

ANGEWANDTE CHEMIE

99. Jahrgang 1987

Heft 7

Seite 611–726

Das Entstehen des Elektronenmikroskops und der Elektronenmikroskopie (Nobel-Vortrag)**

Von Ernst Ruska*

1. Elternhaus, Familie

Die Nobel-Stiftung hat mir vor einem Monat ihr Jahrbuch von 1985 zugesandt. Aus ihm mußte ich entnehmen, daß viele Nobel-Vorträge regelrechte wissenschaftliche Vorträge sind – gespickt mit Kurven, Tabellen und Zitaten. Es widerstrebt mir ein bißchen, hier einen solchen Vortrag über etwas zu halten, was heute in jedem besseren Schul-Physikbuch nachgelesen werden kann. Ich werde Ihnen daher heute lieber etwas weniger von physikalischen und technischen Einzelheiten und deren Zusammenhängen, sondern statt dessen etwas mehr von den menschlichen Erfahrungen – einigen Freuden und vielen Enttäuschungen – berichten, die mir und meinen späteren Mitarbeitern bis zum endgültigen Durchbruch nicht erspart geblieben sind. Damit will ich mich aber keinesfalls beklagen, sondern ich halte solche Erlebnisse von Wissenschaftlern auf der Suche nach neuen Wegen für absolut verständlich, ja fast für normal. Selbstverständlich muß ich bei einer solchen Darstellung auch auf den Einfluß meiner Umwelt, insbesondere auch meiner Familie eingehen. In ihr gab es schon einige Wissenschaftler: Mein Vater, *Julius Ruska*, war Historiker der Naturwissenschaften in Heidelberg und Berlin; mein Onkel, *Max Wolf*, Astronom in Heidelberg; dessen Assistent, ein früherer Schüler meines Vaters und mein Patenonkel, *August Kopff*, Direktor des astronomischen Recheninstituts der damaligen Friedrich-Wilhelm-Universität in Berlin; ein Vetter meiner Mutter, *Alfred Hoche*, war

Professor für Psychiatrie in Freiburg/Breisgau; mein Großvater mütterlicherseits, *Adalbert Merx*, evangelischer Theologe in Gießen und Heidelberg.

Meine damals in Heidelberg wohnenden Eltern hatten sieben Kinder. Ich war das fünfte, mein Bruder Helmut, zu dem ich, soweit ich zurückdenken kann, ein besonders enges, freundschaftliches Verhältnis hatte, das sechste Kind. Optische Geräte haben auf uns beide früh einen tiefen Eindruck gemacht. Einige Male zeigte Onkel Max uns Kindern die Fernrohre der von ihm geleiteten Sternwarte auf dem Königstuhl bei Heidelberg. Auch mit dem Lichtmikroskop verbanden uns bald eindrucksvolle, wenn auch widersprüchliche Beziehungen. Mein Vater hatte im zweiten Stockwerk unseres Hauses zwei durch eine meist offene, sehr breite Schiebetür verbundene Studierzimmer, eines für seine wissenschaftshistorischen altsprachlichen Studien und eines für seine naturwissenschaftlichen Interessen, insbesondere Mineralogie, Botanik und Zoologie. Wenn ihm unsere Spiele mit den Nachbarskindern auf der Straße vor dem Haus zu laut waren, klopfte er an seine Fensterscheiben. Da dies meist nur eine kurzzeitige Wirkung hatte, klopfte er bald ein zweites Mal merklich lauter. Beim dritten Mal mußten Helmut und ich in sein Zimmer kommen und in zwei Meter Abstand von seinem Schreibtisch auf einem niedrigen Holzocker Rücken an Rücken bis zu einer Stunde lang sitsitzen. Dabei sahen wir auf dem Tisch des Nebenzimmers einen schönen, hellgelben Holzkasten, in dem sich sein großes Zeiss-Mikroskop befand, das auch nur zu berühren uns streng verboten war. Zwar zeigte er selbst uns öfters manches Interessante unter dem Mikroskop, doch fürchtete er mit Recht, daß Kinderhände durch unvorsichtigen Umgang mit Grob- und Feintrieb das Objektiv oder das Präparat verderben würden. Unsere ersten Beziehungen zum Wert der Mikroskopie waren also nicht nur positiv.

[*] Prof. Dr. E. Ruska
Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft
Faradayweg 4-6, 1000 Berlin 33

[**] Copyright © The Nobel Foundation 1987. – Wir danken der Nobel-Stiftung, Stockholm, für die Genehmigung zum Druck einer deutschen Fassung des Vortrags.

2. Schule, Berufswahl

Sehr viel positiver waren einige Jahre später der sehr gute Biologie-Unterricht meines Bruders Helmut an der Oberrealschule bei seinem Lehrer *Adolf Leiber* und der ebenfalls gute Physik-Unterricht, den ich am humanistischen Gymnasium durch meinen Lehrer *Karl Reinig* erhielt. Einen eindrucksvollen Bericht von dessen Persönlichkeit las ich übrigens vor kurzem zu meiner großen Freude in den Memoiren eines zwei Jahre älteren Schülers meiner Schule, des späteren theoretischen Physikers *Walter Elsasser*. Noch heute erinnere ich mich des tiefen Eindrucks, den *Reinigs* Ausführungen auf mich machten, daß die Bewegungen von Elektronen im elektrostatischen Kraftfeld nach den gleichen einfachen Gesetzen erfolgen wie die Bewegungen von trägen Massen in Gravitationsfeldern. Auch die durch die Wellenlänge des Lichts bedingte Grenze der mikroskopischen Auflösung versuchte er uns klarzumachen. Verstanden habe ich das damals sicher noch nicht, denn ich hatte bald darauf bei einem unserer vielen Waldspaziergänge in Heidelbergs Umgebung eine lange Diskussion darüber mit meinem damals schon zur Medizin tendierenden Bruder Helmut und meinem Klassenfreund *Karl Deißler*, der später ebenfalls Medizin studierte.

Im Gymnasium hatten wir zeitweise bis zu 17 Wochenstunden Unterricht in Latein, Griechisch und Französisch. Im Gegensatz zu meinem ungewöhnlich sprachbegabten Vater zeigte ich auf diesem Sektor nur äußerst mäßige Leistungen. Mein Vater, der als Lehrer auf der gleichen Schule täglich von seinen Kollegen von meinen Minusleistungen erfuhr, war geneigt, dafür meinen mangelnden Fleiß verantwortlich zu machen, so daß ich einige kummervolle Schuljahre hatte. Mein damaliger Griechisch-Lehrer, ein Studienfreund meines Vaters, sah die Dinge realistischer. Er schenkte mir zur Konfirmation das Buch „Hinter Pflug und Schraubstock“ des schwäbischen Pöten-Ingenieurs *Max Eyth* (1836–1906). Ich war immer schon von technischen Fortschritten begeistert, besonders interessierte ich mich später auch für die Entwicklung der Luftfahrt sowie den Bau von Luftschiffen und Flugzeugen. Das für einen jungen Menschen so eindrucksvolle Buch von *Max Eyth* veranlaßte mich dann endgültig zum Ingenieur-Studium. Mein Vater, der Naturwissenschaften an den Universitäten Straßburg, Berlin und Heidelberg studiert hatte, hielt das Studium an einer Technischen Hochschule offenbar für nicht ganz vollwertig und bot mir zur Probe ein Physik-Semester auf einer Universität an. Ich hatte aber das deutliche Empfinden, daß mir der Bereich der Technik mehr zusagte als der der Physik und lehnte ab.

3. Der Kathodenstrahloszillograph und die kurze Spule

Nach zwei Jahren Studium der Elektrotechnik in München wurde mein Vater 1927 zur Leitung eines neu zu errichtenden Instituts für Geschichte der Naturwissenschaften von Heidelberg nach Berlin berufen. So kam auch ich nach Absolvierung meines Vorexamens in München für die zweite Hälfte meines Studiums nach Berlin. Dort spezialisierte ich mich für Hochspannungstechnik und elektrische Anlagen und hörte hierzu u. a. die Vorlesungen

von Professor *Adolf Matthias*. Er berichtete uns am Ende seiner Vorlesung des Sommersemesters 1928 von seinem Plan, eine kleine Arbeitsgruppe zusammenzustellen, die aus der Braunschen Röhre einen leistungsfähigen Kathodenstrahloszillographen zur Messung von sehr schnell verlaufenden elektrischen Vorgängen in Kraftwerken und auf Hochspannungs-Freileitungen entwickeln sollte. Vielleicht mit der Erinnerung an meinen Physikunterricht in der Schule im Hinterkopf meldete ich mich sofort und wurde so der jüngste Mitarbeiter dieser von Dr.-Ing. *Max Knoll* geleiteten Gruppe. Meine ersten Gehversuche zum experimentellen Arbeiten habe ich in dem von Prof. *Jonathan Zenneck* geleiteten Physikalischen Praktikum an der Technischen Hochschule München und später in der Gruppe von *Max Knoll* gemacht. Als Neuling wurde ich von *Knoll* zunächst mit einigen fast immer auftretenden vakuumtechnischen Problemen beschäftigt. Durch die Persönlichkeit von *Max Knoll* wurde in der Gruppe ein kameradschaftliches Verhältnis gefördert, und in der nachmittäglichen gemeinsamen Kaffee-Stunde war eine offene Unterhaltung über die wissenschaftlichen und technischen Probleme der Arbeiten jedes Einzelnen üblich. Da ich nicht ungern rechnete und unser gemeinsames Ziel die Entwicklung von Kathodenstrahloszillographen für eine gewünschte Meßleistung war, wollte ich in meiner zur Zulassung für die Diplom-Hauptprüfung vorgeschriebenen „Studienarbeit“ eine geeignete Berechnungsmethode zur Dimensionierung solcher Kathodenstrahloszillographen ausarbeiten.

