

ROBERT-WICHARD-POHL-PREIS

Eine Brille für Elektronen

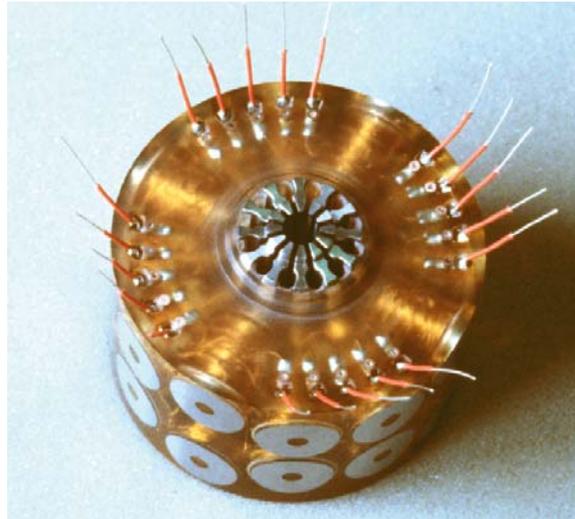
Neue elektronenoptische Komponenten ermöglichen Elektronenmikroskopie mit atomarer Ortsauflösung.

Harald Rose

Vor 2400 Jahren postulierte der griechische Philosoph Demokrit, dass alle Materie aus kleinsten unteilbaren Teilchen besteht, den Atomen. Seit dieser Zeit träumen Wissenschaftler davon, den atomaren Aufbau von Objekten sichtbar zu machen. Dieser Traum ist nun in Erfüllung gegangen: Das korrigierte Elektronenmikroskop erlaubt es, viele makroskopische Phänomene zu verstehen, deren Ursachen im atomaren Bereich liegen.

Viele Eigenschaften von Festkörpern und biologischen Objekten beruhen auf ihrer atomaren Zusammensetzung. Möchte man diese Eigenschaften oder die Interaktionen zwischen anorganischen und/oder organischen Objekten verstehen, ist es notwendig, die atomare Struktur und die lokale chemische Zusammensetzung dieser Objekte zu entschlüsseln. Während die Lichtmikroskopie aufgrund der vergleichsweise großen Wellenlänge dafür ungeeignet ist, erlaubt die Elektronenmikroskopie grundsätzlich Einblick in die Nanowelt. Daher hat sich das Elektronenmikroskop zu einem universellen und unverzichtbaren Instrument der Naturwissenschaften, der Medizin und der Technik entwickelt.

Aber erlaubt das Elektronenmikroskop auch das „Sehen“ der atomaren Welt? In seinem berühmten Vortrag „There's plenty of room at the bottom“ sagte Richard Feynman dazu 1959: „It would be very easy to make an analysis of any complicated chemical substance; all one would have to do would be to look at it and see where the atoms are. The trouble is that the electron microscope is one hundred times too poor. Is there no way to make the electron microscope more powerful?“ Doch warum reicht die Abbildungsqualität von Elektronenmikroskopen trotz der geringen Wellenlänge der Elektronen nicht aus? Weil es zum einen keine monochromatische Elektronenquelle gibt, denn die Elektronen sind Fermionen, deren Energiezustände sich voneinander unterscheiden müssen. Zum anderen lässt sich der elektronenoptische Brechungsindex von Elektronenlinsen räumlich nicht beliebig formen, weil er eine Funktion der elektromagnetischen Potentiale ist, die im Vakuum der Laplace-Gleichung genügen müssen. Da die Potentiale daher auf den Polschuhen oder Elektroden der Linsen Extremwerte annehmen, fokussieren die äußeren Zonen von runden Elektronenlinsen die Elektronen stärker als die inneren Zonen



Mit einem solchen Zwölfpolelement lassen sich überlagerte elektrische und magnetische Dipol-, Quadrupol-, Hexapol- und Oktupolfelder zur Korrektur von Elektronenmikroskopen erzeugen.

– das ist der Öffnungsfehler (sphärische Aberration, **Abb. 1**). Der Farbfehler (chromatische Aberration) hingegen kommt dadurch zustande, dass eine Elektronenlinse die Elektronen beim Durchgang umso stärker ablenkt, je kleiner deren Geschwindigkeit ist. Diese Eigenschaften fasst das Scherzer-Theorem zusammen: „Der axiale Farbfehler und der Öffnungsfehler statischer rotationssymmetrischer Elektronenlinsen sind unvermeidbar“ [1].

