

TÜBINGER UNIVERSITÄTSREDEN

25

Neue Anwendungen des freien Elektrons in Physik und Technik

Rede bei der Übernahme des Rektorats am 17. Mai 1966

von

GOTTFRIED MÖLLENSTEDT



1967

J. C. B. MOHR (PAUL SIEBECK) TÜBINGEN

Was ist ein freies Elektron, was ist ein gebundenes Elektron? Das Atom besteht aus dem elektrisch positiv geladenen Kern, um den die negativ geladenen Elektronen, die kleinsten elektrischen Einheiten, die Elementarteilchen, kreisen. Dabei ist die Zahl der Elektronen ebenso groß wie die Zahl der positiven Ladungseinheiten des Kerns, so daß das Atom nach außen völlig neutral erscheint. Das Elektron wird nach dem im Jahre 1792 von Charles Auguste Comte de Coulomb aufgestellten Gesetz mit der Kraft $K = e_1 \cdot e_2 / r^2$ von der positiven Ladung des Kerns angezogen, wobei die durch die kreisförmige Bewegung des Elektrons hervorgerufene Zentrifugalkraft verhindert, daß es in den Kern stürzt. Ein Vergleich des Atoms mit der Sonne und ihren Planeten ist vorerst durchaus erlaubt.

Wir bezeichnen das Elektron in einem solchen Zustand als gebunden. Die Physik des gebundenen Elektrons ist das Fundament für die Erkenntnis des Aufbaues des Festkörpers, sie ist die Grundlage für das Verständnis der Struktur der uns umgebenden Materie. Die Theorie des Festkörpers ist im letzten Jahrzehnt zu einer der fesselndsten und interessantesten Wissenschaften der modernen Physik entwickelt worden. Darüber soll aber hier nicht berichtet werden. Vielmehr stehen heute neue Anwendungen des freien Elektrons zur Diskussion. Wie befreit man das gebundene Elektron? Wenn das an den Atomkern gebundene Elektron durch Energiezufuhr z. B. durch den Stoß eines anderen schnellen Elektrons eine so hohe Geschwindigkeit erhält, daß es den Anziehungsbereich des Atomkerns verlassen kann, dann haben wir das gebundene Elektron in den Zustand eines freien Elektrons überführt.

Was ist ein freies Elektron? Ist es ein auf ein kleines Volumen konzentriertes Teilchen, ist es eine weit ausgebreitete Welle oder ist es vielleicht beides? Die Antwort wird im Laufe des folgenden Berichts über neue Anwendungen des freien Elektrons gegeben. Im ersten Beispiel wollen wir uns mit der

Erzeugung hoher Energiedichten durch Elektronenstrahlen

befassen. Für das Verständnis der Erzeugung von hohen Energiedichten mittels Elektronen genügt es, wenn das Elektron als eine kleine Kugel mit dem Radius von $R = 10^{-13}$ cm, dem klassischen Elektronenradius, angenommen wird, in der die negative Elektrizität homogen verteilt ist. Wir erteilen dem Elektron durch eine elektrische Spannung U eine Energie der Lage $E_{\text{pot.}} = eU$. Diese Energie läßt sich in die kinetische Energie $mv^2/2 = eU$ umwandeln, indem das Elektron die Potentialdifferenz U durchläuft. Das mechanische Analogon dazu ist ein Stein im Gravitationsfeld der Erde, der in der Höhe H die potentielle Energie $E_{\text{pot}} = mgH$ hat. Diese Energie der Lage des Steins findet man nach dem Durchfallen der Strecke H als kinetische Energie $mv^2/2 = mgH$ wieder. Eine so durch ein Potential U beschleunigte große Zahl von Elektronen nennt man einen Elektronenstrahl. Feingebündelte Elektronenstrahlen sind aus der Praxis des Fernsehens, aus den von dem Tübinger Nobelpreisträger Professor Ferdinand Braun entwickelten Oszillographen und aus den seit Jahrzehnten bekannten Elektronenmikroskopen sowie aus Radio- und Röntgenröhren wohlbekannt.

