

# Der späte Nobelpreis

Im Dezember jährte sich zum hundersten Mal der Geburtstag von Ernst Ruska, dem Begründer der Transmissionselektronenmikroskopie

Knut Urban

Als 22-jähriger Student der Elektrotechnik bewarb sich Ernst Ruska 1928 mit einer Studienarbeit um Aufnahme in das Institut für Hochspannungstechnik an der Technischen Hochschule Berlin. Im Rahmen von Diplom- und Doktorarbeit entstanden dann die optischen Grundlagen für das erste zweilinsige Elektronenmikroskop, mit dem der Postdoktorand 1933 erstmals Vergrößerungen erreichte, welche die des Lichtmikroskops übertrafen. Vor zwanzig Jahren erhielt er dafür den Nobelpreis für Physik.



Ernst Ruska an dem Elektronenmikroskop, mit dem er am 23. September 1933 erstmals die Auflösung des Lichtmikroskops übertraf. Zum Zeitpunkt der Aufnahme, am 8. Februar 1944, war das Gerät offenbar noch betriebsfähig.

Die Nachricht vom Nobelpreis kam völlig unerwartet.<sup>1)</sup> Mehr als fünfzig Jahre nach der Erfindung des Durchstrahlungselektronenmikroskops hatte niemand mehr damit gerechnet, dass sich jemand für einen Nobelpreis für Ernst Ruska einsetzen würde. Als häufiger und längerer Gast in Ruskas Abteilung im Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin-Dahlem erinnere mich noch gut daran, wie Anfang der Siebzigerjahre im Kreise der Mitarbeiter über die Hintergründe für die bis dahin ausgebliebene Ehrung diskutiert wurde. In der Tat überschatteten die Machtübernahme Hitlers und seine judenfeindliche Politik das Renommee von Wissenschaft und Technik in Deutschland just zu der Zeit, in der Ruska seinen Durchbruch in der Elektronenoptik erzielte. Zudem war Ruska Ingenieur und bekannte sich sein ganzes Leben lang zu diesem Beruf, und noch nie zuvor hatte ein Ingenieur einen Physik-Nobelpreis erhalten. Dennoch, als das Nobelpreis-Komitee ihn 1986 „für sein fundamentales Werk in der Elektronen-Optik und für die Konstruktion des ersten Elektronenmikroskops“ auszeichnete, war die Elektronenmikroskopie bereits

seit Jahrzehnten aus den modernen Natur- und Technikwissenschaften einschließlich der Medizin nicht mehr wegzudenken. Und in diesem Sinne erfüllt Ruskas Werk in ganz besonderem Maße den Grundsatz, den Alfred Nobel dem aus den Erträgen seines Vermögens gestifteten Preis zugrundegelegt hat.

## Geometrische Elektronenoptik

Bereits vor dem Nachweis, dass es sich bei Kathodenstrahlen um Elektronen handelte, berichteten Wilhelm Hittorf 1869 in Münster und Kristian Birkeland 1896 in Oslo, dass geeignet geformte axialsymmetrische Magnetfelder für diese Strahlen die Wirkung einer Sammellinse haben. Hittorf interessierte sich für die Natur der Glimmentladung in teilevakuieren Glasröhren, während Birkeland als Polarforscher sich mit Experimenten zur Entstehung des Polarlichtes beschäftigte. Zum eigentlichen Begründer der geometrischen Elektronenoptik wurde jedoch Hans Busch, der sich seit etwa 1910 in Göttingen mit entsprechenden Experimenten und dann 1926/27 in Jena mit der Theorie der „kurzen“ Magnetfeldspule

befasste. Busch interessierte sich für die hochgenaue Bestimmung der spezifischen Elektronenladung  $e/m$  und beteiligte sich mit seinen Rechnungen an der Optimierung der sog. Konzentrierungsspule, die zwar schon seit gut zwanzig Jahren zur Bündelung der Kathodenstrahlen in Braunschen Röhren verwendet wurde, aber in ihrer Wirkungsweise nicht verstanden war.