Leider ist der Öffnungsfehler von runden Elektronenlinsen sehr groß, sodass sich nur ein sehr kleiner Aperturwinkel nutzen lässt und selbst die besten Linsen nur eine Auflösung von ungefähr $d = 0,16 \lambda / \sin\theta \approx 100 \lambda$ liefern. Das ist mehr als hundertmal schlechter als bei einem guten Lichtmikroskop mit seinem etwa hundertmal größeren Aperturwinkel ($\theta \approx 90^\circ$). Im Prinzip

KOMPAKT

- Aufgrund des Öffnungs- bzw. Farbfehlers liefern selbst die besten Elektronenlinsen nur eine Auflösung von etwa dem Hundertfachen der Elektronen-Wellenlänge.
- Um diese Fehler zu korrigieren, sind Multipolelemente nötig, die den Strahl jedoch primär unrund verformen. Daher muss ein Korrektor mehrere Elemente so enthalten, dass sich diese primären Effekte aufheben und gleichzeitig eine Korrektur der Fehler möglich ist.
- Ein elektronenoptischer Aplanat erlaubt es, alle Punkte des Objektbereichs gleich gut abzubilden, wie es für ein Transmissions-Elektronenmikroskop – im Gegensatz zu einem Rastermikroskop – notwendig ist.
- Die Korrekturfelder müssen dabei äußerst stabil sein.

Prof. Dr. Harald Rose, Institut für Angewandte Physik, TU Darmstadt, Hochschulstr. 6, 64289 Darmstadt – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Robert-Wichard-Pohl-Preises 2009 auf der DPG-Frühjahrstagung in Dresden.

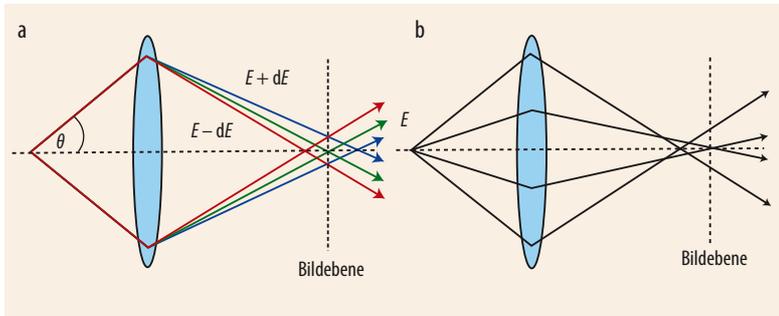


Abb. 1 Der axiale Farbfehler (a) und der Öffnungsfehler (b) in der Bildebene des Elektronenmikroskops schränken dessen

Auflösung ein. θ kennzeichnet den Aperturwinkel und dE die Energieabweichung.

lässt sich die Wellenlänge λ der Elektronen durch eine höhere Beschleunigungsspannung zwar beliebig verkleinern. Dies ist de facto aber nicht machbar, weil die von den Elektronen auf ein Atom übertragene Energie kleiner sein muss als dessen Bindungsenergie, um Strahlenschäden während der Aufnahme zu vermeiden. Die Ablösungsenergie der Atome ist an der Oberfläche größer als im Inneren des Objekts. Da die auf ein Atom übertragene Rückstoßenergie umgekehrt proportional zur Masse des Atoms ist, werden überwiegend die leichten Atome aus ihren Positionen herausgeschlagen. Um diese Strahlenschäden zu vermeiden, darf die mittlere Energie $E = E_0$ der einfallenden Elektronen einen objektspezifischen Schwellenwert E_s nicht übersteigen. Dieser Wert liegt zwischen 20 und 300 keV, für Halbleiter bei etwa 150 keV. Die Elektronen haben dann eine Wellenlänge von 3,2 pm, was einer Auflösung von 0,32 nm entspricht. Diese reicht aber nicht aus, um die atomare Struktur nichtkristalliner Bereiche zu bestimmen, weil hierfür $d \leq 0,1$ nm sein muss. Der nutzbare Aperturwinkel muss daher um mindestens einen Faktor 3 auf $\theta \approx 30$ mrad vergrößert werden. Dies ist nur mithilfe eines Korrektors möglich, der die unvermeidbaren axialen Fehler der Rundlinsen kompensiert.

