brachten dann die Arbeiten von Ernst Abbé, der bis 1905 gelebt hat. Es ist bemerkenswert, daß Abbé selbst gar kein Buch über die Bildentstehung im Mikroskop geschrieben hat. Denis Gabor berichtet, daß er in der Jenaer Universitätsbibliothek vergeblich nach einem solchen Buch gesucht hat und statt dessen nur die schönen und edlen sozialpolitischen Schriften von Abbé gefunden hat. Die damalige Abbesche Theorie war in einem Büchlein mit dem Titel „Die Lehre der Bildentstehung im Mikroskop“ von Lummer und Reiche enthalten, erschienen 1910, das einem furchtbar schwerfällig vorkommt, wenn man es heute liest. Alle Schwingungen sind darin mit sinus und cosinus ausführlich geschrieben, die komplexe Darstellung war damals noch wenig eingeführt. Die Autoren kannten zwar das Fourierintegral aber den Begriff der Fouriertransformierten noch nicht, geschweige denn Tabellen von Fouriertransformierten. Heute kann man die Abbé'sche Theorie in einem Satz zusammenfassen: „In kohärenter Beleuchtung entsteht das Bild durch eine doppelte Fouriertransformation, mit Wellenbandbegrenzung in der Fraunhoferebene.“

Dieser Satz beschreibt im Prinzip auch die Funktionsweise des Elektronenmikroskops.

Damals entstand ein Streit um die Abbé'sche Theorie, der uns heute im Zeitalter der Elektronenmikroskopie etwas komisch vorkommt. Der englische Mikroskopiker Beck hat Abbé vorgeworfen, daß er nur Artefakte produziert hätte. Und in der Tat hat es bis

1934 gedauert, bis Zernicke einen nützlichen Eingriff in der Fraunhoferenebene, nämlich den Phasenkontrast, erfand und noch 20 Jahre länger bis gezeigt wurde, daß man durch Fourierfilterung das Bild verbessern und nicht nur verschlechtern kann. Und hundert Jahre nach Ernst Abbé hat es gedauert, bis die a posteriori Fourierfilterung von elektronenmikroskopischen Aufnahmen zu einer gängigen Technik entwickelt wurde. Bemerkenswert ist noch, daß die Wichtigkeit der Kohärenz für die Mikroskopie zunächst etwas überschätzt wurde. Dahinter steckt etwas Grundsätzliches. Man kann mit Wellen einer gegebenen Wellenlänge aus einem Objekt eben nur ein gewisses Maximum der Information herausholen. Das war anscheinend nicht immer klar. Nach dem alten Huygenschen Prinzip entsteht immer dann ein Bild, wenn man die von einem Punkt ausgehenden Wellen wieder in einen Punkt zusammenbringt. Es gibt aber auf jeder endlichen Fläche eine Unendlichkeit von Punkten, also ist die Menge der Information unbegrenzt. Anscheinend gab es Leute vor hundert Jahren, die das glaubten, Abbé berichtet von einem Mikroskop mit meterlangem Tubus um diese Information auch einzufangen, das er auf einer Londoner Ausstellung der 70er Jahre gesehen hatte. Freilich gehörte dazu auch schon vor hundert Jahren eine ganze Menge Naivität, denn schon zu Beginn des vorigen Jahrhunderts hat Thomas Young bewiesen, daß jede Lichtfarbe eine gewisse endliche Wellenlänge hat und die Wellenoptik war durch Fresnel und

Kirchhofer mathematisch aufgebaut. Dadurch kam Sinn in die Optik, denn es war klar, daß man mit einer endlichen Wellenlänge nicht unendlich fein messen kann. Eine Wellenfolge ist ja wie ein Maßstab, legt man ihn an ein Objekt an, so kann man nur sagen, daß ein gewisser Punkt in eine gewisse Halbwelle fällt. Die absolute Grenze des Auflösungsvermögens ist in der Tat, wie Rayleigh und Abbé nachgewiesen haben, eine halbe Wellenlänge, wenn man das ganze in eine Halbkugel ausgestrahlte Licht auffängt.

Um das Auflösungsvermögen des Mikroskopes zu steigern, muß man daher die Wellenlänge drastisch senken. Wenn man bei elektromagnetischen Strahlen bleiben will, müßte man Röntgenstrahlen verwenden, doch für diese ist die Konstruktion von Linsen sehr schwierig, denn Röntgenstrahlen werden nahezu nicht gebrochen ($n \approx 1$). Trotz großer Bemühungen und beachtlicher Erfolge stellt die Röntgenmikroskopie (was das Auflösungsvermögen betrifft) noch keine Konkurrenz für die Elektronenmikroskopie dar.

1924 hat nun Louis de BROGLIE die These aufgestellt, wonach jeder bewegten Masse eine „Materiewelle“ zugeordnet sei und so gesehen, bieten sich beschleunigte Elektronen als Informationsträger in einem Mikroskop geradezu an. Sie sind leicht herzustellen und zu beschleunigen und ihre Ladung läßt Ablenkung im elektrischen und magnetischen Feld zu. Die Materiewellenlängen von Elektronen, die mit 100 kV beschleunigt wurden, ist um den Faktor 10^5 , also

100.000 mal kleiner als die von sichtbarem Licht. Ihre de-BROGLIE Wellenlänge beträgt 0,037 Å.

