

Festkolloquium aus Anlass des 65. Geburtstages von Prof. Dr. Hannes Lichte



Es mag viele überrascht haben zu hören, dass es für Prof. Dr. Hannes Lichte am 23. Oktober diesen Jahres bereits den 65. Geburtstag zu feiern gab. Um diesen Anlass gebührend zu würdigen, organisierte das Institut für Strukturphysik der Technischen Universität Dresden gemeinsam mit dem DGE-Arbeitskreis Hochauflösende Transmissions-Elektronenmikroskopie ein Festkolloquium zu Ehren von Prof. Lichte. So füllte sich am 23.10.2009 der Hörsaal im Physikgebäude der TU Dresden durch Freunde, Familie und Kollegen, ehemalige Doktoranden sowie Studiengefährten, Mitarbeiter und Kooperationspartner und viele weitere interessierte DGE-Mitglieder aus ganz Deutschland.

Die Veranstaltung wurde mit der Begrüßung durch den Direktor des Instituts für Strukturphysik Prof. Dr. Christian Schroer feierlich eröffnet.

In der Reihe der Festredner begann der Dekan der Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften der Technischen Universität Dresden, Prof. Dr. Michael Ruck. Als Vertretung von Magnifizenz, des Rektors verlas der Dekan die Grußworte aus dem Rektorat der Universität. Auch ließ er es sich nicht nehmen, in seiner Position als Dekan, aber auch persönlich, seine Wertschätzung gegenüber Prof. Dr. Hannes Lichte Ausdruck zu verleihen.

Anschließend überbrachte Prof. Dr. Helmut Kohl als Vorsitzender der Deutschen Gesellschaft für Elektronenmikroskopie die Grußworte der

Gesellschaft. Mit dem richtigen Gespür für Pointen trug Prof. Kohl die aktenkundigen Erscheinungen von Hannes Lichte in der DGE zusammen: Angefangen beim Dokument der Aufnahme in die DGE im Jahre 1978, über die Verdienste bei der Organisation zweier Mikroskopie-Tagungen 1979 in Tübingen und 2003 in Dresden, sowie zur Verleihung des Ernst-Ruska-Preises 1989, bis hin zur Gründung des Arbeitskreises Hochauflösende Transmissions-Elektronenmikroskopie gemeinsam mit den Herren Rose, Phillipp, Haider und Kabius im Jahr 1997. Darüber hinaus wurde das Engagement von Prof. Lichte im Vorstand der DGE gewürdigt; er war über lange Zeit als Beisitzer im Vorstand tätig, von 2002-2003 als stellvertretender Vorsitzender und im Anschluss bis 2005 als Vorsitzender der Deutschen Gesellschaft für Elektronenmikroskopie. Überdies war Hannes Lichte von 1998-2002 im Executive Board der International Federation of Electron Microscopical Societies (IFSEM) aktiv und engagiert sich derzeit 2007-2011 als Mitglied im Ernst-Ruska-Preiskomitee.

Für die Laudatio wurde mit Prof. Dr. Michael Lehmann von der Technischen Universität Berlin eine Person gewonnen, die Hannes Lichte bereits über lange Zeit hinweg wissenschaftlich wie auch freundschaftlich begleitet. Angefangen als Student der Physik an der Universität Tübingen konnte Michael Lehmann als Diplomand, später als Doktorand und wissenschaftlicher Mitarbeiter das Wirken von Prof. Lichte lange Zeit in Tübingen, nachfolgend als Habilitand in Dresden erleben und somit authentisch über Vergangenheit und Gegenwart berichten. Hannes Lichte ist der Pionier der atomar auflösenden Elektronenholographie, angefangen von den physikalischen Grundlagen bis hin zur Anwendung auf spannende festkörperphysikalische Fragestellungen wie beispielsweise die Erforschung von Ferroelektrika. Aber auch die Grundlagen der inelastischen Elektronenholographie begeistern Hannes Lichte. Um diese holographischen hochempfindlichen Messungen durchzuführen, wurde das weltweit bekannte Triebenberglabor von Prof. Lichte entscheidend mit konzipiert