Die wichtigsten Einflußgrößen für Meßgenauigkeit und Schreibgeschwindigkeit von Kathodenstrahloszillographen sind der Durchmesser des Schreibflecks und dessen Energiedichte. Zur Erzeugung kleiner und heller Schreibflecke mußten die divergent von der Kathode ausgehenden Elektronenstrahlen wieder in einem kleinen Schreibfleck auf dem Leuchtschirm des Kathodenstrahloszillographen vereinigt werden. Hierzu war schon von *Rankin*^[1] eine auch vorher schon von früheren Experimentatoren bei Versuchen mit Glimm- bzw. Kathoden- bzw. Elektronenstrahlen benutzte kurze, von Gleichstrom durchflossene Spule verwendet worden. Schon 1869 hatte *Hittorf*^[2] das dreh-symmetrisch vor einem zylindrischen Magnetpol befindliche Feld zur Fokussierung von Kathodenstrahlen benutzt. Die Vorstellung von der Wirkung des axialsymmetrischen, also inhomogenen Magnetfelds solcher Pole oder Spulen auf das längs ihrer Achse verlaufende Elektronenbündel war indessen lange recht unklar geblieben.

Deshalb hatte 1927 *Hans Busch*^[3] in Jena die Bahnen der Elektronen in einem solchen Elektronenbündel berechnet und dabei gefunden, daß das Magnetfeld der kurzen Spule auf das Elektronenbündel wie eine Lichtlinse mit einer definierten Brennweite auf Lichtbündel einwirkt. Die Brennweite dieser „magnetischen Elektronenlinse“ läßt sich dabei mittels des Spulenstroms kontinuierlich verändern. *Busch* wollte seine Theorie im Experiment prüfen, konnte damals jedoch aus zeitlichen Gründen keine neuen Versuchsreihen durchführen, sondern griff auf Aufzeichnungen von Versuchen zurück, die er 16 Jahre zuvor in Göttingen gemacht hatte. Diese ergaben jedoch nur eine äußerst unbefriedigende Übereinstimmung des durch die Theorie geforderten Abbildungsmaßstabes mit dem Experiment. Vielleicht war das der Grund, warum *Busch* aus seiner Linsentheorie des axialsymmetrischen Magnetfelds nicht we-

nigstens die praktische Folgerung gezogen hat, mit einer solchen Spule irgend etwas abzubilden.

Um die durch eine kurze Spule erzeugbaren Eigenschaften des Schreibflecks eines Kathodenstrahloszillographen genauer in meine Dimensionierungsrechnungen einbeziehen zu können, prüfte ich mit einer einfachen Anordnung (Abb. 1) die Linsentheorie von *Busch* unter besseren, aber immer noch nicht genügend guten experimentellen Bedingungen nach und fand dadurch zwar bessere, aber immer noch nicht sehr befriedigende Übereinstimmung des Abbildungsmaßstabs mit *Buschs* theoretischen Erwartungen. Der Hauptgrund lag darin, daß ich eine Spule mit den Abmessungen der von *Busch* benutzten Spule verwendet hatte, deren Feldverteilung längs der Achse für *Buschs* und meine Versuche viel zu breit war. Meine 1929 der Fakultät für Elektrotechnik eingereichte Studienarbeit^[4] enthält zahlreiche mittels der kurzen Spule („magnetische Elektronenlinse“) aufgenommene verschieden stark vergrößerte, scharfe Bilder einer elektronendurchstrahlten Anodenblende von 0.3 mm Durchmesser, also die ersten festgehaltenen elektronenoptischen Abbildungen.

Aus der von *Busch* gefundenen Formel für die Brennweite des Magnetfeldes einer kurzen Spule war schon ersichtlich, daß man eine gewünschte Brennweite mit um so weniger Ampère-Windungen der Spule erzeugen kann, je mehr man das Spulenfeld auf einen kurzen Bereich der Achse beschränkt, weil sich dann das Feldmaximum erhöht. Für einen Elektrotechniker oder auch Physiker war

daher der von mir damals gemachte Vorschlag naheliegend, die Stromspule mit einem Eisenmantel zu umgeben, der nur im Innenrohr durch einen ringförmigen Spalt unterbrochen ist. Messungen an einer solchen Spule zeigten dann auch, daß dieselbe Brennweite mit deutlich weniger Ampère-Windungen erreicht wurde^[4,5]. Im Umkehrschluß erreicht man auf diese Weise natürlich auch bei gleicher Ampère-Windungszahl eine kürzere Brennweite.

4. Warum ich den Weg, ein Elektronenmikroskop mit magnetischer Elektronenlinse zu bauen, verfolgte

In meiner 1930 durchgeführten Diplomarbeit sollte ich nach einem elektrostatischen Ersatz für die magnetische Konzentration des divergenten Elektronenstrahlbündels suchen, weil ein solcher vielleicht einfacher und billiger sein würde. *Knoll* empfahl mir hierzu eine von ihm ein Jahr zuvor zum Patent^[6] angemeldete Anordnung von Lochelektroden mit verschiedenen elektrischen Potentialen experimentell auszuprobieren. Wir diskutierten die Form des elektrischen Feldes zwischen diesen Elektroden, und ich vertrat die Ansicht, daß wegen der spiegelbildlichen Symmetrie zur Linsenmitte eine konzentrierende Wirkung der gewölbten Äquipotentialflächen im Lochbereich nicht eintreten könne. Ich hatte damals nur die Feldgeometrie im Auge. Dabei hatte ich jedoch übersehen, daß mein Schluß wegen der stark unterschiedlichen Geschwindigkeit der Elektronen beim Durchlaufen einer solchen Feldanordnung falsch war und durchaus eine Konzentration des divergenten Elektronenbündels eintreten mußte. Auch *Knoll* bemerkte diesen Fehlschluß damals nicht. Daher beschränkte ich in meiner Diplomarbeit^[7] einen anderen Weg. Ich ließ das Elektronenbündel einen durchbohrten Kugulkondensator durchlaufen, bei dem die Bohrung in der Innenkugel auf beiden Seiten von feinmaschigen Drahtnetzen in der Form der Kugelfläche abgedeckt war. Mit dieser Anordnung erhielt ich seitenverkehrte Bilder im richtigen Abbildungsmaßstab. Etwas später kam ich auf eine leider nur theoretisch richtige Lösung. Ich wollte die Brechung der Lichtstrahlen beim Durchqueren optischer Linsen an deren „Grenzflächen“ zwischen Luft und Glas für elektrische Linsen durch Potentialsprünge an entsprechenden, d. h. wie bei Glaslinsen geformten „Grenzflächen“ ersetzen^[8]. Dadurch wird die Energie der Elektronenstrahlen beim Durchqueren dieser Linsen – ebenso wie die der Lichtstrahlen beim Durchqueren optischer Linsen – vorübergehend geändert. Zur Realisierung dieses Gedankens sind auf jeder Linsenseite zwei eng benachbarte feinmaschige Drahtnetze von der Oberflächenform optischer Linsen erforderlich, die auf verschiedenen elektrischen Potentialen gehalten werden müssen. Vorversuche zeigten die Richtigkeit dieser Idee, aber zugleich auch die praktische Unbrauchbarkeit solcher Netzlinsen wegen zu starker Absorption des Elektronenstrahls an den vier hintereinander liegenden Drahtnetzen und wegen der Feldverzerrung an deren Drähten. Infolge meines geschilderten Denkfehlers und aus der experimentellen Enttäuschung heraus beschloß ich, mich weiterhin lieber mit der magnetischen Linse zu befassen. Ich berichte das nur deshalb so ausführlich, weil man daraus sieht, daß man auch gelegentlich das Glück haben kann, ohne überlegene Geisteskräfte auf einen besseren oder gar auf den allein richtigen Weg zu

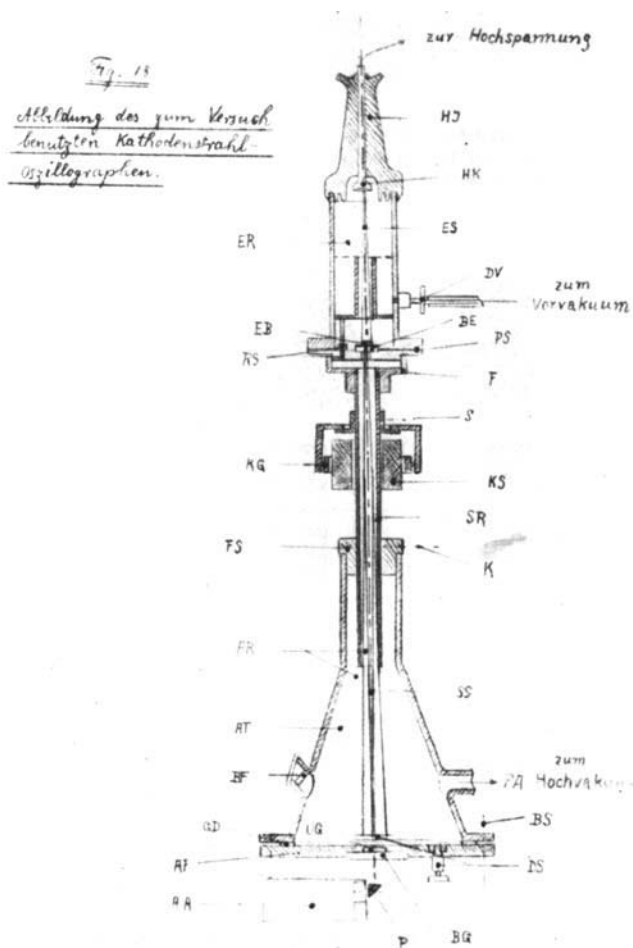


Abb. 1. Eine 1929 vom Verfasser angefertigte Skizze der Elektronenstrahlröhre zur Prüfung der Abbildungseigenschaften des inhomogenen Magnetfelds einer kurzen Spule [4, 5].

kommen. Der Weg des Durchstrahlungselektronenmikroskops mit Elektronenlinsen aus elektrostatischen Lochelektroden ist später von anderer Seite durch hervorragende Experimentatoren verfolgt worden und führte zu beträchtlichen Anfangserfolgen. Schließlich mußte er aber aufgegeben werden, weil diese Linse aus physikalischen Gründen der magnetischen Elektronenlinse unterlegen war.