Leider ist das Auflösungsvermögen des Elektronenmikroskops nicht um den gleichen Faktor besser als das des Lichtmikroskopes, weil es nicht gelungen ist, die Elektronenoptik so gut zu machen wie die Lichtoptik, so daß es im Endeffekt bei einer Verbesserung um etwas mehr als den Faktor 1000 geblieben ist.

Die Entwicklung geeigneter Elektronenlinsen war auch das eigentliche Haupthindernis für die Konstruktion eines leistungsfähigen Mikroskopes. Die Probleme wurden jedoch in erstaunlich kurzer Zeit von den Pionieren der Elektronenoptik gelöst, die auf dem ersten Bild zu sehen sind. Die Geschwindigkeit dieser Entwicklung, verglichen mit der Geschwindigkeit der Entwicklung des Lichtmikroskopes bis zu seiner Vollendung, ist ein deutlicher Beweis der Gegenwartsbezogenheit und des raschen Wachstums der Wissenschaften.

Es ist interessant festzustellen, daß die Entwicklung des Elektronenmikroskops wirklich auf Forscherneugier zurückzuführen ist und nicht auf unmittelbare technische Notwendigkeiten oder gar Kriegsanstrengungen. Nach Erzählungen von Denis Gabor, hat die Entwicklung in einer Zeit (also 1928), als unsere Gesellschaft noch nicht so stark wie heute in die von dem Engländer C. P. Snow beschriebenen „zwei Kulturen“, nämlich die geisteswissenschaftliche und

die technisch-naturwissenschaftliche Orientierung gespalten war und die Literaten und die Physiker noch im Cafehaus miteinander diskutiert haben, der Zugang zu diesem Problem etwa so ausgesehen:

„Busch hat gezeigt, daß man Elektronenlinsen bauen kann, De Broglie hat gezeigt, daß den beschleunigten Elektronen sehr kurze Wellenlängen zuzuordnen sind, also bauen wir doch ein Mikroskop, dann können wir Atome damit sehen.“ Dieses Ziel ist allerdings nur nahezu erreicht worden, denn der Ausdruck **Atome sehen** ist eben mit Vorsicht zu gebrauchen wenn man Elektronen dazu verwendet. Aber alles, was man sich vom Elektronenmikroskop erhofft hat, ist technisch heutzutage erreicht.

Betrachten wir die Entwicklung des Auflösungsvermögens und der nutzbaren Vergrößerung (diese beiden Größen sind natürlich miteinander verknüpft), so sehen wir auch die sprunghafte Entwicklung der Elektronenmikroskopie im Vergleich zur Lichtmikroskopie, deren Entwicklung heute, nach 300 Jahren als abgeschlossen betrachtet werden kann. Ähnliches kann man auch von der Elektronenmikroskopie sagen, die die gleiche Entwicklung in einem Zehntel der Zeit hinter sich gebracht hat. Das gilt vor allem vom Auflösungsvermögen und damit von der maximal nutzbaren Vergrößerung wo geringfügige Verbesserungen nur noch mit ungeheurem Aufwand möglich sind und sein werden. Die supraleitende Objektlinse, mit der maximale Ortsfrequenzen von 0,13 Nano-

meter auflösbar sind, stellt sicherlich einen Gipfel dieser Entwicklung dar.

In der Weiterentwicklung einer großen Erfindung kommt häufig ein Mann vor, der schon vorher an alles gedacht hatte und es auch patentieren ließ, allerdings ohne die Sache einmal selbst auch zu konstruieren. Häufig waren das Franzosen, wie Beau de Rochas mit dem Verbrennungsmotor oder Ducos de Hauron mit der Farbphotographie, im Falle der Elektronenmikroskopie war es Reinhold Rüdenberg, Chefingenieur der Siemens-Schuckert Werke. Er hatte schon vorher über ein Übermikroskop nachgedacht, weil sein Sohn an Kinderlähmung gestorben war und er der medizinischen Forschung weiterhelfen wollte und er muß auf Grund eines nach dem Krieg gewonnen Patentstreites als der Erfinder des Elektronenmikroskopes angesehen werden.

Vor fünfzig Jahren, wie gesagt, kam angeregt durch die Arbeiten von BUSCH, die Diskussion über die Elektronenoptik in Gang. E. BRÜCHE war einer der ersten, die dieses neue Thema aufgriffen und die technische Entwicklung ist wesentlich der KNOLL-Gruppe an der Technischen Hochschule Berlin zu verdanken. Damals schwankten die Erwartungen zwischen der Hoffnung, daß man mit der Auflösung der Mikroskope bis zur de-Broglie Wellenlänge (also in den subatomaren Bereich) vordringen könne, und der Befürchtung daß es keine interessanten Objekte gebe, die die Bestrahlung mit Elektronen aushalten.