und seit Eröffnung im Jahr 2000 auch von ihm geleitet. Dabei nimmt er ganz im Sinne des Humboldt'schen Bildungsideals der Einheit von Forschung und Lehre auch seine Aufgaben als Universitätsprofessor wirklich ernst und begeistert für Naturwissenschaften nicht nur Studierende, sondern auch Schulkinder im Rahmen der Kinderuniversität. Eine ganz besondere Verantwortung sieht Hannes Lichte in den gesellschafts- und wissenschaftspolitischen Brennpunkten unserer Zeit. Zum Abschluss der Laudatio wurde Prof. Lichte die Rohfassung einer ihm gewidmeten Ausgabe der Fachzeitschrift „Ultramicroscopy“ überreicht. Der Ultramicroscopy-Band wird voraussichtlich im April 2010 erscheinen und beinhaltet die neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der höchstauflösenden Elektronenmikroskopie und holographie.

Bei einer festlichen Veranstaltung wie dieser ist es stets ein Gewinn, wenn auch im wissenschaftlichen Programmteil die Vortragenden eine persönliche Note in ihren Beiträgen einbringen. Aus diesem Grund wurden mit Prof. Dr. Harald Rose von der Technischen Universität Darmstadt und Dr. Kurt Scheerschmidt vom Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik zwei Personen gewählt, die neben ihrem exzellenten Ruf in der TEM-Community auch eine lange freundschaftliche Beziehung zu Hannes Lichte pflegen. Sehr zur Freude der Organisatoren sagten beide Redner bei der Planung der Veranstaltung sofort begeistert zu.

Der wissenschaftliche Vortrag von Harald Rose widmete sich den Problemen der Abbildung mit runden Elektronenlinsen und deren Lösung. Beginnend bei der Historie der atomaren Auflösung mit all ihren Problemen, über die Verwirklichung durch die Elektronenholografie mit allen Vor- und Nachteilen bis hin zu der Realisierung atomarer Auflösung durch Aberrationskorrektoren vermittelte Harald Rose einen großen Überblick zu den Meilensteinen der Elektronenoptik und -mikroskopie. Mit großem Interesse verfolgte das Auditorium seine abschließenden Ausführungen zu aktuellen und zukünftigen Entwicklungen sowie seinen Ideen zum SALVE-Projekt, bei dem es darum

geht, die atomare Abbildung auch bei niedrigen Hochspannungen zu verwirklichen.

Der Beitrag von Dr. Scheerschmidt widmete sich dem „inversen Blick auf die Dinge“ und eröffnete dem Auditorium auf ganz besondere Weise einen historischen Rückblick auf seine langjährige Zusammenarbeit mit Hannes Lichte. Er berichtete über die Anstrengungen, die unter den Widrigkeiten der DDR-Administration notwendig waren, um bereits 1988 eine wissenschaftliche Zusammenarbeit zwischen der Universität Tübingen und der Akademie der Wissenschaften in Halle (Saale) zustande kommen zu lassen; eine Kooperation, die bis heute zwischen dem Triebenberg in Dresden und dem Weinberg in Halle (Saale) anhält. Mit seinen Ausführungen zum inversen Problem der dynamischen Elektronenbeugung spannt Kurt Scheerschmidt den Bogen zur Elektronenholographie und zeigt Ansätze und Lösungen an einigen Beispielen auf.

Nach dem abschließenden „letzten Wort“ von Prof. Lichte fand der festliche Nachmittag mit Buffet und Getränken einen gebührenden Ausklang.

Die Organisatoren bedanken sich aufs herzlichste bei allen Beitragenden, den fleißigen Helfern sowie den Sponsoren, die alle den Erfolg der Veranstaltung maßgeblich mit zu verantworten haben. Ohne die großzügige finanzielle Unterstützung durch FEI Deutschland und die Deutsche Gesellschaft für Elektronenmikroskopie wäre das Festkolloquium in diesem Rahmen so nicht möglich gewesen.

Martin Linck
Triebenberglabor der TU Dresden

Gottfried Möllenstedts elektronenoptisches Biprisma, Schlüssel zur Wellenoptik von der Elektronen-Interferometrie zur Holographie

Professor Dr. Hannes Lichte zum 65. Geburtstag gewidmet von Dietrich Schulze, Dresden

Die Entdeckung

Mit Eingangsdatum 21. Oktober 1954 erscheint eine „Kurze Originalmittei-

lung“ in „Die Naturwissenschaften“ von Gottfried Möllenstedt (1912–1997) und Heinrich Düker (1923–1985), betitelt, „FRESNELScher Interferenzversuch mit einem Biprisma für Elektronenwellen“ [1].