5. Die Erfindung des Elektronenmikroskops

Die wirtschaftlichen Verhältnisse nach Abschluß meines Studiums zum Diplom-Ingenieur (Anfang 1931) waren in Deutschland so schlecht, daß es kaum möglich erschien, in der Industrie oder an einer Hochschule eine befriedigende Anstellung zu erhalten. Ich mußte deshalb froh sein, daß ich meine unbezahlte Tätigkeit als Doktorand im Hochspannungsinstitut fortsetzen konnte. Nachdem ich schon in meiner Studienarbeit von 1929 gezeigt hatte, daß man mit der kurzen Spule scharfe und auch vergrößerte Bilder von elektronendurchstrahlten Lochblenden erhalten kann, interessierte mich die nächstliegende Frage, ob man solche Bilder, wie in der Lichtoptik, durch eine dahintergeschaltete, zweite Abbildungsstufe weiter vergrößern könne. Eine entsprechende Apparatur mit zwei kurzen Spulen war aus meinen bisherigen Apparaturen schnell hergestellt (Abb. 2), und im April 1931 erhielt ich den einwandfreien Beweis, daß dies wie in der Optik möglich war (Abb. 3). Die damals benutzte Apparatur gilt heute mit Recht als erstes Elektronenmikroskop, wenn auch die Gesamtvergrößerung mit etwa $3.6 \times 4.8 = 17.4:1$ noch äußerst bescheiden war.

Der erste Nachweis, daß man außer mit Licht und Glaslinsen auch mit Elektronenstrahlen und Magnetfeldern Abbildungen durchstrahlter Objekte, zudem in mehr als einer Abbildungsstufe machen kann, war zwar nun geführt, aber was nutzte eine solche Abbildung, wenn selbst Platin- oder Molybdännetze bei einer für nur 17fache Vergrößerung erforderlichen Bestrahlungsdichte so heiß wurden, daß sie schmolzen. So vermied *Max Knoll* Anfang Juni 1931 in seinem Vortrag über Fortschritte beim Bau von Kathodenstrahloszillographen, in dem er auch meine elektronenoptischen Versuche erstmals ausführlich erläuterte^[9, 10], mit meinem Einverständnis noch das Wort *Elektronenmikroskop*, weil wir beide damals den Eindruck der Effekthascherei scheuten. Trotzdem schweiften unsere Gedanken natürlich in Richtung einer leistungsstärkeren Mikroskopie. Die vor über fünfzig Jahren von *E. Abbe* und anderen erkannte, durch die Lichtwellenlänge gegebene Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops konnte, da Licht nicht verwendet wurde, bei solchen Vergrößerungen keine Rolle spielen. *Knoll* und ich hofften zunächst einfach auf die äußerst geringen Abmessungen der Elektronen. Daß bereits einige Jahre vorher von dem Franzosen *de Broglie*^[11] die These der Materiewellen aufgestellt worden war, wußten wir als Ingenieure damals noch nicht. Auch von Physikern sind diese Thesen ja ebenfalls nur zögernd angenommen worden. Als ich im Sommer 1931 erstmals von dieser neuen These hörte, war ich sehr enttäuscht, daß nun auch beim Elektronenmikroskop die Auflösung wiederum durch eine Wellenlänge (der Materiestrahlung) begrenzt sein könnte. Ich war aber sofort wieder getröstet, als sich die neue Wellenlänge nach den Angaben von *de Broglie* als 10^5 mal kürzer als die Lichtwellenlänge erwies. Das war

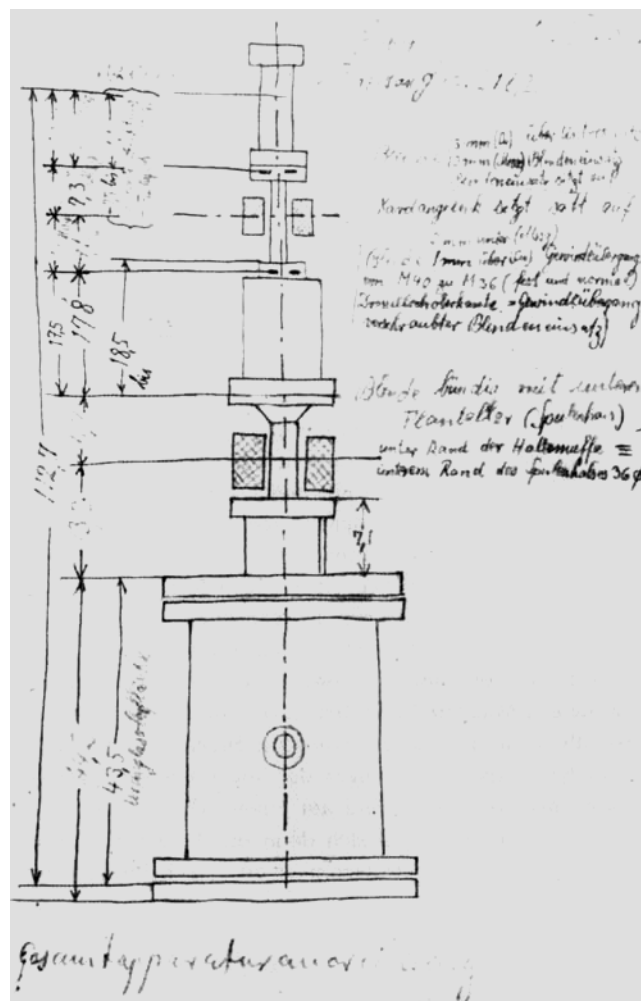


Abb. 2. Eine am 9. März 1931 vom Verfasser angefertigte Skizze der Elektronenstrahlröhre zur Prüfung der ein- und zweistufigen Abbildung mittels zweier magnetischer Elektronenlinsen (Elektronenmikroskop) [8].

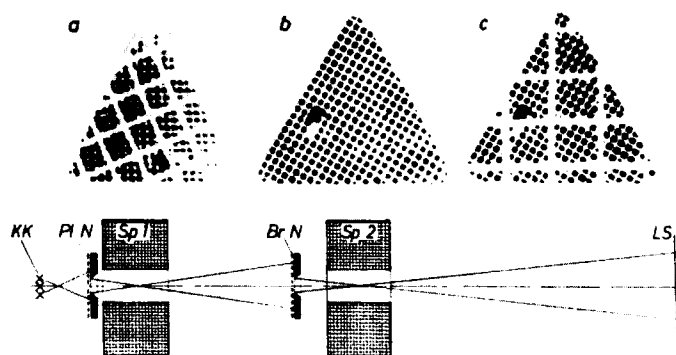


Abb. 3. Erster experimenteller Beweis (7. April 1931), daß mit Elektronen bestrahlte Objekte (Netze) nicht nur in einer Stufe, sondern auch in mehr als einer Stufe mittels (magnetischer) Elektronenlinsen vergrößert werden können ($U = 50$ kV) [8]. a) Einstufiges Bild des Platinnetzes vor der Spule 1; $M_{el} = 13:1$. b) Einstufiges Bild des Bronzenetzes vor der Spule 2; $M_{el} = 4.8:1$. c) Zweistufiges Bild des Platinnetzes vor der Spule 1 durch Spule 1 und 2; $M_{el} = 17.4:1$ zusammen mit dem einstufigen Bild des Bronzenetzes vor der Spule 2 durch Spule 2; $M_{el} = 4.8:1$.

also kein Grund mehr, das Ziel einer besser als das Lichtmikroskop auflösenden Elektronenmikroskopie aufzugeben.

Daher wagten *Knoll* und ich 1932 auch eine Prognose der Auflösungsgrenze des Elektronenmikroskops^[12]. Wir ersetzten in der Erwartung, daß die auf der Beugungstheorie der mikroskopischen Abbildung berechnete Gleichung für die Grenzauflösung des Lichtmikroskops auch für die

Materiewelle der Elektronen Gültigkeit habe, die Lichtwellenlänge durch die Elektronenwellenlänge bei der von uns angewandten Beschleunigungsspannung von 75000 V und setzten in die Gleichung die von uns damals benutzte Abbildungsapertur von 2×10^{-2} ein. Diese Abbildungsapertur wird auch heute noch benutzt. Dadurch kamen wir schon zu diesem frühen Zeitpunkt auf eine Grenzauflösung von $2.2 \text{ \AA} = 2.2 \times 10^{-10} \text{ m}$, ein Wert, der etwa 40 Jahre später experimentell erreicht wurde. Eine solche Aussicht wurde damals natürlich von den meisten Fachgenossen allenfalls als eine Illusion empfunden, keinesfalls aber ernstgenommen. Auch mir schienen seinerzeit die noch zu lösenden Probleme, darunter vor allem die Vermeidung der Objekterhitzung, nur sehr schwer bewältigbar zu sein. M. Knoll hatte schon im April 1932 bei Telefunken (Berlin) Aufgaben in der Entwicklung der Fernsehtechnik übernommen.