Bereits seit der Entdeckung der Röntgenstrahlen haben sich die Physiker darüber gewundert, daß der auf die Anode konzentrierte Elektronenstrahl nach einigen Jahren Betriebsdauer ein Loch in die Anode bohrte. Diese zunächst ärgerliche Erscheinung wurde in den letzten Jahrzehnten physikalisch und technologisch gründlich unter-

sucht und mittels elektronenoptischer Abbildungselemente zu einer solch hohen Energiekonzentration gebracht, daß es heute möglich ist, mit Elektronenstrahlen härteste und temperaturfesteste Materialien zu bohren, zu schweißen und zu schmelzen. Welches sind die physikalischen Grundlagen dieser Energiekonzentration? Es ist bekannt, daß man mit einem Hohlspiegel Sonnenstrahlen im Brennpunkt vereinigen kann. Die auf diese Weise im Sommer bei Sonnenschein um die Mittagszeit erzielte Energiekonzentration ist bereits ganz beträchtlich. Es gelingt damit nicht nur, eine Zigarette anzuzünden, sondern es ist auch möglich, im Vereinigungspunkt der Sonnenstrahlen einen Stein zu schmelzen. Um in der Praxis unabhängig von der Sonne zu sein, ersetzt man für spezielle Probleme z. B. der Keramikbehandlung die Sonne durch künstliche Lichtquellen und erzielt durch lichtoptische Konzentration ebenfalls sehr hohe Temperaturen.

Einfacher und wesentlich höhere Leistungsdichten aber lassen sich mit Elektronenstrahlen erzielen. Vergleichen wir die Sonne mit einem modernen Elektronenstrahlerzeugungssystem z. B. mit dem Steigerwald-System, dessen Entdeckung ich vor etwa 15 Jahren in den Süddeutschen Laboratorien in Mosbach/Baden, die unter der Leitung des bekannten Elektronenoptikers Prof. Ernst Brüche standen, persönlich miterleben durfte. Die Sonne strahlt pro cm^2 in den Raumwinkel 1 etwa 250 Watt / cm^2 sterad, das elektronenemittierende System aber etwa 10^{10} Watt / cm^2 sterad. Die Elektronenquelle strahlt also 10 Millionen mal mehr Leistung in den Einheitswinkel als die Sonne. In der Fachsprache ausgedrückt: „Der Richtstrahlwert $R = j/\Omega$ des Elektronenstrahl-Erzeugungssystems ist infolge der hohen durch die anliegende Beschleunigungsspannung verursachte scharfe Bündelung des Strahls von ungewöhnlich hohem Betrag.“ Verwendet man zur weiteren Konzentration des Elektronenstrahls magnetische oder elektrische Linsen unter Einhaltung der elektronenoptischen Abbildungsgesetze, so wird es möglich, im Vakuum feinste

Löcher in mm- bis cm-dicke Platten aus härtestem Material, wie Tantal, Molybdän, Stahl, Diamant, Glas und Porzellan zu bohren, ohne daß die Nachbarschaft der Bohrungen in unzulässiger Weise in Mitleidenschaft gezogen wird. So wird es durch die Anwendung der Elektronenstrahlen möglich, Löcher in Materialien zu bohren, die mit anderen Methoden entweder überhaupt nicht oder nur schwer zu bearbeiten sind.