Der Öffnungsfehler ist proportional zur dritten Potenz von θ , der Farbfehler proportional zur relativen Energieabweichung dE/E_0 der abbildenden Elektronen und zu θ . Der Farbfehler verringert sich daher für

Rundlinsen mit zunehmender Energie E_0 , sodass mit einer guten Elektronenquelle für $E_0 \geq 80$ keV der Öffnungsfehler dominiert. Für kleinere Energien begrenzen beide Fehler die Auflösung, weil man aufgrund der größeren Wellenlänge den Aperturwinkel erhöhen muss. Da die Schwellenwerte E_s organischer Objekte unterhalb 80 keV liegen, ist es für die hochaufgelöste Abbildung dieser Objekte notwendig, beide Fehler zu korrigieren. Aufgrund des Scherzer-Theorems benötigt ein Korrektor Multipolelemente, die jedoch primär den Elektronenstrahl unrund verformen und damit zu einem astigmatischen Strahlengang führen. Der Korrektor muss daher mehrere Elemente enthalten, um die primären astigmatischen Effekte hinter dem Korrektor aufzuheben. Außerdem muss es möglich sein, die verbleibenden Restfehler entgegengesetzt zum Öffnungsfehler und zum Farbfehler der Rundlinsen einzustellen [2].

Korrektur des chromatischen Fehlers

Der Farbfehler lässt sich bei festem Aperturwinkel reduzieren, indem man die Energiebreite dE der primären Elektronen mithilfe eines geeigneten Energiefilters verkleinert. Dieser sog. Monochromator entfernt alle Elektronen aus dem Strahl, deren Energieabweichung dE einen vorgegebenen Wert übersteigt, ohne den spektralen Richtstrahlwert (spectral brightness) zu beeinflussen. Diese Bedingung erfüllt der elektrostatische Monochromator aus Abb. 2 weitgehend. Er besteht aus vier gekrümmten Elektrodenpaaren, die symmetrisch angeordnet sind und so erregt werden, dass sich hinter dem Filter die Energieabhängigkeit der Ablenkung (Dispersion) und alle Strahlverzerungen aufheben. Die Dispersion ist in der Mitte des Filters maximal, wo ein Bild der Quelle liegt. Das polychromatische Bild der Quelle besteht dort aus einer linearen Kette von monochromatischen Bildern, die in Richtung der Ablenkung räumlich gegeneinander verschoben sind. Daher lassen sich mit einer Schlitzblende alle Elektronen ausblenden, deren Energien nicht innerhalb eines Energiefensters mit wählbarer Breite liegen [3].

Um kleine Energiebreiten bei vorgegebener Schlitzbreite zu erreichen, wird der Monochromator hinter der Elektronenquelle an einer Stelle integriert, wo die Energie der Elektronen erst einige keV beträgt. Der Monochromator verringert zwar den Strahlstrom, gleichzeitig ermöglicht er aber in Verbindung mit einem abbildenden Energiefilter lokale Spektroskopie mit einer Energieauflösung besser als 0,1 eV.

Der für die Abbildung notwendige Strahlstrom begrenzt bei gegebener Belichtungszeit die Reduktion des Farbfehlers durch einen Monochromator. Wenn dieser Strom zu klein ist oder die unelastisch gestreuten Elektronen zur Abbildung dienen sollen, ist die vollständige Korrektur des Farbfehlers notwendig. Da dieser Fehler von erster Ordnung in θ ist, sind für seine Korrektur Elemente notwendig, die die achsen-

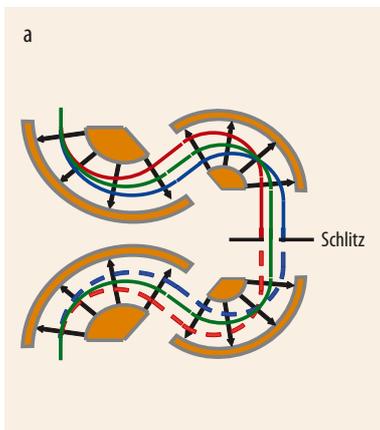
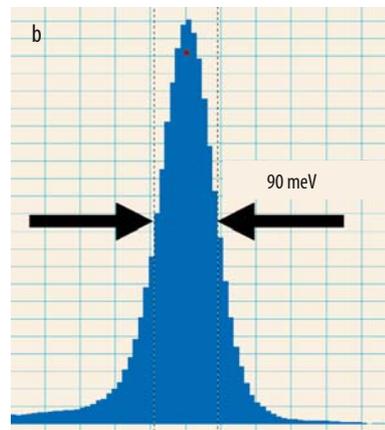