Mein Bruder Helmut, der damals vor dem Abschluß seines Medizinstudiums stand, hielt im Gegensatz zu vielen Biologen und Medizinern bei einem Erfolg auf diesem Weg sehr entscheidende Fortschritte in diesen Fächern für sicher. Er ermutigte mich mit seiner Zuversicht, die zu erwartenden Schwierigkeiten zu überwinden. Als nächstes mußte ich zeigen, daß man genügend hohe Vergrößerungen machen konnte, um eine bessere Auflösung als die des Lichtmikroskops beweisen zu können. Dazu war eine Spulenform zu entwickeln, deren Magnetfeld auf ein so kurzes Stück der Spulenachse zusammengedrängt ist, daß kurze Brennweiten möglich werden, wie sie für starkvergrößerte Bilder der Objekte in nicht zu großem Abstand hinter der Spule erforderlich sind. Die technische Lösung dafür hatte ich schon in meiner Studienarbeit von 1929 mit der Eisenkapselung angegeben. 1932 meldete ich zusammen mit meinem Kondoktoranden Bodo von Borries, mit dem ich mich angefreundet hatte, eine Optimierung dieser Lösung zum Patent^[13] an, die heute in allen magnetischen Elektronenmikroskopen verwendete „Polschuhlinse“. Ihre Realisierung sowie die Ausmessung der mit ihr verifizierbaren Brennweiten war das Thema meiner Doktorarbeit^[14]. Sie war im August 1933 beendet, und ich konnte bei den Messungen Brennweiten von 3 mm für Elektronenstrahlen von 75000 V Beschleunigungsspannung erreichen (Abb. 4).

Natürlich wollte ich nun sofort mit diesen Linsen ein zweites, wesentlich höher vergrößerndes Elektronenmikroskop bauen. Durch Fürsprache von Max von Laue erhielt ich dazu für die zweite Jahreshälfte 1933 von der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft 100 Reichsmark pro Monat für persönliche und sachliche Ausgaben. Da ich schon im November mit dem Bau, der Inbetriebnahme und der Erprobung des neuen Geräts (Abb. 5) fertig war, wollte ich die 100 Reichsmark für Dezember zurückzahlen, durfte sie aber zu meiner Freude „ausnahmsweise“ behalten. Es war trotzdem sicherlich der geringste Betrag, den je eine deutsche Organisation zur Wissenschaftsförderung für ein Elektronenmikroskop bezahlt hat.

Aus den nachfolgend erörterten Gründen hatte ich zum 1. Dezember 1933 eine Stellung in der Industrie angenommen. Daher konnte ich mit diesem bis zu 12000:1 vergrößernden Gerät^[15] nur noch wenige Aufnahmen machen. Dabei bemerkte ich aber glücklicherweise einen entscheidenden Umstand, der mich für die Zukunft hoffen ließ. Auch sehr dünne Objekte ergaben noch hinreichende Kon-

traste, jedoch nicht mehr durch Absorption, sondern allein durch Streuung der Elektronen, wobei die Objekte bekanntlich wesentlich weniger aufgeheizt werden.

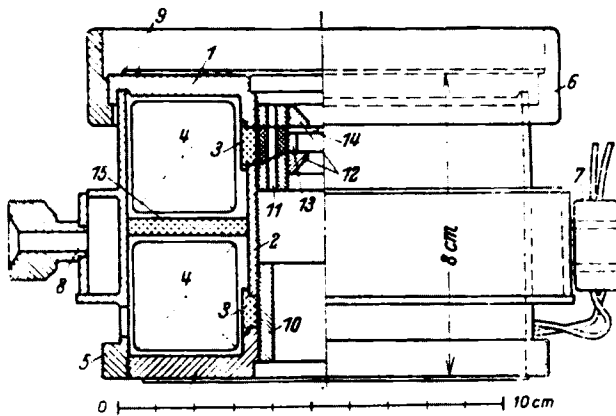


Abb. 4. Querschnitt durch die erste Polschuhlinse [14, 15].

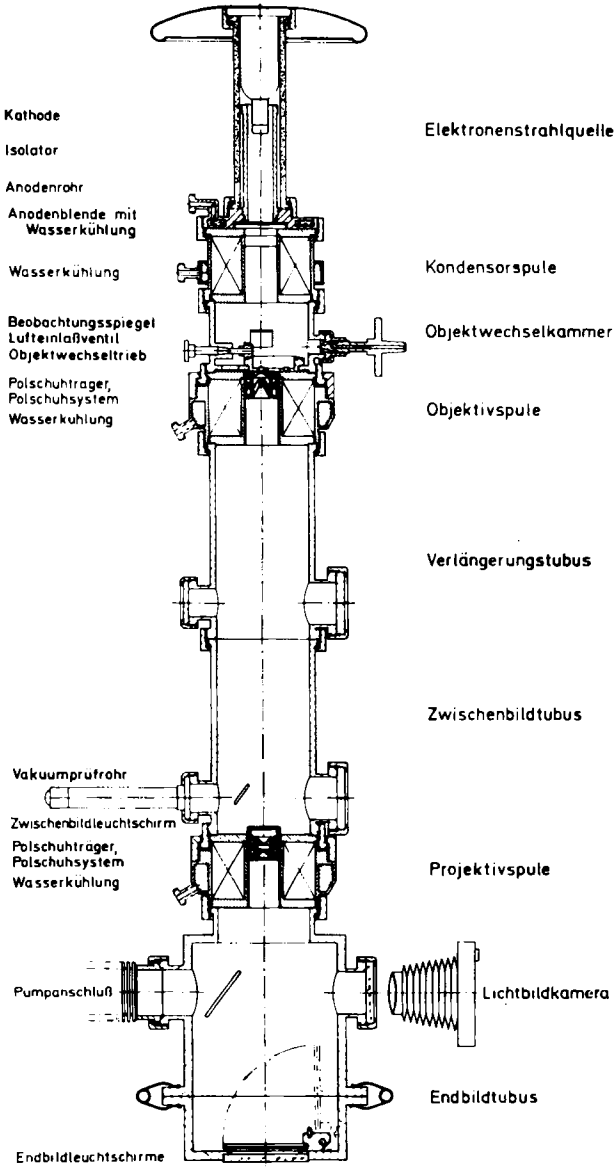


Abb. 5. Erstes (zweistufiges) Elektronenmikroskop mit höherer als lichtmikroskopischer Vergrößerung. Querschnitt durch die Mikroskopsäule [15] (Zeichnung 1976).

6. Wie es zur ersten serienmäßigen Herstellung von Elektronenmikroskopen kam

Mir war aber auch klargeworden, daß eine Weiterentwicklung zu einem praktisch brauchbaren Seriengerät mit wesentlich besserer Auflösung als der des Lichtmikroskops längere Zeit dauern und große Kosten verursachen würde und daß vorläufig wenig Hoffnung bestand, angesichts der bisher erreichten Ergebnisse von irgendeiner Seite finanzielle Hilfe zu erhalten. Ich machte mich auf eine längere Durststrecke gefaßt und beschloß, das Ziel, die Entwicklung eines Seriengeräts, gemeinsam mit *Bodo von Borries* und meinem Bruder Helmut anzusteuern. Ich nahm daher eine mir angebotene Stellung bei der Fernseh-AG in Berlin-Zehlendorf an, in der ich mich dann drei Jahre lang mit der Entwicklung von Braunschen Röhren zum Bildempfang und von Bildsenderöhren beschäftigte. Um unsere Bemühungen um finanzielle Mittel für den Bau serienmäßiger Elektronenmikroskope besser koordinieren zu können, überzeugte ich *von Borries* davon, seine im April 1933 angetretene Stellung bei den Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerken in Essen aufzugeben und nach Berlin zu kommen, wo er 1934 bei Siemens-Schuckert eine Anstellung fand. Wir bemühten uns dann bei vielen staatlichen und industriellen Forschungseinrichtungen um die Finanzierung einer Entwicklung von Seriengeräten^[16].

Während dieser Zeit erschienen erste elektronenmikroskopisch vergrößerte Bilder von biologischen Objekten. An dem von mir 1933 gebauten zweiten Gerät arbeiteten die damaligen Studenten *Heinz Otto Müller* (Elektrotechniker) und *Friedrich Krause* (Mediziner) und veröffentlichten immer bessere Ergebnisse (Abb. 6–9). Leider haben diese

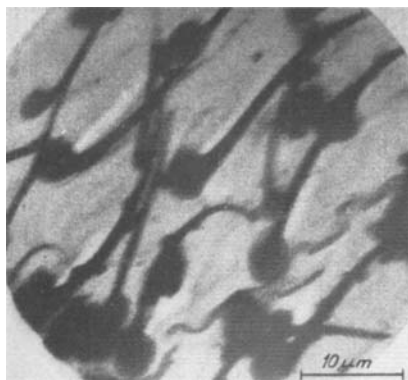


Abb. 6. Flügelhaut der Hausfliege (erste Innenaufnahme, $U=60$ kV, $M_{cl}=2200:1$) (E. Driest, H. O. Müller, *Z. Wiss. Mikrosk. Mikrosk. Tech.* 52 (1935) 53–57).

beiden begabten jungen Wissenschaftler das Kriegsende 1945 nicht überlebt. An der Universität Brüssel hatte *La-dislaus Marton* 1933 ein erstes – waagrecht liegendes – relativ gering vergrößerndes magnetisches Mikroskop gebaut^[17] und erste Versuche mit der Abbildung einiger biologischer Objekte gemacht. 1936 hatte er sein zweites, nun wieder senkrecht stehendes Gerät gebaut^[18].