Vergleichend mit dem optischen Fresnelschen Biprismaexperiment (Abb. 1a) wurde gezeigt, dass sich der lichtoptische Interferenzversuch analog auch mit Elektronenwellen verwirklichen lässt. Das damals entwickelte Biprisma bestand aus einem 3 µm dicken, metallisiertem Quarzfaden und zwei geerdeten Elektroden im Abstand von je 2 mm vom Faden. Eine Fadenspannung von ca. 10 V bewirkte bereits die erwünschte Umlenkung der kohärenten Strahlen, so dass zwei kohärente virtuelle Quellen entstanden (Abb. 1b). Für 30 kV Beschleunigungsspannung des (elektrostatischen) Mikroskops ergab sich gemäß $\Delta_{el} = \lambda \times c' / a'$ mit den in Abb. 1b angegebenen Daten und $\lambda = 0,07 \text{ \AA}$ ein Streifenabstand von 1600 Å. In einer derart erzeugten Abbildung ließen sich 100 Interferenzstreifen im berechneten Abstand auszählen. Die Autoren erkannten überdies die grundlegende Eigenschaft des Biprismas, wonach der Ablenkwinkel der Elektronen gleich ist, unabhängig von der Entfernung in der sie den Biprismafaden passieren.

Visionär heißt es abschließend u. a.: „Das Gelingen dieses Experimentes verdient besondere Aufmerksamkeit im Hinblick auf die aktuelle Frage der Möglichkeit der Interferometrie mit Elektronenwellen“. Aus heutiger Sicht war damit auch die Grundlage für die Holographie gegeben. Bald darauf melden die Autoren ein Patent für die Fa. Carl Zeiss, Heidenheim/Brenz an (28. Mai 1955).

Eindrucksvoll, geradezu ein Lehrstück, war die Entdeckungsgeschichte des Biprisma-Effektes, wie sie Möllenstedt (Abb. 2) schildert [2]* „Zum Moment der Inspiration der Idee, ein Elektronen-Biprisma für die Elektronenstrahl-Interferometrie“, heißt es: „In Mosbach arbeitete ich mit dem elektrostatischen Mikroskop AEG/Zeiss EM 7. Mit diesem Gerät gelang es mir, durch Fixierung eines Wolf-

*Freie, gekürzte Rückübersetzung der englischen Fassung von Tom Mulvey

ramdrahtes über der Bohrung der Objektivapertur in der hinteren Brennebene des Objektivs, Dunkelbilder zu erzeugen. Derart konnte man in einer einzigen Mikrographie ein Hell- und ein Dunkelfeldbild registrieren (Abb. 3). Nach längerer Betriebsdauer verursachte diese neue Apertur-Anordnung jedoch Unvollkommenheiten im Endbild. Infolge des Elektronenbom-

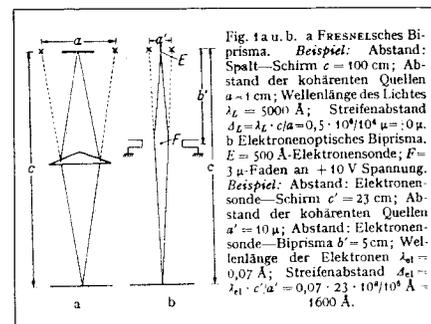


Abb. 1: Wie Fig. 1 a und b in „Die Naturwissenschaften“ 42 (1954) 41.



Abb. 2: Gottfried Möllenstedt.



Abb. 3: Hell- und Dunkelfeldbild von Zinkoxid in einer Aufnahme, erzeugt mittels eines Wolframdrahtes über der Objektiv-Aperturblende (EM 7; Gesichtsfeld 270 nm).