Abb. 2 Innerhalb des elektrostatischen Elektronen-Monochromators verlaufen die optischen Achsen für verschiedene Energien unterschiedlich (a). Der Schlitz



in der Mitte ermöglicht es, die Energie auszuwählen mit einer Energiebreite kleiner als 0,1 eV (b).

E. Essers, Zeiss

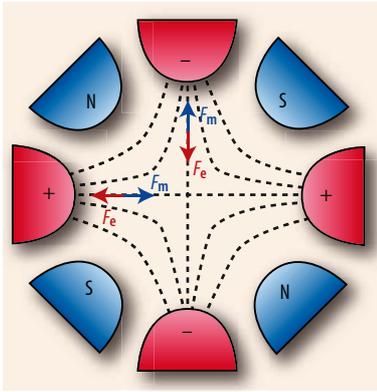


Abb. 3 Ein Wien-Filter erster Ordnung besteht aus gekreuzten elektrischen und magnetischen Quadrupolelementen. Für Elektronen mit $v = v_0$ kompensiert die elektrische Kraft \vec{F}_e die magnetische Kraft \vec{F}_m .

nahen Bahnen derart ablenken, dass die Elektronen mit nomineller Energie E_0 unbeeinflusst bleiben. Das Wien-Filter erster Ordnung, gebildet aus überlagerten gekreuzten elektrischen und magnetischen Quadrupolfeldern, ist ein solches Element, wobei die elektrische Quadrupolstärke Φ_2 und die magnetische Quadrupolstärke Ψ_2 so gewählt sein müssen, dass die lateralen Komponenten der Lorentz-Kraft

$$F_x = F_{mx} + F_{ex} = 2e(v\Psi_2 - \Phi_2)x,$$

$$F_y = F_{my} + F_{ey} = -2e(v\Psi_2 - \Phi_2)y$$

für Elektronen mit nomineller Geschwindigkeit $v = v_0$ verschwinden (**Abb. 3**). Dies ist der Fall, wenn die Quadrupolstärken der Wien-Bedingung $v_0\Psi_2 = \Phi_2$ genügen. Elektronen mit Geschwindigkeit $v = v_0 + \Delta v$ werden abgelenkt, weil für diese Geschwindigkeit die Lorentz-Kraft nicht verschwindet. Anhand der resultierenden lateralen Kraftkomponenten

$$F_x = 2e\Delta v\Psi_2x,$$

$$F_y = -2e\Delta v\Psi_2y,$$

zeigt sich, dass für $\Psi_2 = |\Psi_2|$ die schnelleren Elektronen mit positiver Geschwindigkeitsabweichung $\Delta v > 0$ in x -Richtung defokussiert und in y -Richtung fokussiert werden. Für die langsameren Elektronen mit $\Delta v < 0$ ist die Ablenkung entgegengesetzt.

Um die chromatische Aberration der Rundlinsen zu beheben, müssen wir die schnelleren Elektronen zur Achse hinziehen und die langsameren Elektronen defokussieren. Das Quadrupol-Wien-Filter leistet dies in einer Richtung, verhält sich jedoch umgekehrt in der dazu senkrechten Richtung. Wenn wir daher das Element hinter die Objektivlinse setzen, können wir zwar die x -Komponente des Farbfehler korrigieren, jedoch auf Kosten einer Verdopplung der y -Komponente (**Abb. 4**)

Die beiden Komponenten des axialen Farbfehlers einer Rundlinse lassen sich jedoch unabhängig voneinander mit zwei Filtern beseitigen. Dazu müssen wir jedes Filter in eines von zwei zueinander orthogonalen astigmatischen Zwischenbildern der Objektebene positionieren. Bei der astigmatischen Abbildung wird jeder Objektpunkt in einen Strich abgebildet, d. h. sie ist nicht punktförmig (stigmatisch). Bei zwei orthogonalen astigmatischen Zwischenbildern verschwindet somit in einem Zwischenbild die x - und in dem anderen die y -Komponente der axialen Elektronenbahn. Die

beiden astigmatischen Zwischenbilder lassen sich am einfachsten innerhalb eines teleskopischen Quadrupol-Quadrupletts erzeugen, wobei die beiden inneren Quadrupole elektrisch und magnetisch erregt werden (**Abb. 5**).