Busch löste die Bewegungsgleichungen der Elektronen in magnetischen und elektrischen Feldern und kam dabei unter Anderen zu den folgenden grundlegenden Ergebnissen [1, 2]:

■ Axialsymmetrische longitudinale magnetische und elektrische Felder zeigen für Elektronen die Wirkung einer Sammellinse, wobei für kleine Öffnungswinkel (achsennahe Strahlen) die aus der Gaußschen Lichtoptik bekannte Gleichung

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

mit der Gegenstandsweite  $g$ , der Bildweite  $b$  und der Brennweite  $f$  gilt. Dabei ist die Brennweite umgekehrt proportional zum Integral über die magnetische Feldstärke auf der optischen Achse zwischen Ausgangsebene und Bildebene.

■ Das Bild ist gegenüber der Aus-

1) Ernst Ruska erhielt die Hälfte des Nobelpreises zuerkannt, die andere Hälfte teilten sich Gerd Binnig und Heinrich Rohrer. Auf [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1986/](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1986/) sowie <http://ernst.ruska.de/> finden sich weitere Informationen zu Leben und Werk von Erich Ruska.

Prof. Dr. Knut Urban, Institut für Festkörperforschung und Ernst-Ruska-Centrum, Forschungszentrum Jülich, 52425 Jülich

gangsfläche im Verhältnis  $b/g$  vergrößert oder verkleinert.

■ Für Strahlen, die einen größeren Winkel mit der optischen Achse einschließen, zeigen diese Linsen das aus der Lichtoptik bekannte Phänomen der sphärischen Aberration. Damit war der Rahmen für die Elektronenoptik abgesteckt, die anschließend unter anderen von Busch selbst, Walter Glaser in Prag und von Otto Scherzer in Darmstadt weiter ausgearbeitet wurde.

Im Jahr 1928 gründete Adolf Matthias, Professor für Hochspannungstechnik an der Technischen Hochschule Berlin, eine neue Arbeitsgruppe unter der Leitung von Max Knoll, welche die Aufgabe hatte, auf der Basis der Braunschen Röhre einen leistungsfähigen, schnellen Kathodenstrahloszillographen zu entwickeln, der es erlaubte, die durch Blitzeinschläge und Schaltvorgänge in Hochspannungsleitungen ausgelösten „Wanderwellen“ zu untersuchen. Diese waren in der Elektrizitätswirtschaft gefürchtet, weil die damit verbundenen Feldspitzen in Transformatoren und Generatoren große Schäden anrichteten. Die für eine Steigerung der Schnelligkeit



Abb. 1 Ernst Ruska 1928 als 22-jähriger Student der Elektrotechnik

und der zeitlichen Auflösung notwendige Erhöhung der Stromdichte der Kathodenstrahlen hoffte man auf elektronenoptischem Wege zu erreichen. Doch Buschs Theorie galt noch immer nicht als gesichert, zumal Buschs eigene, inzwischen eineinhalb Jahrzehnte alte experimentelle Resultate aus der Göttinger Zeit viel zu ungenau waren, und insbesondere die gemessenen Werte der optischen Vergrößerung um mehr als eine Größenordnung von den berechneten abwichen.