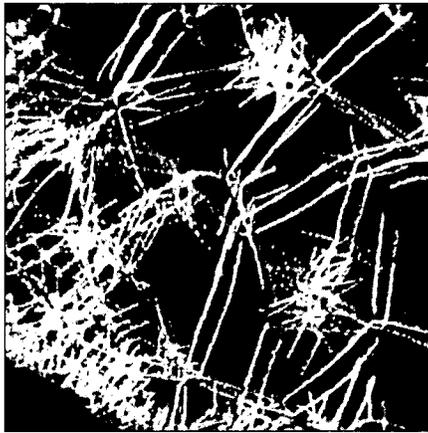


Abb. 4: Doppelbild von Zinkoxid-Kristallen, verursacht durch elektrische Aufladung des kontaminierten Wolframfadens über der Objektiv-Apertur: 8000:1.

bardements auf die Apertur bildete sich eine – wohlbekannte »Kontaminations-Schicht« auf dessen Oberfläche. Dies bewirkte die elektrische Aufladung des Drahtes. Der bemerkenswerteste Effekt war, dass man häufig Doppelbilder erhielt“ (Abb. 4).

Möllenstedts Labor-Notizbuch von 1953 enthält eine lichteoptische Abbildung der durch den Wolframdraht modifizierten Aperturbildung nebst Randbemerkungen: „Was wird, wenn man die Doppelbilder übereinander hat? Ist Kohärenz gegeben?“ Weiter berichtet Möllenstedt über den schöpferischen Moment: „Plötzlich blitzte ein Funke in meinem Bewußtsein auf.“ – „Doppelbilder sind gut für nichts, es sei denn sie sind kohärent!“ – „Wie kann man sie überlagern? Es war klar, dass die elektrische Ladung auf dem Draht positiv statt negativ sein mußte. Die Bilder würden sich übereinander bewegen und Interferenzstreifen müßten, wegen der unterschiedlichen Weglängen entstehen. Von meinen Forschungsstudenten wählte ich Heiner Düker (Abb. 5) als Doktoranden für diese Aufgabe aus. Er hatte bereits Erfahrung in der elektronenmikroskopischen Technik durch die Praktika, die er an der Universität Tübingen einführte. Ferner war er technisch sehr versiert, da er als Elektro-Chefingenieur auf U-Booten während des Krieges fungierte.“ Möllenstedt war Düker auch menschlich sehr zugetan [2].

Möllenstedts wacher Intellekt und seine goldenen Hände haben die Interferometrie in der Folgezeit rasch vorangebracht. Auch seine Menschenkenntnis und beurteilung waren die-



Abb. 5: Heiner Düker.

sen Zwecken dienlich: Auswahl des geeigneten Kandidaten für eine anspruchsvolle Aufgabe.

Tübingen

In zahlreichen Experimenten versuchten Möllenstedt und seine Mitarbeiter, die Quanteneigenschaften des Elektrons zu verstehen sowie den optischen Eigenschaften diverser Objekte nachzuspüren. Hier kann allerdings in aller Kürze nur über die wichtigsten Glanzlichter referiert werden.

Grundsätzlich bedeutsam war die interferometrische Bestimmung der deBroglie-Wellenlänge (Energiebereich (1 keV bis 1.2 MeV) [3], dies zur Freude von Louis de Broglie (Nobelpreis 1929). Er schreibt 1956 an Möllenstedt: „J'ai naturellement un grand plaisir à voir que vous avez ainsi obtenu une nouvelle preuve particulièrement brillante de la formule $\lambda = h/p$ et je ne manquerai pas de faire connaître vos expériences à mes élèves.“

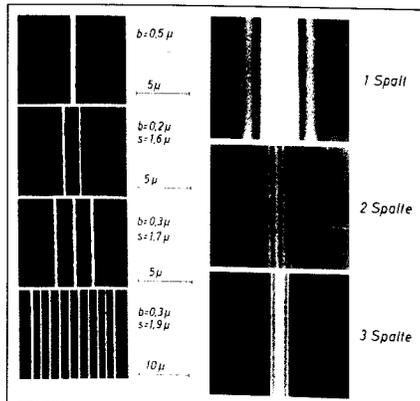


Abb. 7: Beugung von Elektronenwellen an Spalten in einer 5000 Å dicken Kupferfolie, links: Spalten, Breite b, Abstand s; rechts: Interferenzen.