Alternativ lassen sich die beiden Komponenten des Farbfehlers auch dann weitgehend unabhängig voneinander beheben, wenn wir je ein Filter in eines von zwei orthogonalen anamorphotischen Bildern der hinteren Brennebene der Objektivlinse (Beugungsebene) legen, wobei in einem Bild $x \gg y$ ist und in dem anderen Bild $x \ll y$. Die anamorphotische Abbildung bildet jeden Punkt der Objektebene auf einen Punkt der Bildebene ab. Sie ist also stigmatisch (punktförmig), verzerrt aber die Gestalt (morphos) des Objekts und bildet also z. B. ein Quadrat in ein langes Rechteck ab.

Korrektur des Öffnungsfehlers

Neben den axialen Bildfehlern der Objektivlinse begrenzen auch Instabilitäten der Linsenströme, der Hochspannung und des Objekthalters sowie Schwingungen der Mikroskopsäule und äußere elektromagnetische Störfelder die Auflösung eines Elektronenmikroskops. Wenn es gelingt, diese parasitären inkohärenten Einflüsse zu unterdrücken, lässt sich durch die Korrektur der Linsen-Aberrationen eine bessere Auflösung erhalten. Eine Auflösung von 0,1 nm in einem 200-kV-Elektronenmikroskop setzt z. B. voraus, das Feld der Objektivlinse auf ungefähr 10^{-7} konstant zu halten, was erst seit einigen Jahren möglich ist. Um den unvermeidbaren Öffnungsfehler der Rundlinsen direkt zu beeinflussen, benötigt man eine Kraft, die proportional zur dritten Potenz des Achsenabstands der von der Objektmitte ausgehenden Elektronen ist. Ein Oktupolfeld, das entlang der optischen Achse zentriert ist, liefert eine solche Kraft. Sie hat jedoch den Nachteil, dass ihre Richtung vom Azimutwinkel um die optische Achse abhängt und alle 45° das Vorzeichen ändert. Setzt man ein solches Element hinter die Objektivlinse, kann es daher den Öffnungsfehler nur in zwei zueinander senkrechten Schnitten beseitigen – auf Kosten einer Verdopplung des Fehlers in Richtung der Diagonalen. Die vollständige Korrektur ist jedoch bei einem stark astigmatischen Strahlengang mit drei Oktupolen möglich, wenn man zwei von ihnen in zueinander senkrechten

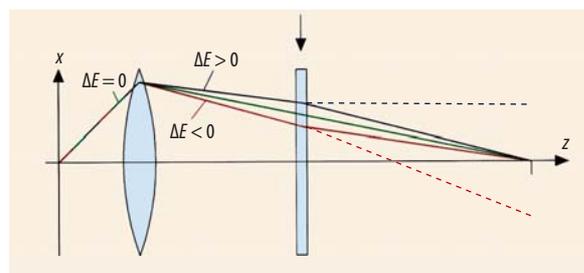


Abb. 4 Ein Quadrupol-Wien-Filter (Pfeil) hinter der Objektivlinse dient dazu, den axialen Farbfehler in einer Richtung zu korrigieren, hier im xz -Schnitt gezeigt (durchgezogene Linien). Im yz -Schnitt verdoppelt sich der Fehler jedoch (gestrichelt).

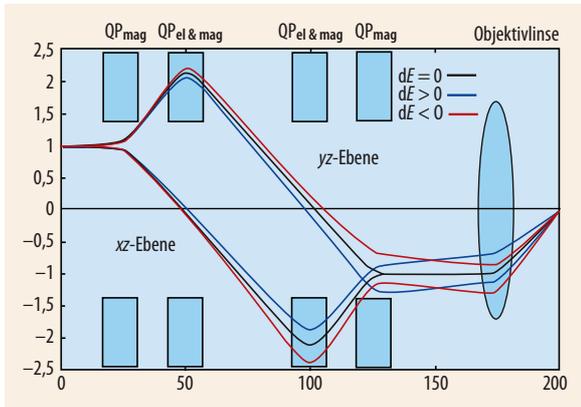


Abb. 5 Der axiale Farbfehler einer Elektronenlinse lässt sich mithilfe eines Korrektors aus zwei magnetischen Quadrupolen QP_{mag} und zwei gekreuzten elektrisch-magnetischen Quadrupolen $QP_{el \& mag}$ korrigieren. Die unrunde Verformung des achsennahen Bahnverlaufs durch den ersten Quadrupol kompensiert der letzte Quadrupol vor der Objektivlinse wieder.