### Der eigentliche Durchbruch

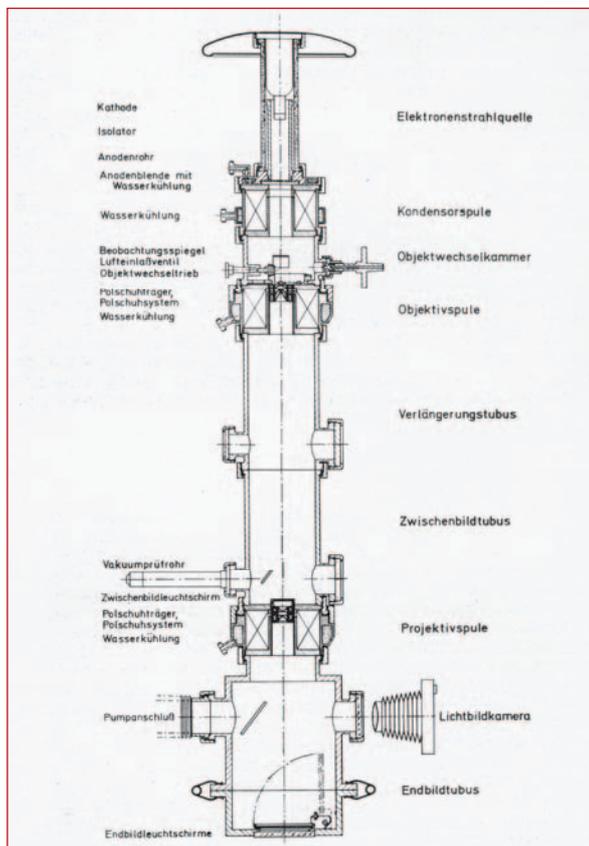
Als sich Ernst Ruska nach nur drei Jahren Studium der Elektrotechnik mit 22 Jahren (Abb. 1) bei Matthias um eine Studienarbeit bewarb, welche Voraussetzung für eine Zulassung für eine Diplomarbeit war, wurde ihm die experimentelle Überprüfung von Buschs Theorie übertragen. Mit dazu eigens entworfenen und gebauten Apparaturen, die erstmals hochgenaue und in allen notwendigen Parametern reproduzierbar kontrollierte Experimente erlaubten, gelang es Ruska

Abb. 2 Diese Zeichnung von 1976 zeigt das zweilinsige Elektronenmikroskop, mit dem Ruska am 23. September 1933 der Durchbruch gelang (vgl. Foto auf S. 37). Die Elektronen werden mit einer Spannung von 60 kV beschleunigt (oben). Nach zweistufiger Vergrößerung mithilfe der Objektivlinse und der nachvergrößernden Projektivlinse entsteht das Bild unten auf einem Leuchtschirm.

in seiner Studienarbeit, die Abbildungseigenschaften der magnetischen Linse und nach deren erfolgreichem Abschluss im Rahmen der Diplomarbeit die der elektrostatischen Linse zu messen und damit Buschs Theorie bis auf wenige Prozent genau zu bestätigen [3–5]. Dies bedeutete den eigentlichen Durchbruch der geometrischen Elektronenoptik, und es waren diese Experimente, die vom Nobelpreis-Komitee als einer der Gründe für die Vergabe des Nobelpreises an Ruska hervorgehoben wurden.

Die Verbesserung des Kathodenstrahloszillographen war auch dann noch das Ziel, als Ruska und Knoll unmittelbar nach der Abgabe von Ruskas Diplomarbeit daran gingen, eine verbesserte Versuchsanordnung mit zwei magnetischen und zwei elektrostatischen Linsen zu bauen. Auch in diesem Fall fanden sie im Zusammenwirken dieser Linsen – die elektrostatischen Linsen konnten dabei auch als Zerstreuungslinsen geschaltet werden – die Gesetze der Gaußschen Optik bestätigt. Insbesondere realisierten sie dabei am 7. April 1931 zum ersten Mal eine zweistufige Abbildung einer Netzblende, indem sie die Geometrie so wählten, dass das mit der ersten magnetischen Linse erzeugte reelle Zwischenbild mit der zweiten Linse nachvergrößert wurde. Die erzielte Vergrößerung lag zwar nur bei etwa dem 17-fachen. Dennoch war ein entscheidendes Prinzip gezeigt, welches in der Folge die Voraussetzung für die Konstruktion des Elektronenmikroskops bildete. Die Ergebnisse wurden von Knoll im öffentlichen Cranz-Kolloquium der Technischen Hochschule am 4. Juni 1931 vorgetragen.

Obwohl die beiden Forscher zu dieser Zeit bereits darüber diskutierten, ob es mit Hilfe elektronenoptischer Vergrößerung möglich sein würde, eine höhere Auflösung als im Lichtmikroskop zu erreichen, vermieden sie zunächst, von einem Elektronenmikroskop zu sprechen. Dennoch wurde dieser Begriff zum ersten Mal von Knoll und Ruska eingeführt und zwar in einer am 10. September 1931 eingereichten Publikation [5].