Die Frage, was man von einem Elektronenmikroskop erwarten dürfe und was nicht, gilt heute als weitgehend geklärt. Die wesentlichsten Einschränkungen kommen von jenen Eigenschaften, die allen Objekten, festkörperphysikalischen oder biologischen gemeinsam sind. Man überlegt leicht, daß die maximale nützliche Vergrößerung durch die **Nullpunkt-Schwingung** der Atome begrenzt wird, selbst wenn man die Probe bis auf die Temperatur $T = 0$ kühlen könnte. Schwere Atome in fest gefügten Kristallen schwingen bei Temperaturen T größer 4K mit einer mittleren Amplitude von $0,05\text{\AA} = 5\text{ pm}$, mittelleichte Atome (etwa Bor bis Fluor, Kernladungszahl 5 bis 9) in Kristallen und den meisten Biomolekülen mit Amplituden von etwa $0,1\text{ \AA}$. In der Biologie hat man es häufig mit viel lockereren Objekten, etwa lose gespannten Gen-Ketten zu tun. Sie schwingen unter Umständen, selbst bei der Temperatur flüssigen Heliums ($T = 4\text{ k}$) mit erheblich größeren Amplituden. Diese Schwingungen um die Ruhelage begrenzen natürlich das Auflösungsvermögen. Da zwei Atompositionen nicht deutlich getrennt erscheinen können, wenn ihr mittlerer Abstand nicht größer ist als cirka das 2,6-fache ihrer mittleren Schwingungsamplitude, darf man schon aus diesem Grund, der außerhalb der elektronenmikroskopischen Technik liegt, keine höheren Anforderungen an das Auflösungsvermögen stellen.

Eine andere Grenze, die Schädigung der Objekte im

Mikroskop, erwies sich als nicht ganz so schlimm, wie man anfangs befürchtet hatte. Sie beeinträchtigt aber noch immer die Brauchbarkeit des Mikroskops. Dies gilt allerdings für biologische Präparate in stärkerem Ausmaß als in der Festkörperphysik. Man kann auch heute (von Ausnahmen abgesehen) keine lebenden Objekte im Elektronenmikroskop abbilden. Der Grund ist nicht das erforderliche Vakuum. Was die lebenden Objekte tötet und sogar die tote Materie erkennbar schädigt, ist der Einfluß der abbildenden Elektronen, wie jeder anderen ionisierenden Strahlung auch, auf die chemischen Bindungen innerhalb der Objekte. Zwar kommt es nur selten vor, daß die einzelnen Atome durch direkten Stoß der Elektronen aus ihren Plätzen (innerhalb eines Moleküls oder Kristalls) geworfen werden. Aber die Elektronen des Objekts werden durch die Bestrahlung zu so heftigen Schwingungen angeregt, daß nicht nur alle Lebensvorgänge hoffnungslos gestört, sondern auch einzelne chemische Bindungen gelockert werden. Eine ganz wesentliche Bedingung für eine gute photographische Aufnahme, nämlich daß das Objekt während der Aufnahme nicht zuckt und nicht wackelt, ist damit verletzt. Selbst bei niedrigen Vergrößerungen, die nicht imstande wären, die Atome auf ihren Plätzen abzubilden, ergeben sich Probleme bei nichtleitenden Objekten, die sich durch die Bestrahlung mit Elektronen elektrisch aufladen.

Verringert man die Bestrahlungsdosis so drastisch, daß solche Effekte nicht auftreten, so kommen bei

Dunkelfeld Abbildung nicht genügend Elektronen in die Bildebene. Selbstverständlich ist aber für eine brauchbare Abbildung eine Mindest-Dosisleistung erforderlich um die Photoplatte zu schwärzen. Bei Hellfeld-Abbildung erreichen so wenige Elektronen das Bild, daß sie wegen ihrer statistischen Verteilung, dem Teilchenrauschen, auch dann interessante Strukturen vortäuschen wenn gar kein Objekt vorhanden ist. Man kann dann aus diesen Strukturen immer noch weissagen, wie manche Leute aus dem Kaffeesatz, aber es gehört schon eine gute Kenntnis der statistischen Gesetze dazu, um nicht hinein-zufallen. Erfreulicherweise ist das menschliche Auge und Gehirn sehr leistungsfähig im Wiedererkennen auch komplizierter Strukturen, auf das Auflösungsvermögen kommt es dabei nicht einmal so sehr an. Jedermann wird auch ein völlig unscharfes Bild von Mona Lisa wiedererkennen, obwohl alle Details fehlen, wenn er weiß, worauf es ankommt. Das ist allerdings in der Elektronenmikroskopie ein Problem, denn im allgemeinen wissen wir ja nicht, wie das zu erwartende Bild aussehen soll. In der letzten Zeit sind allerdings Computer-Simulationsmethoden, die eine Vorhersage an Hand von Modellvorstellungen erlauben, zu hoher Blüte gelangt.