Trotz dieser neueren Veröffentlichungen hatten wir mit unseren Bemühungen um finanzielle Unterstützung aber erst nach drei Jahren Erfolg; Ursache war ein Gutachten



Abb. 7. Diatomeae *Amphipleura pellucida* ($U=53$ kV, $M_{cl}=3500:1$, $\delta''=130$ nm) (F. Krause in H. Busch, E. Brüche: *Beiträge zur Elektronenoptik*, Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1937, S. 55–61).

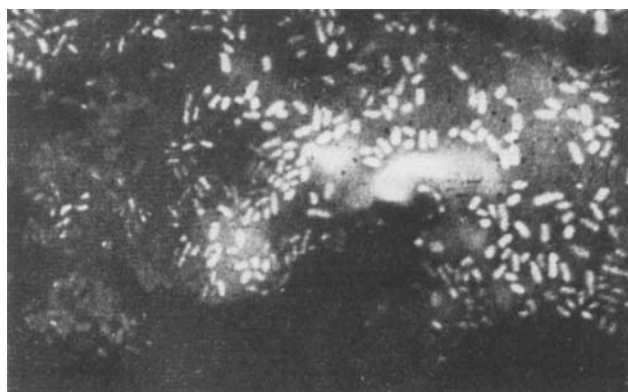


Abb. 8. Bakterien (Heuaufluß) mit Formalin fixiert in ein mit Schwermetallsalzen „gefärbtes“ Trägerhäutchen eingebettet ($U=73.5$ kV, $M_{cl}=2000:1$) (F. Krause, *Naturwissenschaften* 25 (1937) 817–825).

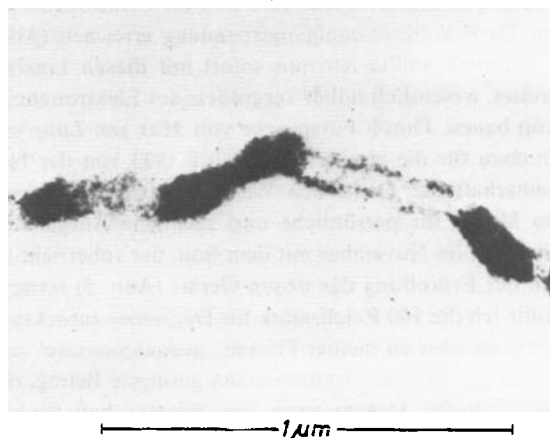


Abb. 9. Kolloidaler Eisenfaden ($U=79$ kV, $M_{cl}=3100:1$) (D. Beischer, F. Krause, *Naturwissenschaften* 25 (1937) 825–829).

von *Helmut Ruskas* „klinischem“ Lehrer, Prof. Dr. *Richard Siebeck*, der damals Direktor der I. Medizinischen Universitätsklinik der Berliner Charité war. Ich zitiere die beiden

vorletzten Absätze dieses Gutachtens vom 2. Oktober 1936^[19]:

„Nach diesen Ausführungen braucht kaum betont zu werden, daß Fortschritte auf dem Gebiete der Erregerforschung für den Arzt von unmittelbar eingreifendem praktischen Interesse sind und daß sie durchaus aktuelle Fragen berühren. Es handelt sich größtenteils um Erkrankungen von wachsender klinischer Bedeutung und somit von größter Wichtigkeit für die Volksgesundheit.

Sollten sich die Möglichkeiten der mikroskopischen Auflösung über die angenommene Größe etwa bis zum 100fachen steigern, so sind die wissenschaftlichen Folgen gar nicht abzusehen. Was bis jetzt erreichbar scheint, halte ich für so bedeutsam, und Erfolge scheinen mir so nahe zu liegen, daß ich gerne bereit bin, in medizinischen Forschungsarbeiten zu beraten und durch Verfügungstellung der Hilfsmittel meines Instituts mitzuarbeiten.“

Dieses Gutachten beeindruckte die Firmen Siemens in Berlin und Carl Zeiss in Jena, so daß sie sich bereit erklärten, die Entwicklung von serienmäßigen Elektronenmikroskopen mit entsprechenden Mitteln aufzunehmen. Wir schlugen vor, eine gemeinsame Entwicklungsstelle einzurichten, um die elektrotechnischen und feinmechanischen Qualitäten beider Firmen ausschöpfen zu können. Leider lehnten diese einen solchen Weg ab, und wir entschieden uns darauf für Siemens. Als ersten Mitarbeiter für die praktische Entwicklung gewannen wir *Heinz Otto Müller*, als auswärtigen Mitarbeiter den Theoretiker *Walter Glaser* in Prag. Unsere in Berlin-Spandau 1937 aufgenommene Arbeit führte 1938 zur Fertigstellung von zwei Versuchsmustern mit Kondensor und Polschuhlinse für Objektiv und Projektiv sowie Vakuumschleusen für Objekte und Photoplatten bei 30000facher Vergrößerung^[20]. Das eine dieser Geräte wurde sofort für erste biologische Untersuchungen von *Helmut Ruska* und seinen medizinischen Mitarbeitern benutzt (*H. Ruska* war von Prof. *Siebeck* für diese Tätigkeit bei Siemens freigestellt worden). Leider kann ich aus Zeitgründen hier keinen Überblick über diese fruchtbare Veröffentlichungsperiode geben. 1940 richtete Siemens auf unseren Vorschlag ein von *H. Ruska* betreutes Gastlaboratorium mit vier Elektronenmikroskopen für auswärtige Mitarbeiter ein, das im Herbst 1944 bei einem Luftangriff zerstört wurde. 1940 konnte *Helmut Ruska* die ersten Aufnahmen von Bakteriophagen zeigen. Eine etwas spätere Aufnahme (Abb. 10) zeigt deutlich die Gestalt dieser winzigen Feinde von Bakterien.

Sehr langsam wuchs nun das Interesse an der Elektronenmikroskopie. Einen ersten Verkaufserfolg für Siemens gab es, als die damals in Deutschland noch weitgehend durch die IG-Farbenindustrie repräsentierte chemische Industrie 1938 für ihre Werke in Hoechst, Leverkusen, Bitterfeld und Wolfen je eines der damals erst geplanten, aber noch nicht konstruierten, geschweige denn gebauten und erprobten Seriengeräte bestellten. Ende 1939 wurde das erste dieser Geräte^[21] nach Hoechst geliefert (Abb. 11). Das Gerät Nr. 26 wurde übrigens noch im Herbst 1943 von Siemens an Prof. *Arne Tiselius* in Uppsala ausgeliefert. Insgesamt wurden bis zum Februar 1945 über 30 Elektronenmikroskope in Berlin gefertigt und ausgeliefert. Damit konn-

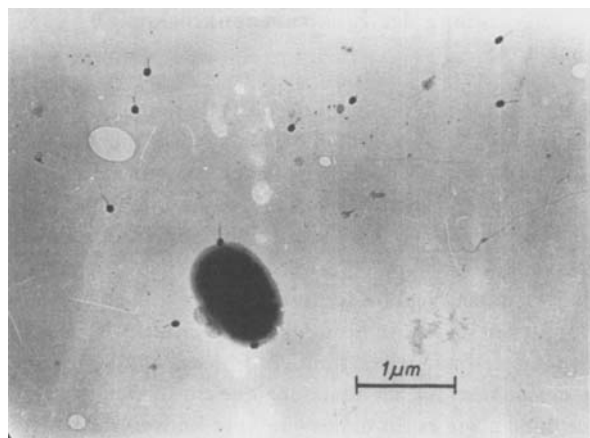


Abb. 10. Bakteriophagen; Auftragung aus einer mit Lysat versetzten Aufschwemmung von Ruhrbakterien ($M_{cl}=10\,000:1$) (*H. Ruska, Naturwissenschaften* 29 (1941) 367–368 und *Arch. Gesamte Virusforsch.* 1942, 345–387).



Abb. 11. Erstes von Siemens serienmäßig hergestelltes Elektronenmikroskop (Ansicht) [21].

ten nun erstmals auch Vertreter verschiedener medizinischer und biologischer Disziplinen sich ihre unabhängige, eigene Meinung über die Zukunftsaussichten der Elektronenmikroskopie bilden. Allerdings war damals die Auswahl der Objekte immer noch begrenzt, da man noch keine für das Elektronenmikroskop genügend dünnen Schnitte von beliebigen Objekten erhalten konnte. Das Kriegsende beendete aus äußeren Gründen auch die enge Zusammenarbeit mit meinem Bruder und *Bodo von Borries* bei Siemens.

7. Entwicklung der Elektronenmikroskopie nach 1945

Mit dem Wiederaufbau unserer vollkommen demontierten Entwicklungsstelle konnte ich schon Ende Juni 1945 mit meist neuen Mitarbeitern beginnen. Trotz der damals schwierigen Umstände in Berlin und im übrigen Deutschland konnten Ende 1949 wieder neu entwickelte Elektronenmikroskope^[22] geliefert werden. 1954 hatte Siemens mit einer weiteren Neukonstruktion^[23], dem „Elmiskop“ (Abb. 12), wieder seine alte Spitzenstellung erreicht. Dieses Gerät hatte erstmals zwei Kondensorlinsen, um vom Objekt zu dessen thermischer Schonung nur ein so kleines Feld zu bestrahlen, wie es für die gewünschte Endvergrößerung jeweils erforderlich ist. Da z. B. für eine 100 000fache Vergrößerung ein durchstrahltes Objektfeld von nur 1 μm für ein Bild von 10 cm Durchmesser ausreicht, kann allein dadurch im Vergleich zu früher üblichen Bestrahlungen von ca. 1 mm Durchmesser die im Objekt in Wärme umgesetzte Leistung des Elektronenstrahls auf ein Millionstel reduziert werden. Die Objekte werden gerade so heiß, daß die in ihnen erzeugte Wärmeleistung in den gesamten Raum um das Objekt abgestrahlt werden kann. Ist die Wärmelei-

stung gering, genügt zur Abstrahlung auch eine geringere Übertemperatur über die Umgebung.