Interessant ist für uns im Rückblick, wie unabhängig voneinander sich die beiden Welten der in diesen Jahren geradezu überschießend aufblühenden Physik und der auf ihre Weise ebenso aktiven Elektrotechnik entwickelten. Bereits 1908 hatte Einstein auf der 81. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte in Salzburg den Welle-Teilchen-Dualismus angesprochen, 1924 hatte de Broglie in seiner Doktorarbeit die Hypothese eingeführt, dass der bewegten Masse eine Materiewelle zuzuordnen sei. Im folgenden Jahr hatte Einstein in der zweiten Abhandlung zur „Quantentheorie des einatomigen idealen Gases“ explizit den Wellencharakter der Materie betont. Und 1927 war von G. P. Thomson in Aberdeen der Wellencharakter der Elektronen durch die Beobachtung von Elektronenbeugung beim Durchgang durch dünne Metallfolien nachgewiesen worden.

## Die Geburtsstunde der Elektronenmikroskopie

Knoll und Ruska erfuhren davon erst fünf Jahre später, Anfang 1932. Ruska schreibt dazu [6]: „Ich erinnere mich auch heute noch lebhaft an die erste Diskussion zwischen M. Knoll und mir über diese neue Wellenart, denn ich war damals zunächst sehr enttäuscht darüber, daß nun doch wieder ein Wellenvorgang die Auflösung begrenzen sollte. Ich war erst wieder erleichtert, als ich mir unmittelbar danach anhand der de Broglie-Gleichung klargemacht hatte, daß diese Wellen um rund fünf Zehnerpotenzen kürzer als Lichtwellen sein sollten.“

Am 16. Juni 1932 reichten Knoll und Ruska eine Veröffentlichung mit dem Titel „Das Elektronenmikroskop“ bei der Zeitschrift für Physik [7] ein, in der sie zum ersten Mal die Auflösungsgrenze des Durchstrahlungselektronenmikroskops abschätzten, indem sie die de Broglie-Wellenlänge und einen angenommenen Wert für die numerische Apertur in die Abbesche Theorie einsetzten. Ruska schreibt dazu [6]: „Als wir dabei auf die

Größenordnung der Atomabstände kamen, zweifelten wir daran, ob insbesondere die Physiker uns ernst nehmen würden, hatten wir doch selbst experimentell bis dahin allenfalls 150fach vergrößerte Bilder... beobachtet. Ein Elektronenmikroskop war zwar verwirklicht, aber seine sublichtmikroskopische Auflösung stand 1932 erst als eine ... Hoffnung auf dem Papier.“

Ernst Ruska begann die Arbeit an seiner Dissertation bei Matthias im Jahre 1932. Er hatte sich das Ziel gesetzt, eine so genannte Polschuhlinse zu konstruieren und zu erproben. Dabei folgte er dem Ergebnis aus Buschs Theorie, nämlich, dass man die erwünschte kurze Brennweite einer Linse mit um so weniger Amperewindungen der stromdurchflossenen Spule realisieren könnte, je besser es gelingt, den Feldverlauf auf einen kleinen axialen Bereich zusammenzudrängen. Zusammen mit seinem Mitdoktoranden, Bodo von Borries, ließ er sich die Idee patentieren, die Linse ganz – bis auf einen schmalen Ringspalt – durch Eisen abzuschirmen, sodass das Feld auf diesen Ringspaltbereich zusammengezwängt wurde. Dieses Patent sollte sich in den folgenden Jahren als ganz außerordentlich nützlich erweisen. Wie er in seiner am 31. August 1933 eingereichten Dissertation zeigt, konnte Ruska mit dieser Art von Linse in einer Stufe bereits 20-fache Vergrößerung erreichen. Seither ist die Polschuhlinse die Grundlinse der Elektronenoptik geblieben.

Schon während der Arbeit an seiner Dissertation hatte Ruska am 13. März 1933 an die „Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft“, aus der später die Deutsche Forschungsgemeinschaft hervorgegangen ist, den Antrag gestellt, die Arbeiten zum Aufbau eines mindestens 10000-fach vergrößernden Elektronenmikroskops zu unterstützen. Durch Fürsprache von Max von Laue, der damals Gutachter war, erhielt Ruska dann ein Stipendium von 100 Reichsmark pro Monat zur Bestreitung, wie es heißt, „sachlicher und persönlicher“ Ausgaben.