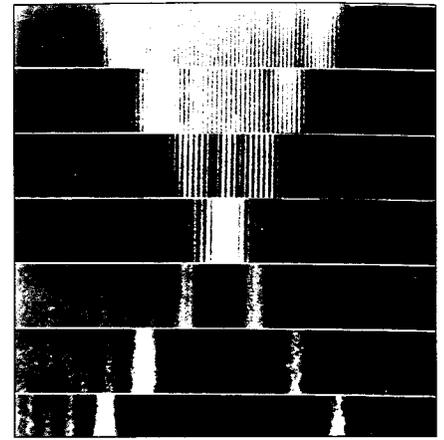


Abb. 6: Überlagerung der kohärenten Teilwellen sowie der Streifenabstände der Biprisma-Interferenzen als Funktion der Fadenspannung UF.

Ferner waren grundlegende Fragen – in Gegenüberstellung von Licht- und Elektronenoptik – eingehend zu untersuchen. Das lichteoptische Biprisma hat bekanntlich einen festen Ablenkswinkel, jener des Elektronen-Biprismas ist allein durch die Regelung der Fadenspannung über einen weiten Bereich variierbar [3] (Abb. 6). Es war gewiss reizvoll, aus der Lichteoptik bekannte Experimente in die Elektronenoptik zu übertragen, wie u. a. die Beugung an Spalten [4] (Abb. 7) oder am Strichgitter (Abb. 8). Solch feine beugenden Strukturen ließen sich mit der von Möllenstedt und Speidel [5] 1960–63 zu höchster Perfektion entwickelten Elektronen- bzw. Ionen-Strahl-Lithographie herstellen, ebenso Fresnelsche Zonenlinsen für die fokussierte Röntgenabbildung sowie die Korrektur des Öffnungsfehlers der Objektivlinse im Elektronenmikroskop [6]. Als bald begannen in Tübingen systematisch vertiefende Arbeiten

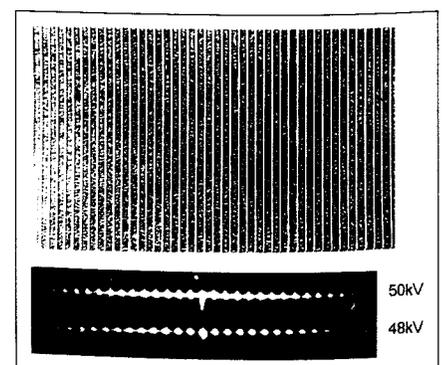


Abb. 8: Beugung am sinusförmigen, mit Elektronenstrahl geschriebenen Strichgitter; Gitterkonstante 700 Å, Linienbreite 1000 Å; oben: Gitter, unten Beugungsmuster für 50 und 48 keV Elektronenenergie (Holl. unveröffentlicht).

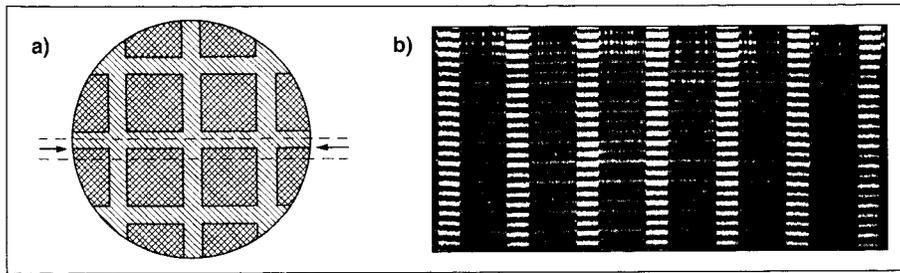


Abb. 10: Messung des mittleren inneren Potentials.
 a) Anordnung der kohärenten Teilwellen bezüglich der Flächen unterschiedlicher Dicke;
 b) Interferenzstreifen; $U_b = 60$ kV; Aluminium; Dickenunterschied 100Å.

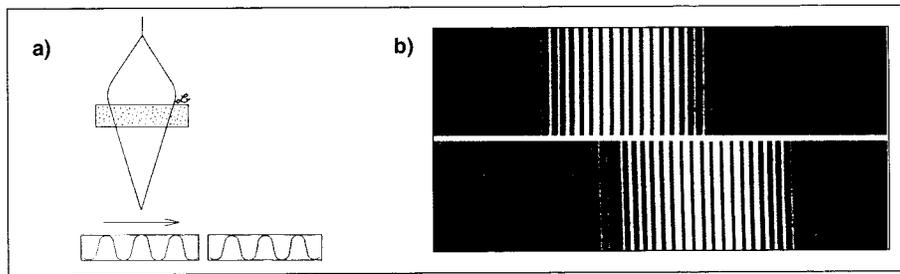


Abb. 12: a) Überlagerung eines Magnetfeldes \vec{B} beider kohärenten Teilwellen; b) die Interferenzstreifen sind vollständig seitlich verschoben.