Das neue Gerät wurde aber zunächst eine große Enttäuschung, als wir erleben mußten, daß sich bei der „Kleinfeldbestrahlung“ das Bild des nun nicht mehr heißen Objektfelds in wenigen Sekunden so dunkel wurde, daß alle im ersten Augenblick noch sichtbaren Einzelheiten verschwanden. Untersuchungen zeigten dann, daß geringe Restgase im evakuierten Gerät, insbesondere Kohlenwasserstoffe, vornehmlich an den kalten inneren Oberflächen des Geräts, also jetzt auch auf dem Objekt selbst kondensieren und daß die im bestrahlten Objektfeld sich daraus bildende Kohlenstoffschicht um so dunkler abgebildet wird, je dicker sie wird. Glücklicherweise konnte auch dieses Mißgeschick nach einiger Zeit mit relativ einfachen Mitteln ausgebügelt werden. Man unterkühlte mit flüssiger Luft die gesamte Umgebung des Objekts, so daß dieses selbst auch ohne Erhitzung durch den Strahl immer noch bedeutend wärmer als seine Umgebung war. So kondensierten die Kohlenwasserstoff-Restgase auf den unterkühlten Flächen und nicht mehr auf dem Objekt.

Als diese Lösung gefunden worden war, hatte aber auch die andere immer noch bestehende Schwierigkeit der zu großen Dicke von Objektschnitten eine überraschende Lösung durch von verschiedenen Forschern entwickelte neuartige „Ultramikrotome“ gefunden. Statt der geschliffenen Stahlmesser, deren Schneiden – durch Kristallisation bedingt – nicht genügend glatt waren, verwendete man Glasbruchschneiden, die keine kristallinen Rauigkeiten mehr

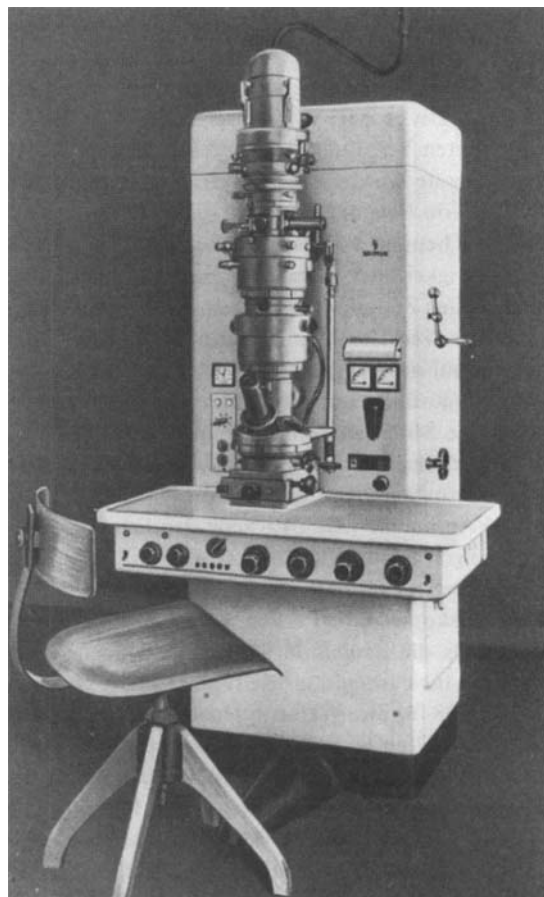
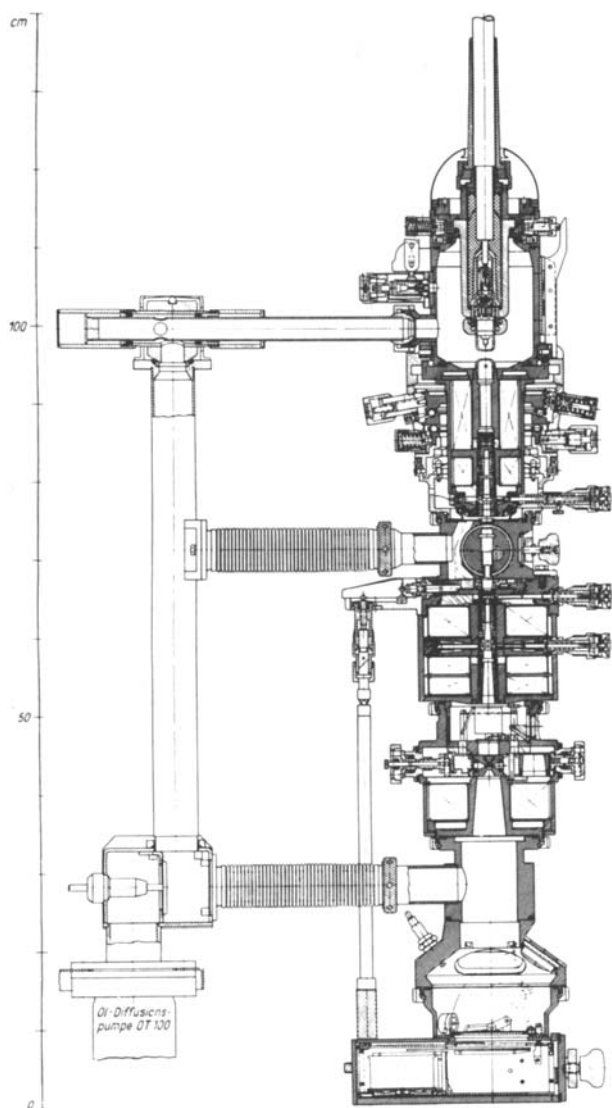


Abb. 12. Erstes serienmäßiges 100-kV-Elektronenmikroskop mit zwei Kondensorlinsen für Kleinfeldbestrahlung (Siemens). Links: Querschnitt; rechts: Ansicht [23].

hatten. Der bisher übliche mechanische Vorschub des Materials senkrecht zum Messer ist infolge der mechanischen Lockerstellen, der „toten Gänge“, ja selbst infolge der veränderlich dicken Ölschichten nicht hinreichend genau für die gewünschten sehr geringen Vorschübe von ca. 10^{-5} mm. Man erhielt stattdessen von solchen Fehlern freie, kleinste Vorschübe durch thermische Ausdehnung ei-

mittel gefunden. Vor allem die Entwicklung dieser neuen Ultramikrotomie hat die bis dahin noch bestehenden Beschränkungen in der Auswahl von Objekten für die Elektronenmikroskopie so entscheidend vermindert, daß seit etwa 25 Jahren fast alle bisher durch die Lichtmikroskopie geprägten Disziplinen auch für die Elektronenmikroskopie zugänglich und dann durch sie gefördert wurden.

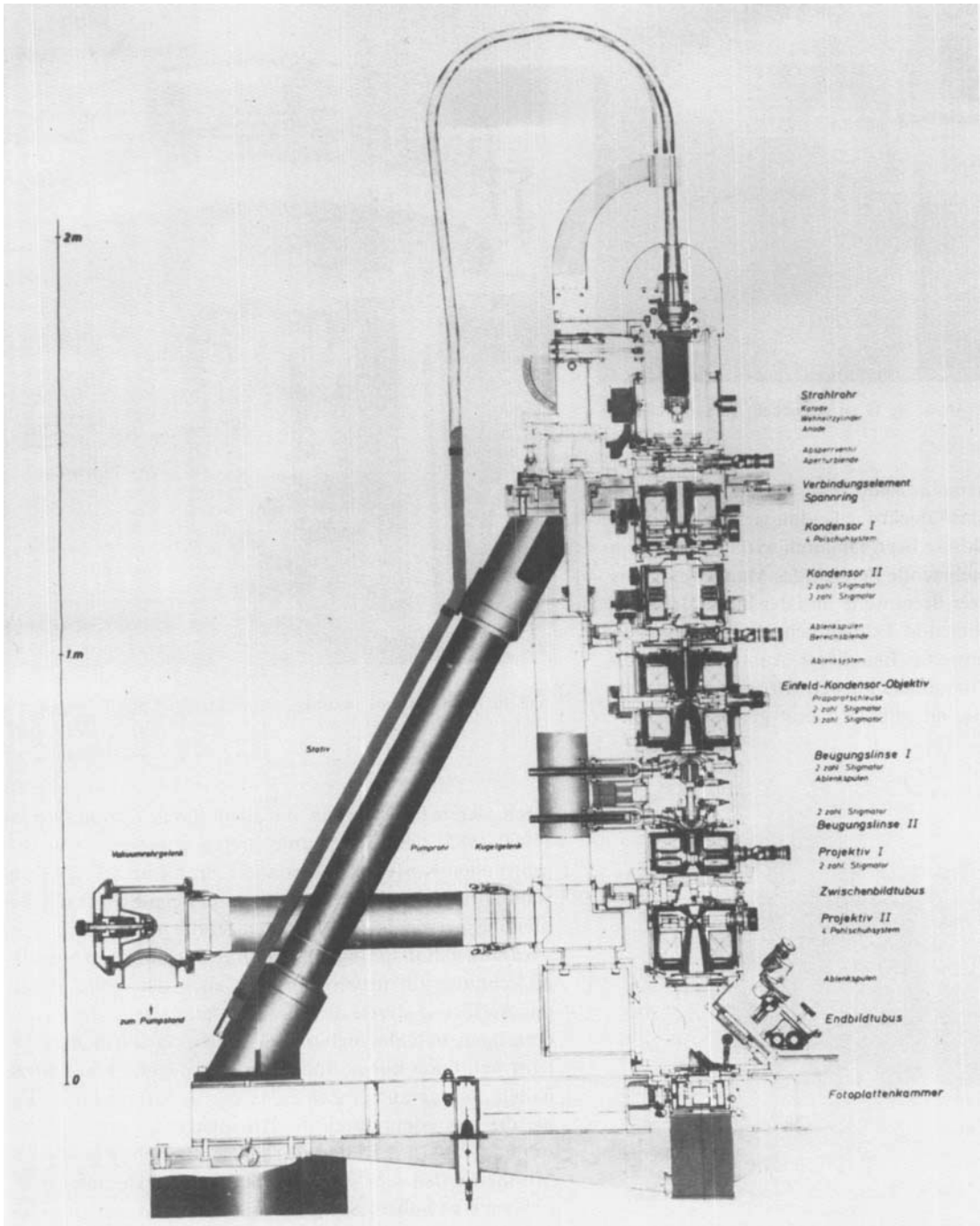


Abb. 13. 100-kV-Durchstrahlungs-Elektronenmikroskop (DEEKO 100) mit Einfeld-Kondensor-Objektiv (Querschnitt) [24].