astigmatischen Zwischenbildern der Objekt- oder anamorphotischen Zwischenbildern der Beugungsebene anordnet. Jeder der zugehörigen Strahlengänge lässt sich mit Quadrupolen erzeugen, die so angeordnet und erregt werden, dass sich alle Verzerrungen erster Ordnung hinter dem Korrektor gegenseitig aufheben. Die Quadrupole verursachen einen zusätzlichen unrunder Öffnungsfehler dritter Ordnung, der von den drei Oktupolen zusammen mit dem der Rundlinsen korrigiert wird. Mithilfe des in Abb. 5 skizzierten Korrektors zur Kompensation des Farbfehlers lässt sich daher zusätzlich der Öffnungsfehler korrigieren. Hierzu erregt man in den Multipolelementen neben den Quadrupolfeldern zusätzliche Oktupolfelder. Die Korrektur umfasst drei entkoppelte Schritte (Abb. 6).

Da die Quadrupolfelder die achsennahen Bahnen beeinflussen, müssen sie genauso stabil gehalten werden wie das Feld der Objektivlinse. In der Vergangenheit waren die notwendigen Stabilitäten der zahlreichen Quadrupolfelder nur schwer zu erreichen, sodass man nach einem anderen Korrekturprinzip mit geringeren Anforderungen an die Stabilität suchte. Für mittlere Spannungen größer als ca. 200 kV existiert ein solches Korrekturverfahren, weil dann ein Monochromator den Farbfehler hinreichend reduzieren und ein einfacher Sextupol-Korrektor den Öffnungsfehler beseitigen kann. Da die Sextupolfelder die achsennahen Strahlen nicht beeinflussen, reicht eine relative Stabilität von einigen ppm aus. Diese vorteilhafte Eigenschaft und der einfache Aufbau des Korrektors haben wesentlich zur erfolgreichen Korrektur des Öffnungsfehlers von Elektronenmikroskopen beigetragen [5, 6]. Die besten korrigierten Elektronenmikroskope erreichen heute bei einer Beschleunigungsspannung von 300 kV eine Auflösung von 50 pm, was ungefähr dem Radius des Wasserstoff-Atoms entspricht.

Ein Sextupol erzeugt eine Kraft auf geladene Teilchen, deren Betrag mit dem Quadrat des Achsenabstands anwächst und deren Richtung vom Azimutwinkel um die optische Achse abhängt und alle 60°

ihr Vorzeichen ändert (Abb. 7). Daher verformt ein Sextupol ein achsenparallel einfallendes rundes Strahlenbündel dreizählig und fokussiert oder defokussiert die einzelnen Strahlen je nach ihrer azimuthalen Orientierung. Die Veränderung des Achsenabstands innerhalb des Sextupols entlang der optischen Achse führt infolge der nichtlinearen Kraft zu einer zusätzlichen rotationssymmetrischen radialen Aufweitung des Teilchenbündels, die proportional zur dritten Potenz des Achsenabstands der einfallenden Teilchen ist. Wenn es daher gelingt, die primären dreizähligen Bahnveränderungen zweiter Ordnung zu eliminieren, kann man mit der verbleibenden divergenten Restabweichung dritter Ordnung die entsprechende konvergente Bahnabweichung der runden Objektivlinse beheben.