Das Teilchenrauschen ist zwar nicht prinzipiell unvermeidbar, da ja Elektronen keine ungeladenen Boltzmann-Teilchen sind, sondern durch ihre Ladung und durch das Pauli-Prinzip gebändigt werden können. Leider ist für diese Disziplinierung der

Elektronen eine so große Bestrahlungsapertur erforderlich, daß in der Elektronenmikroskopie damit nicht viel zu gewinnen ist. Für die höchstaflösende Mikroskopie bleibt damit nur zu hoffen, daß man so etwas wie ein „Strahlungskorsett“ für die Moleküle oder Atome findet, das gleichzeitig eine Stütze und einen Blitzableiter bildet. Ein solches Korsett soll verhindern, daß die Moleküle übermäßig zucken und unherwandernde Überschußelektronen, Defektelektronen und Exzitonen unschädlich machen, bevor sie sich an einer Haftstelle festsetzen und von dort aus eine Bindung zerstören oder die Struktur sonstwie verändern. Solange man über solche Präparationsmethoden nicht verfügt, wird die Auflösung wesentlich durch die Strahlenschäden eingeschränkt. Bei Stoffen mit hohem oder mittlerem Atomgewicht, etwa strahlengeschädigten Reaktorwerkstoffen, liegt diese Grenze noch unterhalb der Ausdehnung des Atoms. Sie ist deshalb beim heutigen Wissensdurst der Materialkundler und Festkörperphysiker noch nicht aufregend. Bei den Biomolekülen jedoch, die selbst als verkohlte Reste meist nur eine Dosis von 10^{10} Röntgen vertragen, bleibt die Auflösungsgrenze über 3 Å, solange die höchstzulässige Dosis nicht durch verbesserte Präparation erhöht werden kann. Man kann deshalb nicht erwarten, daß man schon bald die einzelnen Kohlenstoffatome der Genketten im Elektronenmikroskop sehen können. Der Sichtbarmachung der einzelnen Kohlenstoffatome in einem gestörten Graphitkristall steht jedoch von den

Wärme- und Nullpunktschwingungen und von den Strahlenschäden her nichts im Wege, außer der Abbildungsleistung des Elektronenmikroskopes.

Es ist nützlich, sich ein wenig den Unterschied zwischen indirekten und direkten (in unserem Falle mikroskopischen) Methoden zu überlegen. Zu den indirekten Methoden gehören zum Beispiel die Anwendung der Röntgen, Elektronen- oder Neutronen-Beugung, die Polarisationsmikroskopie, die Spektroskopie, aber auch Zell-Fraktionierungstechniken in der Mikrobiologie. Ein Röntgen-Beugungsdiagramm eines Proteinkristalls liefert weder ein vergrößertes Bild des Kristalls noch ein Bild der einzelnen Eiweiß-Moleküle, die den Kristall aufbauen, genausowenig, wie optische Spektren von anorganischen Kristallen ein direktes Bild der elektronischen Struktur ergeben. Trotzdem enthält das Beugungsbild zumeist einen Teil der Information, die nötig ist, um das Porträt des Eiweißmoleküls oder die Anordnung der Elektronen im Halbleiterkristall zu konstruieren. Die Farben, die eine dünne Polypropylenfolie im Polarisationsmikroskop liefert, sind auch kein Bild des molekularen Aufbaus, können aber dazu benützt werden, sich ein Bild davon zu machen.

Das ist ja offenbar ein unausrottbarer Wunsch, sich ein Bild davon zu machen. Immanuel Kant hätte wahrscheinlich keine Freude mit einem Elektronenmikroskop gehabt, denn alles sinnlich Wahrnehmbare

bleibt letztlich Erscheinung, auch wenn man es sehr stark vergrößert und liefert kein „physikalisches Weltbild“. Aber eine Auseinandersetzung mit der Kantschen Philosophie habe ich nicht vor.

Man kann es so ausdrücken: indirekte Methoden liefern keine Bilder (wie die direkten), sondern Konzepte, zum Beispiel diejenigen einer atomaren oder molekularen Struktur. Verwenden wir Sir Karl Popper's Unterscheidung der drei Welten, nämlich Nr. 1 für die Welt der Dinge, der physikalischen Objekte, Nr. 2 für die Welt der subjektiven Erfahrung und Nr. 3 für die Welt der Sätze oder Konzepte, dann kann man sagen, daß die Ergebnisse der direkten Methoden, wie der Elektronenmikroskopie, als Teil der Welt 1 betrachtet werden können, während die Resultate der indirekten Methoden, die keine Bilder von Strukturen liefern (in vielen Fällen nicht einmal deren Fouriertransformierte), als Teil der Welt 3 betrachtet werden können. Sie gewinnen ihre Bedeutung erst nach einer mehr oder minder komplizierten Interpretation.

Diese Unterscheidung ist natürlich kein Werturteil, der Einsatz verschiedener wissenschaftlicher Methoden richtet sich im wesentlichen nach ihrer Anwendbarkeit, auch wenn der Mensch instinktiv gerne direkten Methoden den Vorzug gibt. Das hängt natürlich damit zusammen, daß Signale, für die wir keine direkten Sinne haben, wie Neutronenbeugungsintensitäten, nur beschränkt verarbeiten können. Man