Weitaus wichtiger als das Bohren mit Elektronenstrahlen aber ist für die Physik und Technik das Schweißen und Schmelzen mit Elektronenstrahlen geworden. Bringt man zwei präzise auf Maß gearbeitete Metallstücke aus gleichem oder aus verschiedenem Material eng aneinander, und läßt man dann den energiereichen Elektronenstrahl in den Schlitz fahren, so wird das Werkstück, ohne seine Masse durch thermischen Verzug zu verändern, durch die hohe Wärmeerzeugung auf kleinstem Raum miteinander verschweißt. Dabei ist die Festigkeit der Schweißnaht keineswegs geringer als die des übrigen Materials. Der Vorteil dieser Schweißtechnik liegt darin, daß sie ebenso wie die Elektronenstrahl-Bohrtechnik auf mit anderen Methoden nicht schweißbares Material anwendbar ist, wie Tantal, Wolfram, Reaktormaterialien usw. Welcher Physiker, sei es ein Theoretiker oder Experimentator, hätte es vor einigen Jahren gewagt, vorauszusagen oder es auch nur für möglich gehalten, daß ein 100 keV-Elektronenstrahl in kurzer Zeit eine 10 cm dicke Stahlplatte schweißen oder durchbohren kann. In der Praxis des Elektronenschweißens spricht man vom „Tiefschweiß-Effekt“. Er ist bisher physikalisch noch keineswegs vollständig geklärt. Man darf diesen Effekt zu einem der technischen Wunder unserer Zeit rechnen.

Eine weitere Anwendung von energiereichen Elektronenstrahlen liegt in der Möglichkeit, ganze Metallblöcke von mehreren cm im Durchmesser aus Material mit sehr hohem Schmelzpunkt zum Schmelzen zu bringen. In der Industrie werden heute Großanlagen zum Schmelzen von Metallen mit etwa 50 Elektronenkanonen zur

Herstellung von Reinstmetallen eingesetzt, denn der Elektronenstrahl, der auf das Metall auftrifft, um es zu erhitzen, hinterläßt keinerlei Verunreinigungen und ist in seiner Intensität leicht steuerbar. So wurde aus dem schon seit vielen Jahrzehnten bekannten Elektronenstrahl nach intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeit ein für die moderne Technik äußerst wichtiges Werkzeug.

Wir fassen zusammen: Heute bohren Elektronen feinste Löcher in Uhrensteine, in Spinddüsen aus härtesten Materialien und in Schuhleder, um es atmungsaktiv zu machen, sie schmelzen reinste schwerschmelzbare Metalle und schweißen u. a. Schaufeln von Explosionsturbinen und Motoren- und Raketengehäuse, die besonders hohen Temperaturen ausgesetzt sind.

Die ersten Impulse zur Entwicklung dieser neuen Technik gingen einst von Deutschland aus. Während sich in den USA und der UdSSR eine Elektronen-Schweißtechnik auf breiter Basis entwickelt hat bzw. entsteht, bedient sich die deutsche Industrie dieser neuen Verfahren nur zögernd. Hoffen wir, daß die zur Zeit in Deutschland unternommenen neuen Anstrengungen ausreichen, um auf diesem Gebiet den Vorsprung dieser beiden großen Nationen einigermaßen einholen zu können.

Als zweites Beispiel für neue Anwendungen des freien Elektrons in Physik und Technik führen wir die

Beugung sehr langsamer Elektronen an einatomaren Schichten auf Oberflächen

an. Für das Verständnis des Elektronenschweißens genügte die einfache Vorstellung, daß das Elektron ein geladenes Teilchen sei. Jetzt aber muß eine weitere Eigenschaft des Elektrons in Betracht gezogen werden. Die Älteren unter ihnen, meine Damen und Herren, werden sich an vergangene, politisch so unglückliche, Zeiten erinnern, als oft in hysterischer und lauter Weise im Radio zu hören war: „so oder