Die primären Bahnabweichungen zweiter Ordnung lassen sich für ein System aus reinen Sextupolen nicht beseitigen, wohl aber für ein System bestehend aus zwei identischen Sextupolen und einem teleskopischen Rundlinsendublett. Die Mitte des ersten Sextupols muss dabei im vorderen Brennpunkt der ersten Rundlinse liegen und die Mitte des zweiten Sextupols im hinteren Brennpunkt der zweiten Rundlinse (Abb. 7). Dann wird der erste Sextupol seitenverkehrt auf den zweiten abgebildet, wodurch sich sämtliche primären Strahlverzerrungen zweiter Ordnung gegenseitig aufheben. Die Abweichungen dritter Ordnung der beiden

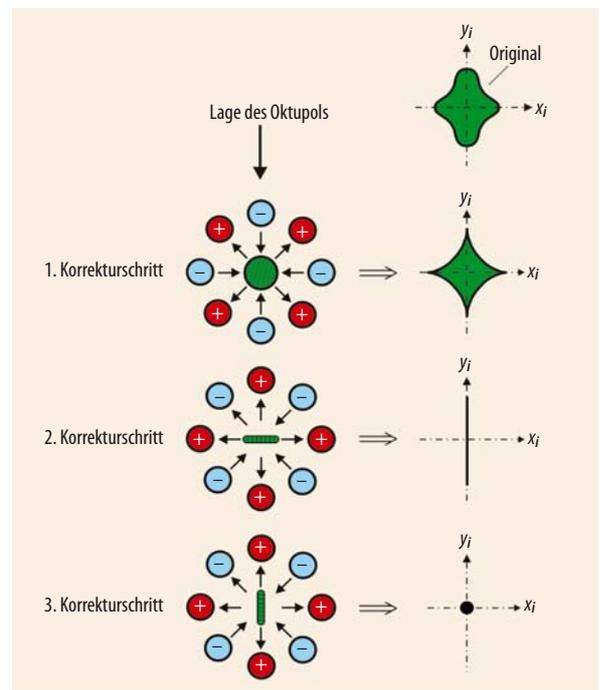
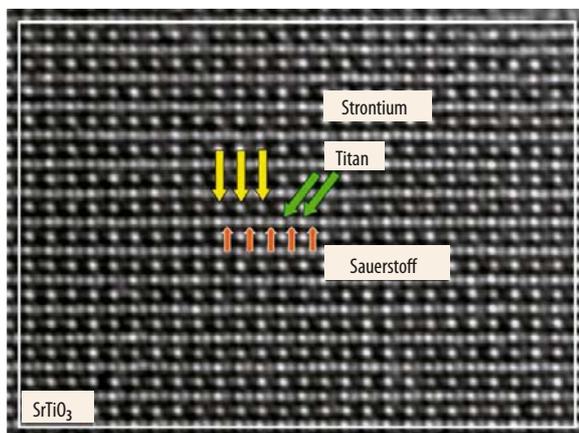


Abb. 6 Der Öffnungsfehler lässt sich durch drei Oktupole korrigieren. Der grüne Bereich im Zentrum der Oktupole ist der Querschnitt des axialen Strahlenbündels [4]. Im ersten Schritt wird die Fehlerkomponente in Richtung der Diagonalen in Bezug auf die Richtungen der beiden astigmatischen Zwischenbilder der Objektmitte korrigiert, wobei der Fehler eine sternförmige Figur annimmt. Der zweite Oktupol behebt die Fehlerkomponente in Richtung eines der beiden astigmatischen Bilder, wodurch die Fehlerfigur in einen Strich entartet, und im letzten Schritt beseitigt der dritte Oktupol den Fehlerstrich, sodass sich alle axialen Strahlen in der Bildmitte schneiden.

Abb. 9 Elektronenmikroskopische Aufnahme der Atomsäulen eines dünnen Strontiumtitanat-Kristalls mit dem ersten aberrationskorrigierten TEM.



K. Urban, FZ Jülich

genauso aufgebaut wie der Monochromator aus Abb. 2 [7]. Die Kombination aus elektrostatischem Monochromator und einem korrigierten Energiefilter ist im analytischen Hochleistungs-Elektronenmikroskop SESAM der Firma Zeiss realisiert, das im letzten Jahr am MPI für Metallforschung in Stuttgart in Betrieb gegangen ist und bereits eine Energieauflösung unter 50 meV erreicht hat [8].