darf aber nicht vergessen, daß nahezu unser gesamtes Wissen über Kristalle, Moleküle, Atome und Elementarteilchen aus indirekten Methoden stammt. Bemerkenswert ist eine deutliche Asymmetrie in der Anwendbarkeit direkter und indirekter Methoden. Die indirekten sind dadurch charakterisiert, daß sie die Verstärkung von sonst unmeßbar schwachen Signalen durch natürliche oder künstliche Anreicherung der Strukturelemente in periodischer und symmetrischer Anordnung herbeiführen. Zell-Fraktionierung habe ich schon erwähnt, und die Verstärkung der Streuwellen von Einzelatomen durch ihre regelmäßige Anordnung in einem Kristall, sodaß ein Beugungsmuster entsteht, ist natürlich das Gleiche. Es ist übrigens interessant anzumerken, daß der Anreicherungsfaktor, der bei indirekten Methoden nötig ist, um entsprechende Signalstärken zu erhalten, die gleiche Größenordnung hat, wie die Vergrößerung, die nötig ist, um Atome zu sehen, nämlich 10^6 . W. Hoppe nennt die regelmäßige Anordnung mit einem schönen Wort den „Molekularverstärker“. Wo dies nicht möglich ist, versagen die indirekten Methoden. Oder anders ausgedrückt: die direkten Methoden sind dann besonders sinnvoll und erfolgreich einzusetzen, wo es um nicht periodische Strukturen niedriger Symmetrie geht. Die meisten Aufgaben der Zellbiologie fallen darunter. Bei einem Dünnschnitt durch eine Rattenleber fällt sogleich auf, was für die meisten wichtigen Zellstrukturen gilt: die Mikromorphologie ist durch aperiodische Strukturen

und das Fehlen von Symmetrie gekennzeichnet. Kristalline Strukturen deuten meist auf extreme Spezialisierung hin. Die Struktur des amorphen Zustandes, der wie eine eingefrorene Flüssigkeit wirkt, kann man in diesem Fall wirklich nur elektronenmikroskopisch charakterisieren. Es ist daher auch kein Zufall, daß die Zellbiologie direkten Methoden so große Fortschritte verdankt.

Für die (anorganische) Festkörperphysik gilt Ähnliches. Ein störungsfreier Silizium Kristall, dessen Netzebenen abgebildet wurden, ist außer, daß wir über die Auflösung staunen können, ein ziemlich uninteressantes Objekt für die Elektronenmikroskopie. Die Gitterkonstante hätte man durch indirekte Methoden leichter bestimmen können und wahrscheinlich auch genauer.

Interessant wird es, wenn Störungen auftreten, die von ihrem Maßstab her integrierenden, direkten Methoden nicht mehr zugänglich sind, wie die Kristallstörungen. Wir unterscheiden drei Kategorien solcher Störungen (wenn wir von der Schwingung der Atome um ihre Ruhelage durch die thermische Bewegung absehen): 1. die Punktdefekte, also z. B. ein fehlendes Atom im Kristallgitter, oder ein Fremdatom an seiner Stelle. 2. lineare Defekte, z. B. Versetzungen, die dadurch gekennzeichnet sind, daß die regelmäßige Anordnung der Kristallatome entlang einer Linie gestört ist, und 3. zwei-dimensionale Kristalldefekte, wie Korngrenzen, Stapelfehler oder Antiphasengrenzen.

Kristalldefekte, wie z. B. Versetzungen, kann man nicht kristallisieren wie Moleküle, um die „Molekularverstrickung“ zur Verfügung zu haben, aber man kann sie direkt im Elektronenmikroskop beobachten und Rückschlüsse auf die Atompositionen ziehen, deren Periodizität und Symmetrie gestört ist. Solche Aufgaben bedürfen allerdings einiger Interpretations- und festkörperphysikalischer Kenntnisse. Die Atome in ungestörten Kristallen abzubilden, ist nämlich verhältnismäßig leicht. Die wichtigsten Bragg-Reflexe sind scharf gebündelt und lassen sich durch geeignete Orientierung so in das Objektiv dirigieren, daß dessen Fehler nicht allzusehr stören. Dadurch werden zwar nicht die einzelnen Atome, sondern ihre statistisch gemittelten Lagen abgebildet. Solche Aufnahmen zeigen aber, daß die früher so gefürchteten Störungen durch Erschütterungen, Temperaturänderung, magnetische Störfelder und viskoses Kriechen überwunden sind.

Bei der Abbildung atomarer Strukturen gestörter Kristalle, die ja nichtperiodische Objekte darstellen, steckt die Information aber gerade in der „Aufweichung“ der Bragg-Reflexe. Das Objektiv muß daher über einen weiteren Aperturbereich korrigiert werden. Besonders die Korrektur der sphärischen Aberration ist unerläßlich. Sie durch Verringerung der Apertur zu umgehen, setzt eine sehr hohe Schärfentiefe voraus. Damit projizieren sich bei den unvermeidlichen Objektdicken so viele Atome in das Bild, daß Einzelaufnahmen nicht mehr deutbar sein

dürften. Es bleibt dann nur der Ausweg der Mehrfachaufnahme des gleichen Objektes aus verschiedenen Richtungen (ähnlich der Tompographie), was aber eine Reihe von weiteren Problemen mit sich bringt.