nes Stabs, an dessen Ende das Objekt befestigt war. Damit die extrem dünnen Schnitte eben blieben, ließ man sie unmittelbar nach dem Schneiden in eine alkoholische Lösung fallen, so daß sie infolge von deren Oberflächenspannung glatt ausgebreitet blieben. Darüber hinaus wurden für die neue Schneidetechnik auch noch besser geeignete Fixier-

Die Elektronenmikroskopie ist während der letzten Jahrzehnte in vielen Ländern von zahlreichen bedeutenden Wissenschaftlern, Ingenieuren und Konstrukteuren durch neue Ideen und Verfahren weiterentwickelt worden. Ich kann aus Zeitgründen hier nur wenige Beispiele bieten: Die Abbildungen 13 und 14 zeigen im Schnitt bzw. in An-

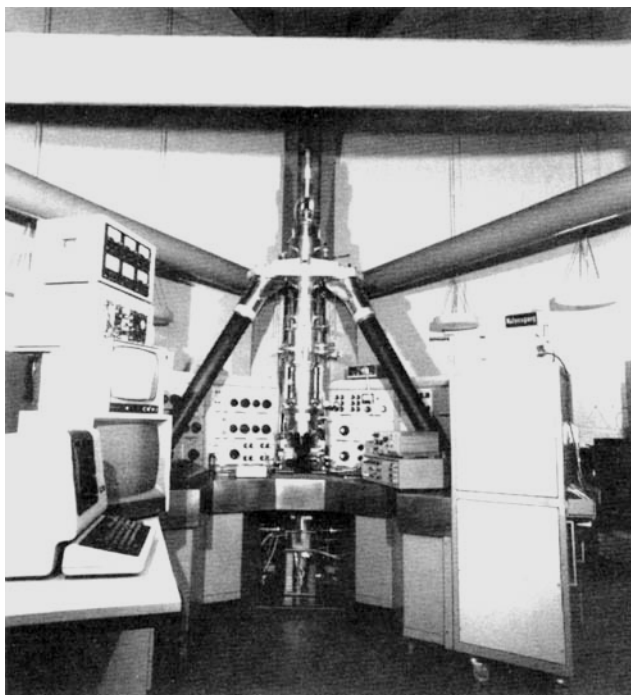


Abb. 14. Ansicht des in Abbildung 13 im Querschnitt gezeigten Gerätes [24].

sicht ein Elektronenmikroskop mit Einfeld-Kondensor-Objektiv, bei dem das Objekt im Feldmaximum einer magnetischen Polschuhlinse liegt. Dadurch wirkt der vor dem Objekt liegende zunehmende Bereich des Magnetfeldes als Kondensor mit kurzer Brennweite und der hinter dem Objekt liegende abnehmende Feldbereich als Objektiv von gleich kurzer Brennweite. Bei dieser Anordnung haben beide Linsen einen besonders kleinen Öffnungsfehler. Abbildung 15 zeigt eine mit diesem Gerät gewonnene Auf-

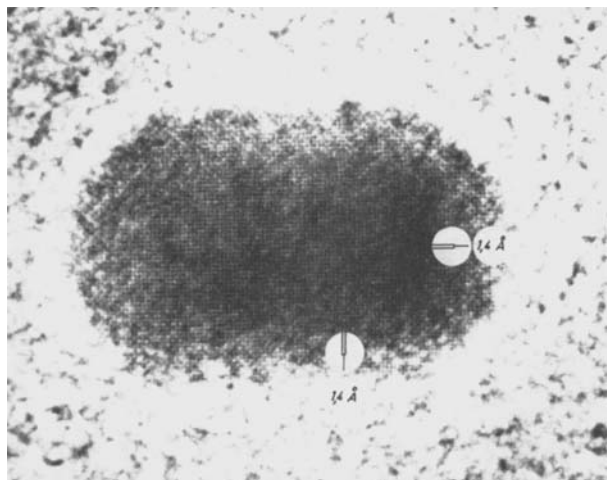


Abb. 15. Plättchenförmiger Goldkristall, Netzebenen im Abstand von 0.14 nm bei achsenparalleler Durchstrahlung ($U = 100$ kV, $M_{\text{eff}} = 800\,000 : 1$); aufgenommen 1976 von K. Weiss und F. Zemlin mit dem 100-kV-Elektronenmikroskop mit Einfeld-Kondensor-Objektiv des Fritz-Haber-Instituts der Max-Planck-Gesellschaft.

nahme eines Goldkristalls. Man sieht deutlich die Gitterebenen im Abstand von 1.4 Å. Zwei solcher Geräte wurden nach meinem 1955 erfolgten Ausscheiden bei Siemens im Institut für Elektronenmikroskopie entwickelt, das die Max-Planck-Gesellschaft in ihrem Fritz-Haber-Institut in

Berlin-Dahlem für mich eingerichtet hatte. Abbildung 16 zeigt ein von Japan Electron Optics Laboratory Co., Ltd. gebautes Höchstspannungsgerät für 1 MV. Bei solchen Ge-

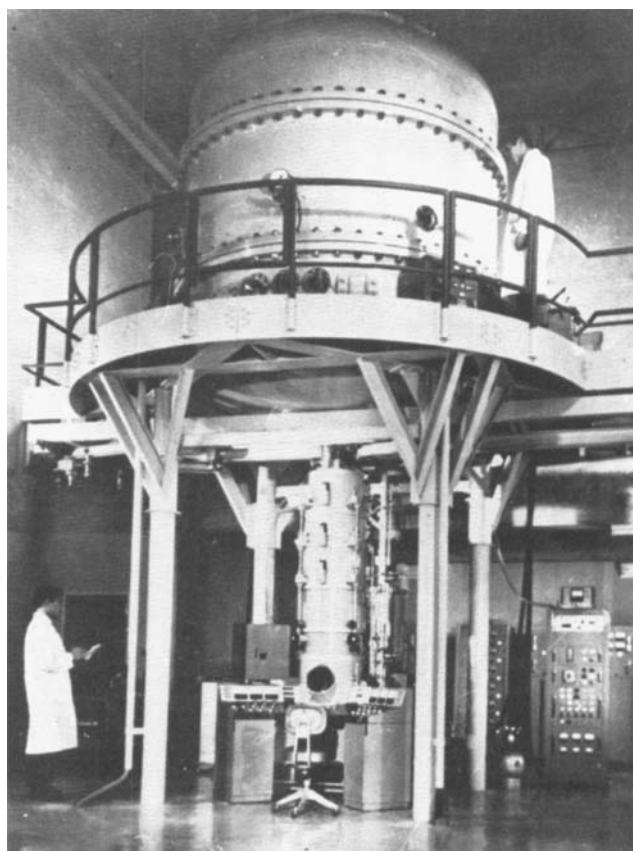


Abb. 16. 1-MV-Elektronenmikroskop (Japan Electron Optics Laboratory Co. Ltd.).

räten, deren Entwicklung vor allem durch Gaston Dupouy (1900–1985) gefördert wurde, treten abgesehen von den sehr hohen Kosten u. a. besondere Probleme bei der Konstanthaltung der Strahlspannung und beim Schutz des Bedienungspersonals vor Röntgen-Strahlen auf. Ihre Entwicklung galt ursprünglich der Untersuchung dickerer Objektschnitte, gilt inzwischen aber auch der Verbesserung der Auflösung durch die kürzere Materiewelle der besonders hoch beschleunigten Elektronen, nachdem man gelernt hat, diese hohen Spannungen genügend konstant zu halten. Seit geraumer Zeit ist in der Elektronenmikroskopie die besonders durch die Arbeiten von Fernandez-Moran in den USA geförderte Kryotechnik wichtig geworden. Mit ihr werden sehr stark unterkühlte Objekte untersucht, weil sie eine höhere Strahlendosis aushalten und sich chemisch weniger verändern. So gelang es in den letzten Jahren, sehr strahlenempfindliche Kristalle mit einer Auflösung von 3.5 Å in einem Kryomikroskop^[25, 26] abzubilden (Abb. 17). Dabei wurde das Präparat auf -269°C abgekühlt. Eine direkte Abbildung mit ausreichendem Kontrast gelingt nicht, weil das Präparat schon bei der für eine Aufnahme erforderlichen Strahlendosis zerfällt. Es können daher nur sehr schwach unterbelichtete Aufnahmen aufgenommen werden. Ein solches Einzelbild ist dann stark verrauscht, enthält aber noch genügend viel periodische In-

formation. Diese wird mit Hilfe eines Computers wie folgt ermittelt: Das Mikrogramm wird zunächst densitometriert und digitalisiert, so daß jedem Bildpunkt eine Zahl zugeordnet wird, die die Schwärzung beschreibt. Die unterbelichtete Aufnahme des ganzen Kristalls wird schachbrettartig per Computer aufgeteilt, und dann werden sehr viele – im vorliegenden Fall waren es 400 – dieser Einzelbilder zueinander periodengerecht justiert und per Computer summiert. Das entstandene Bild entspricht einem genügend belichteten Bild. Links in Abbildung 17 ist das ursprünglich stark verrauschte Einzelbild eines Paraffin-Kristalls zu sehen, rechts ist das Summenbild wiedergegeben. Jeder weiße Punkt repräsentiert ein Paraffinmolekül. Die langen Paraffinmoleküle $C_{44}H_{90}$ sind senkrecht zur Bildebene angeordnet. Mit dem Verfahren, elektronenmikroskopische Bilder per Computer zu verarbeiten, gelingt es sogar, Proteinkristalle dreidimensional mit hoher Auflösung abzubilden^[27].