Ein aussichtsloses Projekt

Mit der erfolgreichen Korrektur der unvermeidbaren Aberrationen runder Elektronenlinsen ist es mehr als vier Jahrzehnte nach Richard Feynmans Vision möglich, den atomaren Aufbau der Materie im Elektronenmikroskop direkt sichtbar zu machen. Monochromatoren, Energiefilter und Aberrations-Korrektoren ermöglichen neuartige Analyseverfahren, welche die atomare Struktur nichtkristalliner Objekte entschlüsseln können. Bei der Abbildung biologischer Objekte ist eine wesentlich bessere Auflösung mit niederenergetischen Elektronen und somit weniger Strahlenschäden möglich. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft, das Land Baden-Württemberg und die Firma Zeiss finanzieren seit Anfang 2009 im Rahmen des SALVE-Projekts die Entwicklung eines korrigierten Niederspannungs-Elektronenmikroskops für die Abbildung organischer Objekte, das zwischen 20 und 80 kV operieren wird. Das US Department of Energy fördert seit 2005 im Rahmen des TEAM-Projekts die Weiterentwicklung des korrigierten Elektronenmikroskops. Das TEAM-Mikroskop hat kürzlich als Auflösungsgrenze den Radius des Wasserstoffatoms erreicht ($d \approx r_H = 0,051 \text{ nm}$).

Die Historie des korrigierten Elektronenmikroskops ist gekennzeichnet durch scheinbar fruchtlose Bemühungen, ein „aussichtsloses Projekt“ zum Erfolg zu führen. Da es sämtlichen Forschungsgruppen und der Industrie bis Ende der Achtzigerjahre nicht gelungen war, atomare Auflösung zu erreichen, empfahl eine hochrangige Expertengruppe in den USA, die öffent-

liche Förderung auf diesem Gebiet einzustellen. Diesem Urteil schlossen sich die DFG und das BMBF an, jedoch nicht die Volkswagen-Stiftung, die das Risiko auf sich nahm und von 1992 bis 1997 ein neues gemeinsames Korrekturprojekt von M. Haider (EMBL), H. Rose (TU Darmstadt) und K. Urban (FZ Jülich) finanziell förderte. Mit dem damals entwickelten Sextupol-Korrektor reduzierte Haider kurz vor Ablauf der Förderung die Auflösungsgrenze von 0,21 auf 0,12 nm und erreichte damit atomare Auflösung. Dieser Erfolg ist ein lehrreiches Beispiel dafür, dass zukunftsweisende Fortschritte in der Wissenschaft innovative Ideen, Kooperation, langjährige und ausreichende finanzielle Förderung benötigen sowie den Willen und die Tatkraft, ein erfolgversprechendes Konzept auch gegen den allgemeinen Trend zu verfolgen.

*

Die erfolgreiche Korrektur der Elektronenlinsen und die Erzielung atomarer Auflösung im Elektronenmikroskop beruht wesentlich auf der Kooperation und dem unermüdlichen Einsatz zahlreicher Experten. Mein besonderer Dank gilt allen Mitarbeitern der Firma CEOS (Heidelberg), E. Essers und D. Preikszas (Zeiss) sowie K. Urban. Der Volkswagenstiftung danke ich für langjährige großzügige finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] O. Scherzer, Z. Physik **101**, 593 (1936)
- [2] O. Scherzer, Optik **2**, 114 (1947)
- [3] F. Kahl und H. Rose, Proc. 14th Intern. Conf. Electr. Microsc. Vol. **1**, 71 (1998)
- [4] H. Rose, Geometrical Charged-Particle Optics, Springer, Heidelberg (2009)
- [5] M. Haider, H. Rose, S. Uhlemann, B. Kabius und K. Urban, Nature **392**, 768 (1998)
- [6] K. Urban, Science **321**, 506 (2008)
- [7] S. Uhlemann und H. Rose, Optik **73**, 163 (1986)
- [8] E. Essers, D. Mittmann, T. Mandler und G. Benner, Proc. EMC 2008, Bd. **1**, 51, Springer (2008)
- [9] H. Rose, Optik **85**, 19 (1990)

DER AUTOR

Harald Rose (links, bei der Preisverleihung mit DPG-Präsident Gerd Litfin) hat als theoretischer Physiker die Grundlage für eine ganze Reihe experimenteller und technischer Durchbrüche in der Elektronenoptik geliefert. Nach seiner Promotion 1964 bei Otto Scherzer in Darmstadt hatte Rose verschiedene Positionen im In- und Ausland inne, bevor er 1980 auf eine Professur in Darmstadt berufen wurde, der er bis zu seiner Pensionierung im Jahr 2000 treu blieb.



K. Juszcak