Der Festkörperphysiker wird sich jedoch in vielen Fällen mit einer Aufnahmetechnik zufrieden geben, bei der gar nicht einmal allerhöchste Ansprüche an das Auflösungsvermögen des Mikroskops gestellt werden. Man bezeichnet dies als Ausnützung des Beugungscontrastes. Man arbeitet in diesem Fall mit einer Aperturblende, die so klein ist, daß die Bragg-Reflexe des kristallinen Objektes gar nicht zur Bildentstehung beitragen. Der Kontrast rührt vom unterschiedlichen Beugungsvermögen der Kristalle in der Nähe eines Gitterdefektes her, man kann auch sagen, von der durch den Defekt verursachten „Krümmung der Netzebenen“. Daß solche Aufnahmen einiger Interpretation bedürfen, erkennt man z. B. am Bild eines Stapelfehlers. Ein solcher ebener Defekt, der die Symmetrie stört, ergibt einen Streifenkontrast. Die Streifen haben jedoch gar nicht mit der Struktur des Defektes zu tun, sie sind ein reiner Beugungseffekt und rühren von entsprechenden Eingriffen in der Fraunhofer-Ebene des Mikroskopes her, also der dort befindlichen Aperturblende. Die Streifen sind also ein Artefakt, aber ein interpretierbarer. Eine geringfügig andere Einstellung des Mikroskopes reicht im übrigen aus, um den Kontrast unsymmetrisch zu machen, ohne natürlich an der

Struktur des Defektes etwas zu ändern. Dieses Ergebnis ist zu verallgemeinern, man lernt daraus, daß eben Defekte dieser Klasse (wie Stapelfehler) einen Streifenkontrast bestimmter Symmetrie erzeugen und kann sie danach in anderen Kristallen erkennen. Das ist bei der Anwendung direkter Methoden auch dringend nötig, denn sonst könnte man bei den kleinen Probenvolumina, die in einem Elektronenmikroskop untersucht werden — die Fläche einer solcher Aufnahme ist nicht einmal $1\mu\text{m}$ im Quadrat — keinerlei Verallgemeinerungen erreichen.

Der umgekehrte Weg ist übrigens auch sehr interessant und wird in jüngster Zeit zunehmend beschritten. Man kann aus der direkten mikroskopischen Aufnahme wieder ein indirektes Verfahren machen, indem man die „Molekularverstärkung“ **nachträglich** anwendet. Im Falle der Abbildung eines kristallinen Virus, der aus Eiweißmolekülen besteht, ist das nicht notwendig, man kann noch sicher sein, daß die Strukturen der Gitterbausteine tatsächlich individuelle Verschiedenheiten wiedergeben. Der Abstand und die Größe der Eiweißmoleküle, die dieses Gitter aufbauen, nämlich 32 Nanometer, ist sicher größer als die maximale Ortsfrequenz, die dieses Elektronenmikroskop noch auflösen konnte. Anders ist das bei anorganischen Kristallen, die aus einzelnen Atomen aufgebaut sind. Hier ist das Elektronenmikroskop an der Grenze seiner heutigen Leistungsfähigkeit angelangt. Zwar können die Orte der Atome noch aufgelöst werden,

aber ihre innere Struktur ist nicht mehr sicher interpretierbar. Durch wiederholtes Übereinanderkopieren dieser translationssymmetrischen Aufnahme, also nachträgliche Molekularverstärkungen, wenn Sie so wollen, lassen sich allerdings noch einige Strukturdetails als charakteristisch erkennen. Was hat nun die Wissenschaft davon und was kostet der Spaß? Zunächst eine ungeheure Fülle von Daten, die kaum mehr überschaubar ist, wie in allen Wissensgebieten, aber in der Elektronenmikroskopie besonders deutlich zeigt, wie wichtig es ist, möglichst allgemeine Aussagen daraus abzuleiten. Es gibt auf der Welt einige tausend Elektronenmikroskope. Nehmen wir als obere Grenze 10.000 Stück, und einen ebenfalls hohen Wert von 20.000 Aufnahmen pro Mikroskop, normale Photoplattengröße (6 x 9 cm), ferner durchschnittlich 20.000fache Vergrößerung der Aufnahmen, sowie durchschnittlich 100 Nanometer oder $0,1 \mu\text{m}$ Probendicke, dann sind auf der ganzen Welt auf diese Weise bis heute nicht einmal $0,3 \text{ mm}^3$ — von allen Substanzen, biologisch wie anorganisch — untersucht. Die Kosten dafür allerdings sind beträchtlich. Um ein mm^3 Substanz in diesem Maßstab zur Gänze elektronenmikroskopisch zu untersuchen, müßte man in etwa das derzeitige Budget des österreichischen Wissenschaftsfonds durch 800 Jahre hindurch zu diesem Zweck einsetzen. Solche Zahlenspielerien sind bedenklich, gewiß, aber sie geben eine Vorstellung von der Größenordnung des Einsatzes. Man muß daher weltweit Elektronenmikroskopie eigent-

lich zur Großforschung rechnen, die nur erfreulicherweise weit verteilt ist. Im Maßstab der heutigen Forschungskonzentration ist ein elektronenmikroskopisches Laboratorium „Littel Science“, um mit der Klassifikation von Derek de Solla-Price zu sprechen, der zwischen „Little Science“ und „Big-Science“, wie zum Beispiel internationalen Hocheenergieprojekten, unterscheidet. Das hat Vor- und Nachteile. Die Vorteile bestehen darin, daß auch ein kleineres Land wie Österreich sich eine erstklassige Ausstattung in dieser Disziplin leisten kann. Ein Elektronenmikroskop kann man fertig kaufen und es entspricht dem Stand der Technik, mit dem man durchaus international konkurrenzfähige Arbeit machen kann. Sonderaufgaben werden wahrscheinlich nach wie vor Selbstbau bedeuten, sind aber nicht zwingend die Regel.