so“ – „entweder oder“. Von dieser Art ist das Wesen des Elektrons keineswegs. Wir begegnen vielmehr dem Dualismus Welle – Korpuskel. Je nach Fragestellung verhält es sich wie ein auf kleinstem Raum konzentriertes Teilchen oder wie eine beliebig ausgebreitete sogenannte Materiewelle. Die Natur dokumentiert ihre Toleranz in einem „sowohl als auch“. Der französische theoretische Physiker und Nobelpreisträger Louis de Broglie – er lebte übrigens nicht im 18. Jahrhundert, wie man oft in Prüfungen zu hören bekommt, sondern lebt im 20. Jahrhundert, z. Z. an der Universität in Paris – schloß aus seinen theoretischen Betrachtungen, daß dem Elektron eine Welle zugeordnet werden muß, deren Wellenlänge durch die Formel $\lambda = h/mv$ gegeben sei. Als diese Formel 1925 durch die de Broglie'sche Dissertation bekannt wurde, haben zunächst selbst führende Physiker diese Beziehung für eine höchst fragwürdige hypothetische Spekulation gehalten, wie mir der verstorbene Tübinger Ordinarius für Experimentalphysik, Professor Walther Kossel, erzählte. Heute ist die Wellennatur des Elektrons selbstverständlich und die Beziehung $\lambda = h/mv$ ist mit hoher Präzision und zwar nicht nur durch Beugungsexperimente an Atomen, die in regelmäßigen Abständen im Einkristall angeordnet sind, gesichert, sondern diese Beziehung läßt sich z. B. durch das in Tübingen entdeckte elektronenoptische Biprisma direkt mit der Schieblehre bestätigen. In der Tübinger Dissertation konnte Dr. Düker die de Broglie-Beziehung bis auf $\pm 1\%$ aus einem einfachen Biprisma-Interferenz-Experiment mit Elektronenwellen bestätigen. Als das Ergebnis 1955 gesichert war, berichteten wir darüber an L. de Broglie.

Seine Antwort lautete:

„Monsieur et cher Collègue,

J'ai été extrêmement heureux de recevoir votre aimable lettre et d'avoir connaissance des belles expériences par lesquelles vous avez obtenu des interférences d'électrons par un procédé analogue au biprisme de Fresnel. J'ai naturellement un grand plaisir à voir que

vous avez ainsi obtenu une nouvelle preuve particulièrement brillante de la formule $\lambda = h/mv$ à mes élèves. En vous remerciant bien vivement de votre envoi, je vous prie d'agréer, Monsieur, et cher Collègue, l'expression de mes sentiments dévoués.“ Meine Mitarbeiter konnten mit Recht stolz sein, daß es im Brief von de Broglie heißt: „Es ist mir natürlich ein großes Vergnügen zu sehen, daß Sie einen neuen besonders brillianten Beweis für die Formel $\lambda = h/mv$ erbracht haben...“.

Die Welleneigenschaft des Elektrons und die Louis de Broglie'sche Formel ist heute allen Wissenschaftlern ebenso selbstverständlich wie z. B. das 1792 entdeckte Coulomb'sche Kraftgesetz zwischen elektrischen Ladungen.

Um die zur Diskussion stehende weitere neue Anwendung des freien Elektrons zu verstehen, erinnert man am besten an die seit 1927 berühmt gewordene erste experimentelle Bestätigung der theoretischen Formel von L. de Broglie. Die Amerikaner Davisson und Germer bestrahlten damals die Oberfläche eines Nickel-Einkristalls mit sehr langsamen Elektronen von etwa 100 eV-Energie. Mittels eines Faraday-Käfigs mit kleiner Einlaßöffnung wurde die gestreute Elektronen-Intensität unter verschiedenen Winkeln sorgfältig vermessen. Nur unter größtem Meßaufwand und unter äußersten Schwierigkeiten konnten einige intensitätsarme gebeugte Strahlen in einem allgemeinen intensiven Streuuntergrund aufgefunden werden. Es bestätigte sich, daß die in der Oberfläche geordnet „in Reih und Glied“ liegenden Atome ein Beugungsgitter für die vermuteten Elektronenwellen darstellten. Das Interessante an diesem Experiment aber war, daß zur Beugung nur die an der Oberfläche liegenden Atome mitwirkten. Die dritte Dimension, die Dimension in die Tiefe, spielte wegen der geringen Eindringtiefe der langsamen Elektronen keine Rolle. Man versteht die damaligen außergewöhnlichen Meßschwierigkeiten von Davisson und Germer sehr gut, denn sie arbeiteten nach heutigen Begriffen bei einem sehr schlechten Vakuum