Das auf dieser Basis nach Abgabe seiner Dissertation – wir würden

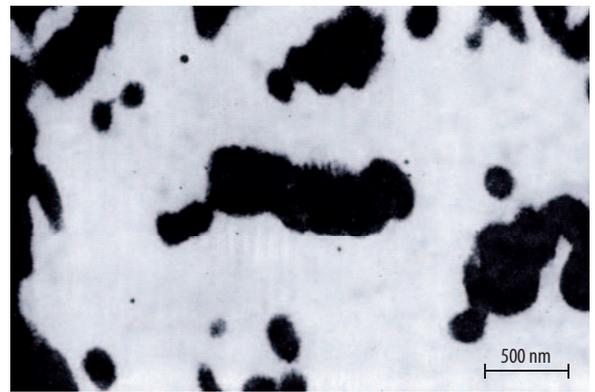


Abb. 3 Elektronenmikroskopische Aufnahme einer geätzten polykristallinen Silberfolie bei einer Primärvergrößerung von 2500. An den Kanten der dunklen Löcher sind Einzelheiten, Kristallkanten, mit Dimensionen von 45 Nanometern nachweisbar. Die Aufnahme wurde in den 1930er-Jahren an der TH mit dem Gerät gemacht, das Ruska als Postdoc aufgebaut hatte [8].

heute sagen, in seiner Postdoktorandenzeit – in einer Rekordzeit von lediglich vier Wochen aufgebaute Gerät verfügte bereits über ein Kondensatorbeleuchtungssystem (Abb. 2, 3). Mit diesem Gerät erzielte Ruska am 23. September und 8. Dezember 1933 Aufnahmen, die mit 8000- bzw. 12000-facher Vergrößerung die Auflösung des lichteoptischen Mikroskops deutlich überschritten. Der 23. September 1933 bezeichnet die Geburtsstunde der Transmissions-elektronenmikroskopie.

Nun kommt ein Kapitel in der Erfolgsgeschichte des Elektronenmikroskops, das im Rückblick in besonderem Maße modern erscheint [9]. Ernst Ruska und Bodo von Borries, den Ruska dazu bewegen konnte, seine im April 1933 in Essen angetretene Industrieposition wieder aufzugeben, um nach Berlin zurückzukehren, versuchten die Industrie für eine Weiterentwicklung des Elektronenmikroskops zu einem kommerziellen Produkt zu gewinnen. Sie hielten dazu zahllose Vorträge und besuchten eine Vielzahl von Firmen und Forschungsinstituten. Dennoch erwiesen sich die Bemühungen als vergeblich. Tatsächlich war es zu dieser Zeit schwierig, das Potenzial der Elektronenmikroskopie für Wissenschaft und Technik abzuschätzen. Ohne Zweifel waren hohe Investitionen nötig, um auf der Basis des Labor-musters ein kommerzielles, verlässliches Instrument zu bauen. Andererseits waren die bis dahin erzielten



Abb. 4 Ernst Ruska an einem der ersten Geräte des legendären Typs ELMISKOP I, ca. 1955.

wissenschaftlichen Resultate eher desillusionierend. Die einschlägigen Experten – die Forschung war damals überwiegend an biologischen Fragestellungen interessiert – bezweifelten, ob mit der Beobachtung von Präparaten, die infolge des Wasserentzugs durch das Vakuum und dann durch die Strahlenschädigung und Erwärmung eher der Asche statt lebenden Zellen glichen, überhaupt etwas zu gewinnen war.

### Kommerzieller Erfolg ...

Auch hier zeigt sich wieder ein Muster, das sich durch die ganze industrielle Innovationsgeschichte hindurchzieht. Innovation ist für den Unternehmer zugleich Chance und Risiko. Diese Dichotomie zu bewältigen wird dadurch noch schwieriger, als das Potenzial eines neuen Produktes im Allgemeinen um so schwerer erkennbar und sein wirtschaftlicher Erfolg um so weniger leicht abschätzbar ist, je innovativer es ist. Dieses unternehmerische Risiko wird gerade von Wissenschaftlern viel zu häufig unterschätzt. Letztendlich, und auch da ist dieser Fall eigentlich typisch, sind es die Visionen Einzelner, welche den Ausschlag geben. In der Tat schrieb Ende 1936 Richard Siebeck,