Ein Nachteil der Dezentralisierung ist natürlich die Unübersichtlichkeit des Wissensgebietes und seiner Ergebnisse. Betrachten wir das im Hinblick auf Verarbeitung des Wissens durch einen einzelnen Wissenschaftler, der vielleicht im Laufe seines Lebens zwischen einer und einigen hundert Arbeiten schreibt, wobei die Grenze zwischen viel und wenig durch das geometrische Mittel gegeben sein soll. Am Anfang seiner Karriere haben ihn seine Lehrer, und einige aktuelle Arbeiten an die Forschungsfront geführt und von da an wird er vielleicht auf das unbekannte Meer hinaussegeln wollen und zum Beispiel eine neue Substanz, oder bislang unbekannte Gitterdefekte

untersuchen wollen. Bleibt er der einzige, der das tut, dann würde es genügen, wenn er seine eigenen Arbeiten liest. Das ist das Schicksal des einsamen Pioniers, der keine Zeitschriften lesen muß und, wenn überhaupt, nur für das Wohl kommender Generationen publiziert. Aber für gewöhnlich ist das Leben nicht so. Er begegnet schnell anderen mit der gleichen Grundausbildung, und vor allem den gleichen experimentellen Möglichkeiten, die womöglich die gleichen Probleme untersuchen. Er wird daher die Arbeit seiner Kollegen und vielleicht Rivalen überwachen wollen, und ihre Erfolge vielleicht übertreffen, aber nicht nachahmen wollen. Wieviele, nicht koordinierte Individuen können so überwacht werden? Vielleicht hundert, deren Arbeiten er noch verfolgen kann, auf keinen Fall aber kann er 10.000 Arbeiten (was nach der vorhin erwähnten Zahl von Elektronenmikroskopen durchaus eine realistische Zahl wäre) pro eigener Arbeit verfolgen, denn dann müßte der gute Mann, der 100 Arbeiten im Leben schreibt, eine Million andere elektronenmikroskopische Aufnahmen mitsamt ihrer Interpretation studieren, das sind mehr als 60 pro Tag.

Dieser Zustand, bei dem viele Leute unkoordiniert über die ganze Welt verteilt mit ähnlichen Voraussetzungen arbeiten, ruft eigentlich nach Konzentration, also zum Beispiel einem großen Zentrum für Elektronenmikroskopie, oder Ultrastrukturforschung, ein auch sehr beliebter Name dafür. Nun wird aber aus einem Elektronenmikroskop auch kein

Großforschungsprojekt, wenn man 20 Stück davon nebeneinander stellt und die Erfahrung zeigt, daß auch Zentren für Ultrastrukturforschung dann am erfolgreichsten sind, wenn sie mit anerkannten Fachleuten für die **Anwendung** der Elektronenmikroskopie besetzt sind und das gilt sogar für die Weiterentwicklung der elektronenmikroskopischen Methodik und Gerätetechnik. In Österreich ist dies erfreulicherweise der Fall. Bloße Anhäufungen von gleichartigen Geräten aber bergen die Gefahr des sogenannten „Cargo-Effektes“ bei den Besitzlosen: dieser Begriff wird von Anthropologen benutzt, um die Reaktion primitiver Völker auf Bootsladungen voll von Zivilisationsgütern zu beschreiben. Als während des zweiten Weltkrieges die Marine auf den Pazifischen Inseln landete, waren die Hütten der Eingeborenen mit Bambus Faksimiles von Radar Antennen versehen. Sie waren dort angebracht worden, damit die neuen Götter auch ihnen gnädig Reichtum gewähren würden. In der Experimentalphysik ist dieser Vorgang bekannt. Elektronenmikroskope gehören beim heutigen Stand ihrer Entwicklung in die Hand des problemorientierten Anwenders, der mehrere Methoden beherrscht und parallel einsetzen kann.

Eine Konzentration zu einem Großforschungsprojekt ist allenfalls bei Höchstspannungsmikroskopen gerechtfertigt, die so groß, teuer und aufwendig im Betrieb sind, daß nur wenige davon existieren. Die Kosten für solche Installationen wachsen stark über-

proportional mit der Beschleunigungsspannung und sind daher auch nicht mehr von kleineren Forschungseinheiten zu finanzieren.

Die Frage erhebt sich, ob es denn noch genug zu sehen gibt in unseren Elektronenmikroskopen, die zwar ein weit offen stehendes, aber nur kleines Fenster darstellen, durch die wir die Dinge betrachten. Oder wird durch die weiteren Fortschritte der Physik und immer bessere Beschreibungsmethoden die Mikroskopie zu einer besseren Hilfswissenschaft degradiert, die eigentlich nur Bekanntes und vorhersehbares bestätigen kann. Abgesehen davon, daß dies ja auch eine Leistung darstellen würde, glaube ich nicht, daß es sich so verhält. Eine bessere Mikrostruktur von dünnen Silizium-Schichten auf Sapphir ist der Natur auch durch noch so gute Kenntnisse der Grundlagen noch nicht abgerungen. Mikrozwillinge und anderen Gitterdefekte, entstehen aus kristallographischen Gründen an der Trennfläche zwischen Silizium und Sapphir und werden nur im Elektronenmikroskop direkt sichtbar. Sie stören die elektrischen Eigenschaften der Bauelemente, die daraus gemacht werden sollen und die Ingenieure sind daher an der Aufklärung der Mechanismen sehr interessiert. Probleme dieser Art, in denen eine Anwendung der Elektronenmikroskopie festkörperphysikalische Probleme zum Nutzen der Technologie löst, gibt es tausende mit steigender Tendenz.