von etwa 10^{-5} bis 10^{-6} Torr, was natürlich zur Folge hatte, daß sich die Oberfläche in Bälde mit einer Fremdschicht, bestehend aus Sauerstoff, Stickstoff oder organischen Molekülen bedeckte. Davisson erhielt für diese großartige Leistung den Nobelpreis. Nach dem Tode von Davisson arbeitete sein vertrauter Mitarbeiter Germer in aller Stille mit Sorgfalt und Liebe an diesem Experiment weiter. Dreißig bis vierzig Jahre mußten vergehen, bis Germer mit einer modernen, verbesserten, für die Wissenschaft sehr bedeutenden Apparatur hervortrat, die in Amerika mit dem Namen LEED bezeichnet wird, den Anfangsbuchstaben von Low-Energy-Electron-Diffraction. Gegenüber 1927 ist es heute infolge der großartigen Entwicklung der Vakuumtechnik möglich, auch in technischen Geräten ein Vakuum von 10^{-10} Torr über längere Zeiten aufrechtzuerhalten. Das bedeutet, daß Herr Germer die Oberfläche seiner Nickel-Einkristalle von Kontaminationsschichten völlig freihalten kann. Ein weiterer entscheidender Schritt zur Verbesserung des Beugungsbildes der äußerst langsamen Elektronen war die folgerichtige Anwendung von elektronenoptischen Methoden zur Filterung der gestreuten Elektronen. Das Verfahren wurde 1934 von Ehrenberg an der Technischen Hochschule in Stuttgart entwickelt. Durch ein Gegenfeld werden alle Elektronen, die beim Streuprozess Energie verloren haben, man bezeichnet sie als die unelastisch gestreuten Elektronen, aus dem Beugungsbild abgetrennt, so daß nunmehr nur diejenigen Elektronen – es sind etwa 1 % der zurückgeworfenen Elektronen, die die Information über die Oberflächenstruktur vermittelten – allein auf den Leuchtschirm fallen. Mit nur etwa 100 eV-Energie tasten die Elektronen die Struktur der Oberfläche ab und werden dann durch ein Potential von etwa 10kV beschleunigt, so daß man auf dem Leuchtschirm das Beugungsbild mit etwa gleich großer Helligkeit beobachten kann, wie wir es mit 50 keV-Elektronen gewohnt sind. Germer hat mir 1961 in den Bell Telephone Laboratories anlässlich einer Reise durch die USA diese Erscheinung auf dem Leuchtschirm vor-

geführt. Es war für mich eines der größten physikalischen Erlebnisse, ein 100 Volt Elektronen-Beugungsbild mit so brillianter Helligkeit zu sehen. Die überragende Bedeutung des LEED genannten und neuerdings von der amerikanischen Firma Varian kommerziell gefertigten Gerätes läßt sich wie folgt zusammenfassen: Was weder Röntgen-, Ionen- noch Neutronenstrahlen vermögen, gelingt mit äußerst langsamen Elektronen. Das physikalisch und technisch bis ins letzte Detail durchdachte Instrument für Beugung von langsamen Elektronen an Oberflächen erlaubt, auf bequeme Weise und stets reproduzierbar folgende Experimente durchzuführen:

Die Atomanordnung an reinen Metall-Oberflächen von Einkristallen festzustellen und die Abstände der Atome zu bestimmen. Es zeigt sich, daß bei einigen Metallen die Gitterkonstante an der Oberfläche mit der im Inneren des kompakten Materials übereinstimmt, aber überraschenderweise findet man dagegen, daß augenscheinlich infolge der Asymmetrie der Kräfte die Atomabstände auf Silizium- und Germanium-Oberflächen von denen im Inneren des kompakten Materials eindeutig abweichen. Auch die Atomanordnung und die Gitterkonstanten der an reinen Oberflächen adsorbierten einatomigen Gasschichten lassen sich feststellen. Das bedeutet, daß eine Substanzmenge von etwa 10^{-12} gr, ein Millionstel von einem Millionstel Gramm, nachgewiesen werden kann. Ferner wird das Studium des Beginns der Oxydation und der Korrosion an Oberflächen ermöglicht. Bisher ungelöste Probleme der Epitaxie und das Geheimnis der Katalyse, die für die Chemie und Physik von so großer Bedeutung sind, können jetzt neu in Angriff genommen werden. Es besteht ferner kein Zweifel, daß dieses neuartige Gerät Wesentliches zum Verständnis von Vorgängen an der Oberfläche beitragen kann, wie: Materialtransport auf Oberflächen – Chemische Kinetik – Verdampfung und Kondensation – Photoelektrische Emission – Thermische- und Feldemission – Mechanismus des Dampfniederschlags und vieles andere, was wir heute noch nicht