Direktor der Medizinischen Klinik der Berliner Charité, ein sehr positives Gutachten. Dieses gab den Ausschlag dafür, dass sich nach rund zweijährigem fruchtlosem Bemühen sowohl Zeiss als auch Siemens bereit erklärten, in die Entwicklung von kommerziellen Elektronenmikroskopen einzusteigen. Ruska und von Borries gaben Siemens den Vorzug. Neben der Erfahrung bei Siemens im Hochspannungsbereich spielte dabei auch die Tatsache eine Rolle, dass ein leitender Mitarbeiter der Siemens-Schuckert-Werke, Reinhold Rüdberg, der von Ruskas und Knolls Arbeiten erfahren hatte, die mehrstufige Vergrößerung mit magnetischen und elektrostatischen Linsen zum Patent angemeldet hatte. Dies geschah am 30. Mai 1931 und damit nach der Realisierung der ersten zweistufig vergrößerten Abbildung, aber noch vor Einreichung der Publikation vom 10. September 1931, in der diese Ergebnisse mitgeteilt wurden [5]. Nach geltendem Recht stand ihm und seiner Firma damit das Patent zu und dementsprechend wurde es, allerdings wegen des Kriegs verzögert, 1953 erteilt. Dieses Patent und das von Ruska und von Borries für die Polschuhlinse bildeten die Grundlage für einen erfolgreichen Einstieg und später jahrzehntelangen kommerziellen Erfolg von Siemens in der Elektronenmikroskopie.

So entstand in Berlin-Spandau im Frühjahr 1937 das „Labor für Übermikroskopie“ der Siemens und Halske AG. Die Arbeitsgruppe umfasste neben Ruska und von Borries, Walter Glaser, H. O. Müller auch den Bruder Ernst Ruskas, Helmut, der als Biochemiker und Mediziner viel zum Durchbruch der Elektronenmikroskopie in den Lebenswissenschaften beigetragen hat. 1940 gelangen ihm die ersten elektronenmikroskopischen Abbildungen von Viren. Bereits ein Jahr nach der Gründung des Labors gelang es, das erste von zwei Vorseriengeräten in Betrieb zu nehmen. Es erreichte bei einer Beschleunigungsspannung von 75 kV eine 30 000-fache Vergrößerung und eine Punktauflösung von 13 Nanometern. Das erste Seriengerät

wurde Ende 1939 im Physikalischen Laboratorium des IG-Farben-Werks in Hoechst aufgestellt. Von diesem Typ konnten bis zur Zerstörung der Labor- und Produktionsanlagen 1944 dreißig weitere Geräte gefertigt werden. Zu Kriegsende waren in 35 Instituten Elektronenmikroskope installiert, und bis dahin waren über 200 wissenschaftliche Publikationen erschienen. Die Arbeit bei Siemens wurde nach Kriegsende bereits 1946 wieder aufgenommen, und die ersten neuen Elektronenmikroskope vom Typ UEM 100 wurden bereits 1949 an die Kunden ausgeliefert. In der Folge entwickelte Ruska das legendäre Elmiskop I, das 1954 auf den Markt kam und von dem Siemens in den folgenden zehn Jahren über tausend Exemplare verkaufen konnte (Abb. 4).