Offenbar braucht man sich, ich zitiere Carl Friedrich von Weizsäcker, selbst für den Fall der Vollendung der

Physik, keine Sorgen um die Zukunft der Elektronenmikroskopie machen. „Ich halte es für möglich“, sagt Weizäcker, „daß die Physik als Grundlagenwissenschaft vollendbar ist und daß diese Vollendung eine Aufgabe sein wird, an der die siebziger Jahre wesentlich mitarbeiten werden. Sie wird dann vollendbar sein, wenn sie sich als die Strukturwissenschaft von den einfachsten möglichen Systembausteinen erweist. Ihr Geltungsbereich wäre dann so umfassend wie die Reduzierbarkeit der Fragen an die Wirklichkeit auf entscheidbare Alternativen,“ und weiter: „Die Erforschung spezieller physischer Objekte — fester Körper, chemischer Verbindungen, strömender Flüssigkeiten, Gase usw. — und erst recht die praktische Anwendung all dieses Wissens würden nicht auf eine Grenze stoßen, auch wenn sich die nach den Grundgesetzen suchende Physik als vollendbar erwiesen, denn eben diese Grundgleichungen lassen eine praktisch unbegrenzte Vielzahl von Lösungen zu. Der Einfluß und Nutzen und auch damit der Geldbedarf der Wissenschaften vom Anorganischen wird noch weiter wachsen, vor allem was den Geldbedarf betrifft“. Das ist sicher richtig, das Ziel der Elektronenmikroskopie wird es aber trotzdem weiterhin sein, an einer möglichst einfachen Beschreibung der Wirklichkeit mitzuwirken. Ich erinnere noch einmal an die weitreichenden Schlüsse, die aus einem so geringen Probenvolumen, das bis heute untersucht wurde, gezogen werden konnten. Fortschritt kommt nicht nur aus der Anhäufung von

Daten, oder elektronenmikroskopischen Bildern die irgendwelche Morphologien beschreiben, sondern eher aus der neuen Interpretation bekannter Tatsachen, aus neuen Konzepten, die verbessert oder widerlegt werden können und die aus Popper's Welt 3 stammen. Wissenschaft ist nicht ausschließlich induktiv, sondern eher deduktiv. Nur wenn neue und unerwartete Dinge entdeckt werden, kommt es zu einer induktiven Phase. Die Fortschritte in der Mikrobiologie, und der Festkörperphysik die Sichtbarmachung von Voraussetzungen oder die Entdeckung der aufgespaltenen Antiphasengrenze sind Beispiele dafür. Auf die Deduktion muß man sich aber verlassen können und das ist auch der Fall, wie die Tatsache zeigt, daß ein modernes Krankenhaus ohne Elektronenmikroskopie in der Pathologie schon fast nicht mehr denkbar ist. Vielleicht kann man dieses Vertrauen auf das Zitat aus dem platonischen Parmenides Dialog zurückführen:

„Aber mir scheint es am ehesten sich so zu verhalten, daß einerseits die Gestalten wie Beispiele in der Natur dastehen, andererseits die übrigen Dinge ihnen gleichen und ihre Nachbilder sind und daß den übrigen Dingen die Teilhabe an den Gestalten nicht anders zuwächst als indem sie ihnen nachgebildet werden.“

Diese Überzeugung liegt natürlich allen mikroskopischen Verfahren zugrunde.

Ich möchte nicht schließen, ohne noch eines tragischen Kuriosums zu gedenken, das mit der Geschichte

der Elektronenmikroskopie verknüpft ist und sich in Wien zugetragen hat. In den letzten Kriegstagen, im April 1945, stand im Chemisch-Physikalischen Institut der Universität in der Währingerstraße noch der Prototyp eines Elektronenmikroskopes, eines der ersten in Österreich. Das Gerät sollte zerstört werden, um nicht den anrückenden Besatzungsarmeen in die Hände zu fallen. Die beiden Wissenschaftler, die das Mikroskop betreuten, Dr. Kurt Horeischy und Dr. Hans Vollmar wollten sich der Zerstörung ihres Instrumentes widersetzen und fanden dabei den Tod. Man sollte sie nicht vergessen.

Anschrift des Verfassers:

Univ. Prof. Dr. P. Skalicky
Institut für Angewandte und Technische Physik
Technische Universität Wien
Wiedner Hauptstraße 8 - 10
1040 WIEN

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Schriften des Vereins zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse Wien](#)

Jahr/Year: 1987

Band/Volume: [126](#)

Autor(en)/Author(s): Skalicky Paul

Artikel/Article: [Elektronenmikroskopie in der Festkörperphysik. 269-296](#)