übersehen können. Selbst Prozesse, die für Lebensvorgänge eine Rolle spielen, können in neuem Lichte betrachtet werden.

Zum Abschluß meines Vortrages über neue Anwendungen des freien Elektrons sei über

Das Elektronen-Interferometer

berichtet. Gewiß ist dieses Thema nicht für jedermann leicht verständlich, zumal es noch in der vollen Entwicklung begriffen ist und noch keineswegs vor dem Abschluß steht. Trotzdem soll der Versuch gemacht werden, das Wesentliche, um das es zur Zeit geht, verständlich zu machen. Dazu beleuchten wir zunächst die derzeitige Situation auf dem Gebiet der Elektronen-Mikroskopie. Die Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops, der kleinste Abstand, den zwei kleine Teilchen im Objekt noch haben dürfen, um im Bild noch als getrennt erkannt zu werden, beträgt $\lambda/2$, die Hälfte der Wellenlänge des Lichtes, also etwa 2000 Å. Das Elektronen-Mikroskop, – hier ist die Wellenlänge hunderttausendmal kleiner –, hat die Grenze um den Faktor 1000 nach unten verschoben. Die großartigen und vielgestaltigen Leistungen der Elektronen-Mikroskope brauche ich nicht aufzuzählen. Heute wird in vielen Ländern mit großer Energie und Ausdauer in aller Stille an der Verbesserung gearbeitet. Zum Beispiel verlangen die Metallurgen für die Durchstrahlung von dickeren Metallobjekten – die bisherigen dünnen Schichten sind nicht repräsentativ für das physikalische Verhalten des kompakten Festkörpers – höhere Durchschlagskraft d. h. höhere Energie der Elektronen. In Frankreich wurde in dem von Professor Dupouy geleiteten Toulouser Laboratorium ein Versuchsgerät für 1,2 Millionen Volt gebaut und in Betrieb genommen. In Japan ist man sehr intensiv um die Entwicklung der Elektronen-Mikroskopie und um die Erforschung aller damit zusammenhängenden Fragen bemüht. Wir glauben uns nicht zu täuschen, wenn wir behaupten, daß Deutschland, wo einst die Elek-

tronen-Mikroskope entdeckt wurden, auf diesem Gebiet in Zukunft einen schweren Stand haben wird, denn heute schon bieten japanische Firmen kommerziell gefertigte Elektronen-Mikroskope für 150 kV, 300 kV und neuerdings sogar für 600 kV an. Deutschen Forschern, die Elektronenmikroskope mit hohen Strahlspannungen für ihre Untersuchungen benötigen, kann man nur wünschen, daß immer genügend Devisen vorhanden sind, um die ausgezeichneten japanischen Geräte kaufen zu können, wie es die Stuttgarter Metall-Physiker soeben getan haben.