### ... und Fehlentscheidungen

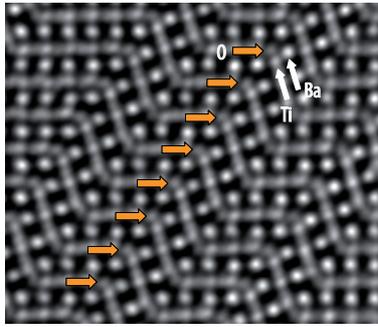
Jetzt allerdings beginnt ein Kapitel, das auf seine Weise wiederum ein Lehrstück ist. Trotz des kommerziellen Erfolges beschloss nämlich die Unternehmensleitung Mitte der Fünfzigerjahre, die Elektronenmikroskopentwicklung herunterzufahren, weil ihr das Mithalten an der Spitze der technischen Entwicklung zu kostspielig erschien. Aus ihrer Sicht ging ein zu großer Teil der wirtschaftlichen Erträge als Investition in die Entwicklung hin zu höherer Leistung, insbesondere zugunsten des Ziels, eine höhere Auflösung zu erzielen. Man stellte sich vor, dass man mit der Bedienung des Massenmarktes, der nicht auf Front-End-Qualitäten angewiesen ist, besseres Geld verdienen würde. Diese Entwicklung war Anlass für Ruska, sich nach zwanzig Jahren von Siemens zu trennen. Er wurde 1955 Wissenschaftliches Mitglied der Max-Planck-Gesellschaft und zwei Jahre später Direktor am Fritz-Haber-Institut in Berlin-Dahlem, das zu dieser Zeit von Max von Laue geleitet wurde. Ruska widmete sich von da an in der neuen Abteilung für Elektronenmikroskopie dem Ziel, das Auflösungsvermögen des Elektronenmikroskops so weit zu verbessern, dass man eines Tages

den Traum realisieren könnte, die Struktur fester Stoffe atomar aufgelöst, das heißt Atom für Atom, untersuchen zu können.

Eine Station auf diesem Weg war die Realisierung der „Einfeld-Kondensator-Objektivlinse“, die von Glaser bereits 1940 berechnet worden war. Der Aufbau des Linsenpolschuhs ist symmetrisch. Der obere Teil wirkt als Kondensorlinse, der untere Teil hat die Funktion der Objektivlinse. Die Probe wird von der Seite und nicht wie bis dahin üblich von oben in den Linsenspalt, den Ort des maximalen magnetischen Feldes, eingesetzt. Diese Art der Linse ist in Varianten noch heute Standard in allen Arten von Elektronenmikroskopen.

Ernst Ruskas Trennung von Siemens steht am Anfang einer schwierigen Zeit für die deutsche elektronenoptische Industrie. Die folgende Entwicklung bestätigte die Regel, dass im Hochtechnologiebereich am Massenmarkt nur der dauerhaft Erfolg haben kann, der auch die Front-End-Szene beherrscht. Tatsächlich erreichten die japanischen Elektronenoptikfirmen Hitachi und JEOL in den Sechziger- und frühen Siebzigerjahren durch eine Kaskade von Innovationen die intellektuelle Führerschaft auf dem Gebiet der Elektronenoptik und als Folge davon die absolute Marktführung. Alle weiteren Neuerungen kamen von jetzt an aus Fernost.

Und Ernst Ruska litt unter den Auswirkungen. Einmal persönlich, weil er den Rückgang der Forschung in Deutschland von Anfang an verurteilt hatte, zum anderen weil zu erwarten war, dass die Elektronenoptik in Deutschland im Sog einer untergehenden deutschen Elektronenoptik-Industrie weiter marginalisiert werden würde. Er sollte Recht behalten. Mitte der Achtzigerjahre stellte Siemens, nachdem der Markt verloren und trotz einiger später Versuche entwicklungsmäßig nicht mehr wiederzugewinnen war, die Produktion von Elektronenmikroskopen vollständig ein. In der Folge wurde der Finanzrahmen für öffentlich geförderte Forschungsprojekte auf diesem Gebiet immer enger gezogen, und ganz generell wurde



**Abb. 5** Eindrucksvoll zeigt diese Aufnahme von Zwillingskorngrenzen in  $\text{BaTiO}_3$ , die Leistungsfähigkeit eines aberrationskorrigierten Elektronenmikroskops (CM200 SAC, Jülich). Der Abstand der Sauerstoffmaxima von denen des benachbarten Titans beträgt 0,138 nm. Eine Analyse zeigt, dass die Sauerstoffpositionen in der Korngrenze (orange Pfeile) nur zu 68 % besetzt sind und dadurch die Titanatome über die Zwillingsgrenze um 0,05 nm auseinanderdrücken, während die Ba-O-Atomreihen um 0,015 nm zusammenrücken [11].

die Forschung auf diesem Gebiet in Deutschland – Ruskas Dahlemer Institut mit eingeschlossen – zunehmend in Frage gestellt. Dennoch: Als Ernst Ruska sich 1974 im Alter von 68 Jahren aus der Leitung seines Instituts zurückzog, war er einer der erfolgreichsten Wissenschaftler und Erfinder seines Jahrhunderts. Die Elektronenmikroskopie in allen ihren Formen war aus den Wissenschaften nicht mehr wegzudenken. Von der Physik über die Material- und Technikwissenschaften bis hin zu Biologie und Medizin verdankt die Menschheit unzählige Erkenntnisse und Errungenschaften der Elektronenmikroskopie.