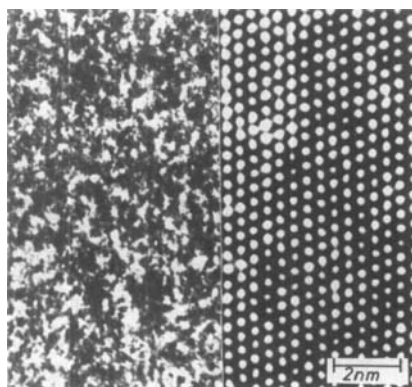


Abb. 17. Paraffinkristall. Links: Aufnahme mit minimaler Dosis; rechts: Überlagerung von 400 Teilbereichen des linken Bildes mittels Computer [25].

Auf die zwischenzeitlich entwickelten und eine Zeitlang auch serienmäßig hergestellten Durchstrahlungsmikroskope mit elektrostatischen Linsen, auf die heute sehr verbreiteten abtastenden Elektronenmikroskope insbesondere für die Betrachtung von Oberflächen, aber auch zum Betrachten durchstrahlbarer Objekte, auf die große Bedeutung der verschiedenartigen, teils mit Computerhilfe durchgeführten Bildauswertungsverfahren sowie auf das Feldelektronen- und Ionenmikroskop kann ich aus Zeitgründen hier leider nicht mehr eingehen.

Die Entwicklung der heutigen Elektronenmikroskope war im wesentlichen ein Kampf gegen die unerwünschten Folgen derselben Eigenschaften von Elektronenstrahlen, die die sublichtmikroskopische Auflösung erst ermöglicht haben. So ist z. B. die kurze Materiewelle – die Voraussetzung der guten Auflösung – an die wegen der Objektbelastung nicht erwünschte hohe Elektronenenergie gekoppelt. Die Ablenkbarkeit im magnetischen Feld – die Voraussetzung der Linsenabbildung – kann die Auflösung begrenzen, wenn die magnetischen Wechselfelder im Raum nicht genügend vom Elektronenmikroskop abgeschirmt werden. Wir sollten daher heute auch diejenigen Wissenschaftler nicht verurteilen, die der Elektronenmikroskopie an ihrem Beginn kaum eine Chance gaben. Es ist letzten Endes doch fast ein Wunder, daß alle Schwierigkeiten bisher so weit

gelöst werden konnten, daß die Elektronenmikroskopie für so viele naturwissenschaftlichen Disziplinen derart fruchtbar geworden ist.

Eingegangen am 5. März 1987 [A 626]

- [1] R. Rankin: The cathode ray oscillograph. *Elec. Club J.* 2 (1905) 620–631.
- [2] W. Hittorf: Über die Elektrizitätsleitung der Gase, I. und II. *Ann. Phys. Chem.* 16 (1869) 1–31 und 197–234 (Münster, 9. Oktober 1868).
- [3] H. Busch: Über die Wirkungsweise der Konzentrierungsspule bei der Braunschen Röhre. *Arch. Elektrotech.* 18 (1927) 583–594 (Jena, Physikalisches Institut, März 1927).
- [4] E. Ruska: Über eine Berechnungsmethode des Kathodenstrahloszillographen auf Grund der experimentell gefundenen Abhängigkeit des Schreibfleckdurchmessers von der Stellung der Konzentrierspule. Vom 1. November 1928 an im Hochspannungslaboratorium der Technischen Hochschule Berlin (Direktor Prof. Dr. A. Matthias) durchgeführte und am 10. Mai 1929 eingereichte Studienarbeit, 117 Seiten.
- [5] E. Ruska, M. Knoll: Die magnetische Sammelspule für schnelle Elektronenstrahlen. *Z. Tech. Phys.* 12 (1931) 389–400 und 448 (eingereicht am 18. April 1931).
- [6] M. Knoll: Vorrichtung zur Konzentrierung des Elektronenstrahls eines Kathodenstrahloszillographen. *Deutsche Patentschrift* Nr. 690809, patentiert vom 10. November 1929, erteilt am 11. April 1940.
- [7] E. Ruska: Untersuchung elektrostatischer Sammelvorrichtungen als Ersatz der magnetischen Konzentrierspulen bei Kathodenstrahl-Oszillographen. Am 18. Juli 1930 im Hochspannungslaboratorium der Technischen Hochschule Berlin (Direktor Prof. Dr. A. Matthias) angefangene und am 23. Dezember 1930 eingereichte Diplomarbeit, 90 Seiten.
- [8] M. Knoll, E. Ruska: Beitrag zur geometrischen Elektronenoptik I und II. *Ann. Phys.* 12 (1932) 607–640 und 641–661 (eingereicht am 10. September 1931).
- [9] M. Knoll: Berechnungsgrundlagen und neuere Ausführungsformen des Kathodenstrahloszillographen. Manuskript eines Vortrags im Cranz-Kolloquium der Technischen Hochschule Berlin am 4. Juni 1931, 26 Seiten.
- [10] E. Ruska: *The Early Development of Electron Lenses and Electron Microscopy*, S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1980, siehe S. 113–116.
- [11] L. de Broglie: Recherches sur la théorie des quanta. Dissertation. Masson & Cie, Paris 1924; *Ann. Phys.* 3 (1925) 22–128.
- [12] M. Knoll, E. Ruska: Das Elektronenmikroskop. *Z. Phys.* 78 (1932) 318–339 (eingereicht am 16. Juni 1932).
- [13] B. von Borries, E. Ruska: Magnetische Sammellinse kurzer Feldlänge. *Deutsche Patentschrift* Nr. 680284, patentiert vom 17. März 1932, erteilt am 3. August 1939.
- [14] E. Ruska: Über ein magnetisches Objektiv für das Elektronenmikroskop. *Dissertation*, Technische Hochschule Berlin (eingereicht am 31. August 1933); *Z. Phys.* 89 (1934) 90–128 (eingereicht am 5. März 1934).
- [15] E. Ruska: Über Fortschritte im Bau und in der Leistung des magnetischen Elektronenmikroskops. *Z. Phys.* 87 (1934) 580–602 (eingereicht am 12. Dezember 1933).
- [16] Siehe [10], S. 120–122.
- [17] L. Marton: La microscope électronique des objets biologiques. *Acad. R. Belg. Bull. Cl. Sci., Ser. 5*, 20 (1934) 439–446 (Université libre de Bruxelles, Mai 1934).
- [18] L. Marton: Le microscope électronique. *Rev. Microbiol. Appl. Agric. Hyg. Ind.* 2 (1936) 117–124.
- [19] Siehe [10], S. 123–124.
- [20] B. von Borries, E. Ruska: Vorläufige Mitteilung über Fortschritte im Bau und in der Leistung des Übermikroskops. *Wiss. Veröff. Siemens-Werken* 17 (1938) 99–106 (eingereicht am 29. Februar 1938).
- [21] B. von Borries, E. Ruska: Ein Übermikroskop für Forschungsinstitute. *Naturwissenschaften* 27 (1939) 577–582 (eingereicht am 24. Juni 1939).
- [22] E. Ruska: Über neue magnetische Durchstrahlungs-Elektronenmikroskope im Strahlspannungsbereich von 40...220 kV, Teil I. *Kolloid-Z.* 116 (1950) 103–120 (eingereicht am 15. Dezember 1949).
- [23] E. Ruska, O. Wolff: Ein hochauflösendes 100-kV-Elektronenmikroskop mit Kleinfelddurchstrahlung. *Z. Wiss. Mikrosk. Mikrosk. Tech.* 62 (1956) 466–509 (eingereicht am 19. Juli 1955).
- [24] W. D. Riecke, E. Ruska: A 100 kV transmission electron microscope with single-field condenser objective. *VI. Int. Congr. Electron Microsc.*, Kyoto, Japan, Abstracts Vol. I, S. 19–20 (1966).
- [25] F. Zemlin, E. Reuber, E. Beckmann, E. Zeitler, D. L. Dorset: Molecular Resolution Electron Micrographs of Monolamellar Paraffin Crystals. *Science* 229 (1985) 461–462.
- [26] J. Dietrich, F. Fox, E. Knapke, G. Lefranc, K. Nachtrieb, R. Weyl, H. Zerbst: Improvements in electron microscopy by application of superconductivity. *Ultramicroscopy* 2 (1971) 241–249.
- [27] R. Henderson, P. N. T. Unwin: Three-dimensional model of purple membrane obtained by electron microscopy. *Nature* 257 (1975) 28–32.