Im Streben um die Erreichung der optimalen Auflösung dieser Instrumente ist man in Deutschland nicht untätig. Neben den Anstrengungen von Firmen, werden in Berlin im Max-Planck-Institut unter der Leitung von Professor Ruska und Dr. Riecke z. Z. Untersuchungen unternommen, um auch das Letzte aus der Elektronenoptik und aus den magnetischen Linsen herauszuholen. Die Länge der de Broglie-Welle und der sphärische Fehler begrenzen das Auflösungsvermögen. Wird es gelingen, den sphärischen Fehler nach der von Professor Hoppe in München stammenden Idee eines neuartigen Korrektur-Ringsystems so weit zu korrigieren, daß die Atome sichtbar werden? Ein ringförmiges Blendensystem soll Strahlen, die im Bildpunkt nicht die richtige Phase haben, kurz hinter dem Objekt abblenden. Ich nehme gern die heutige Gelegenheit wahr, um der Öffentlichkeit mitzuteilen, daß der Tübinger Student cand. phys. Martin aus Luxemburg die Hoppe'sche Idee zur Korrektur des sphärischen Fehlers an Glaslinsen mit Lichtstrahlen in mehrjähriger sorgfältiger Arbeit geprüft hat und zu dem Ergebnis gekommen ist, daß eine Verbesserung des Auflösungsvermögens möglich ist und die Verbesserung quantitativ mit den Vorstellungen von Hoppe und den Berechnungen von Lenz und Krimmel, die mittels des Elektronischen Rechners in Tübingen erzielt wurden, übereinstimmt. Die gelungenen Versuche mit Lichtstrahlen geben uns den Mut, die Methode auch im Elektronen-Mikroskop zu erproben. Freilich sind

die Experimente äußerst diffizil. Ein den gegenüber Licht hunderttausendmal kleineren Elektronenwellen angepaßtes Mikro-Korrektur-Ringsystem gilt es herzustellen. In München haben die Computer laut Hoppe bereits die Daten für das System geliefert und F. Lenz hat die zusätzlich anzubringende Korrektur für das auf das Objekt übergreifende magnetische Vorfeld bereits berechnet. Die in Tübingen entwickelten Verfahren der sogenannten Mikrominiaturisation, zur elektronenoptischen Herstellung solch zarter Gebilde, die auf $1/1000$ mm genau und nur etwa $50/1000$ mm im Durchmesser haben, die in einer für diesen speziellen Zweck eingerichteten Abteilung unter der Leitung von Doz. Dr. Speidel und der Mitarbeit von Dipl.-Physiker v. Grote ausgearbeitet wurden, lassen hoffen, daß die in der Lichtoptik erzielten Ergebnisse auch in der Elektronenoptik realisierbar sind. Aus den Ausführungen über die derzeitigen Leistungen der Elektronenmikroskope ist ersichtlich, welchen hohen Stand die elektronenoptischen Abbildungselemente heute bereits erreicht haben. Sie sind die Voraussetzung für ein gut funktionierendes Elektronen-Interferometer. Was ist ein Elektronen-Interferometer? Aus Schulversuchen zur Lichtoptik mag Ihnen bekannt sein, daß es mittels des Biprismas aus Glas möglich ist, eine Lichtwelle in zwei kohärent schwingende Teilwellen aufzuspalten. Die Wellenzüge scheinen dabei von zwei virtuellen Quellen herzukommen. Die Überlagerung dieser beiden Wellenzüge führt zu einer streifenförmigen Interferenzerscheinung. Dieses Experiment wurde in Tübingen zum erstenmal mit Elektronenwellen durchgeführt. Ein feiner metallisierter Quarzfaden von $1/1000$ mm im Durchmesser liegt an einer Spannung von etwa 10 Volt. Es entsteht dadurch nach Aufspaltung des Elektronenstrahls in zwei Teilbündel eine Überlagerung der kohärenten Elektronen-Teilwellen. Qualitativ und quantitativ stimmt die Interferenzerscheinung mit unseren theoretischen Vorstellungen überein. Nie trat die Wellennatur in so brillanter Weise in Erscheinung wie in diesem Experiment, das schon vor einem