Ernst Ruska starb im Alter von 81 Jahren am 27. Mai 1988. Es war ihm damit nicht mehr möglich, den neuen Aufbruch mitzuerleben, den die Transmissionselektronenmikroskopie in den Jahren nach 1997 durch die aberrationskorrigierte Elektronenoptik [10] erlebte. Dass diese Technik in Deutschland entwickelt wurde, hätte ihn mit besonderer Freude erfüllt. Die Rekonstruktion der quantenmechanischen Wellenfunktion in Verbindung mit Aberrationskorrektur erlaubt heute in der neuesten Generation von 300 kV-Mikroskopen ein Primärauflösungsvermögen von besser als 0,08 nm, und Atomabstände lassen sich auf etwa 5 pm genau

vermessen. Auch wenn in diesen Dimensionen der Begriff des Bildes zu ersetzen ist durch eine Kartierung der stationären Zustände des Elektronenwellenfeldes im interatomaren Potential, ist Ruskas Traum, eines Tages die atomare Struktur der Materie direkt im Elektronenmikroskop studieren zu können, wahr geworden (Abb. 5, [11]). In den nächsten Jahren wird zur Korrektur der sphärischen Aberration noch die Möglichkeit der chromatischen Korrektur der Elektronenlinsen hinzukommen. Damit wird die durch die Breite der Wellenfunktion gegebene quantenmechanische Grenze der Transmissionselektronenmikroskopie und damit die Grenze der Optik in kleinsten Dimensionen erreicht werden.

#### Literatur

- [1] H. Busch, Ann. d. Phys. **81**, 974 (1926)
- [2] H. Busch, Arch. f. Elektrotechnik **18**, 583 (1927)
- [3] E. Ruska und M. Knoll, Z. f. Techn. Physik **12**, 389 (1931)
- [4] E. Ruska, Diplomarbeit, Technische Hochschule Berlin, 1930
- [5] M. Knoll und E. Ruska, Ann. Physik **12**, 607 und 641 (1932)
- [6] E. Ruska, Die frühe Entwicklung der Elektronenlinsen und der Elektronenmikroskopie, Acta Historica Leopoldina **12**, 3 (1979)
- [7] M. Knoll und E. Ruska, Z. f. Physik **78**, 318 (1932)
- [8] D. Beischer und F. Krause, Naturwissenschaften **25**, 825 (1937)
- [9] L. Lambert und T. Mulvey, Ernst Ruska (1906-1988), Designer Extraordinaire of the Electron Microscope: A Memoir, Advances in Imaging and Electron Physics, Bd. 95, Academic Press, London, New York (1996)
- [10] M. Haider, S. Uhlemann, E. Schwan, H. Rose, B. Kabius und K. Urban, Nature **392**, 768 (1998)
- [11] C. L. Jia und K. Urban, Science **303**, 2001 (2004)

#### DER AUTOR

**Knut Urban** ist Direktor am FZ Jülich und Inhaber eines Lehrstuhls für Experimentalphysik an der RWTH Aachen. Im Rahmen seiner Doktorarbeit hat er einige Zeit bei Ernst Ruska gearbeitet. Er ist einer der beiden Gründungsdirektoren des Ernst-Ruska-Centrums für Elektronenmikroskopie und -spektroskopie, einer nationalen Nutzereinrichtung. Für seinen Anteil an der Entwicklung der aberrationskorrigierten Elektronenmikroskopie und die damit gewonnenen wissenschaftlichen Ergebnisse wurde Urban mehrfach ausgezeichnet. Darüber hinaus war er von 2004 bis 2006 Präsident der DPG, deren Vizepräsident er derzeit ist.