Jahrzehnt in Tübingen zum erstenmal realisiert wurde und jetzt zum Stand der Technik gehört. Es stellt bereits das zur Diskussion stehende Elektronen-Interferometer dar. Was uns bewegt, ist ein besonderes Experiment mit diesem elektronenoptischen Biprisma-Interferometer: Daß ein Elektron, wenn es auf zwei feine Spalte in einem Schirm zufliegt, weiß, daß nebenan noch ein 2. Loch vorhanden ist und beim Durchfliegen des einen Loches seine Bahn danach einrichtet, so daß eine Intensitätsverteilung hinter dem Schirm zustande kommt, die der Beugung am Doppelspalt entspricht, kennen wir aus dem Verhalten der Lichtquanten bereits seit Jahrzehnten. Das Experiment mit Elektronenwellen wurde in Tübingen von Dr. Jönsson durchgeführt, obwohl in der amerikanischen Literatur zu lesen stand, daß ein solches Experiment praktisch unmöglich sei. Das interessanteste Experiment mit dem Elektronen-Interferometer aber ist folgendes: Man erzeuge in einer kleinen Spule ein Magnetfeld und leite die Elektronen so um diese Spule, daß sie mit dem Magnetfeld nicht in Wechselwirkung treten. Es ergibt sich, wie Dr. Bayh im Interferometer feststellte, daß die Phase der Elektronenwelle entsprechend der Größe des eingeschlossenen Magnetflusses geschoben wird, obwohl keinerlei Kraftwirkung auf das Elektron einwirkt. In der Tat ist dieses ein kuriose Experiment, was selbst Physiker zu lebhaften Diskussionen anregt. Eine Elektronenwelle kann also selbst dann, wenn der Magnetfluß in einer Metallröhre verborgen ist, das Magnetfeld, ohne es zu berühren, erkennen und richtet seine Phase und damit seine Bahn danach ein. Ein analoges Experiment mit Lichtwellen gibt es nicht. Dieses Experiment ist nur unter Zuhilfenahme quantenmechanischer Begriffe zu verstehen. Schon die nach uns kommende Generation der Physiker wird als selbstverständlich empfinden, worüber wir uns heute noch wundern. Die neue Anwendung des freien Elektrons im Elektronen-Interferometer besteht darin, daß es jetzt möglich ist, den magnetischen Fluß zu messen, ohne eine zeitliche Änderung des Magnetflusses

vornehmen zu müssen oder ihn mittels einer bewegten zweiten Mikro-Spule am induzierten Strom zu messen.

Von weiterem Interesse für die Technik, insbesondere die Welt-raumfahrt, ist die Anwendung des elektronenoptischen Biprisma-Interferometers zur Stabilisierung von Achsen im Raum. Wenn man nämlich ein Interferometer um eine Achse rotieren läßt, dann wandert bekanntlich das Interferenz-Streifensystem, wie man aus dem Sagnac-Versuch mittels Lichtwellen schon vor Jahrzehnten nachgewiesen hat. Die Geschwindigkeit der Auswanderung der Streifen ist ein Maß für die Rotation eines Körpers im Raum. Eine elektronische Regelung soll die Drehung des Körpers wieder rückgängig machen. Amerikanische Firmen arbeiten bereits an der Verwirklichung eines drehbaren Elektronen-Interferometers, das wegen der kleinen Wellenlänge der Elektronenstrahlen ein handliches Gerät ergeben würde, das vielleicht später einmal den bekannten Kreisel ersetzen soll.

Ich habe Ihnen, verehrte Anwesende, nur über einige wenige aktuelle neue Anwendungen des freien Elektrons in Physik und Technik berichten können. Ich möchte meinen Vortrag schließen, indem ich aus der vor 60 Jahren von dem Tübinger Physiker Ferdinand Braun gehaltenen Rektoratsrede zitiere:

„Man hat bisweilen – gerade in den letzten Jahren – gewissermaßen einen Gegensatz zwischen angewandter und reiner Wissenschaft konstruiert. Der Anwendung verdankt die Naturwissenschaft die Gunst, in der sie heute steht – für sie Opfer zu bringen ist man bereit und berechtigt. Ehe man aber etwas anwenden kann, muß man es haben. Und das Letztere fließt fast immer aus der sogenannten reinen Wissenschaft.“