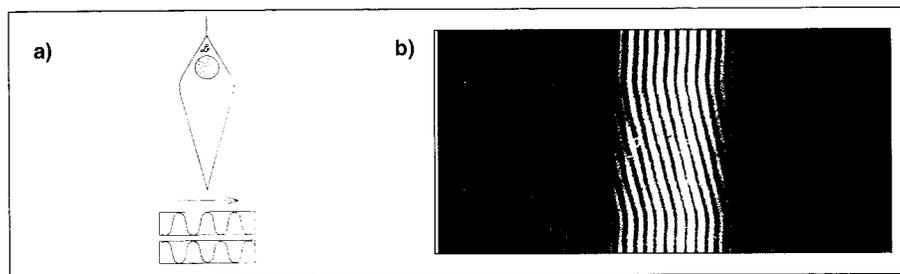


Abb. 13: a) die kohärenten Teilwellen umfassen das Magnetfeld \vec{B} ; b) mit kontinuierlich geänderten Magnetfeld verschieben sich die Interferenzstreifen seitlich.

zu den physikalischen Eigenschaften von Elektronenwellen:

Untersuchungen zu deren Kohärenzeigenschaften. Messungen des Kontaktpotentials zwischen Biprismafäden und den geerdeten Elektroden. Besteht das Prisma aus unterschiedlichen Materialien, wird der Abstand zwischen den Interferenzstreifen erheblich beeinflusst [7]. Messungen des mittleren inneren Potentials dünner Schichten: Keller [8] konstruierte 1961 dafür ein spezielles Interferometer (Abb.9). Kerschbaumer [9] und Schaal [10] untersuchten damit „gestufte“ Schichten bis 300 kV Beschleunigungsspannung (Abb. 10).

Bereits 1957 stellten Möllenstedt und Buhl ein Interferenzmikroskop im Transmissions-Mode vor [11]; Weiterentwicklung durch Buhl 1959 [12] (Abb. 11). Die Bildebenen-Holographie geht ursprünglich auf Wahl zurück [13]; die Rekonstruktion der

Hologramme, damals noch mittels He-Ne-Laser, ergab eine laterale Auflösung von 20 Å.

Ein umfassendes Programm widmete sich 1962–1970 dem Einfluß des magnetischen Vektorpotentials \vec{B} auf die in Biprisma-Interferenzen nachweisbaren Phasenschiebungen:

1. Das Magnetfeld \vec{B} wird von beiden kohärenten Teilwellen überlagert; die Interferenzstreifen erfahren eine vollständige (unstetige) seitliche Verschiebung (Abb. 12).

2. Die kohärenten Teilwellen umfassen das Magnetfeld \vec{B} , verlaufen im feldfreien Raum, spüren also keine Lorentz-Kraft. Dennoch verschieben sich die Interferenzstreifen mit kontinuierlich zunehmenden Magnetfeld stetig zur Seite, wobei der Interferenzbereich fixiert bleibt (Abb. 13)

3. Die kohärenten Teilwellen werden mittels dreier Biprismen derart um eine in einem Goldröhrchen ge-

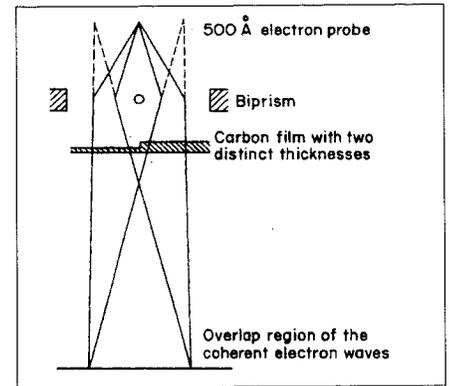


Abb. 9: Strahlenwege im Elektroneninterferometer zur Messung des mittleren inneren Potentials.

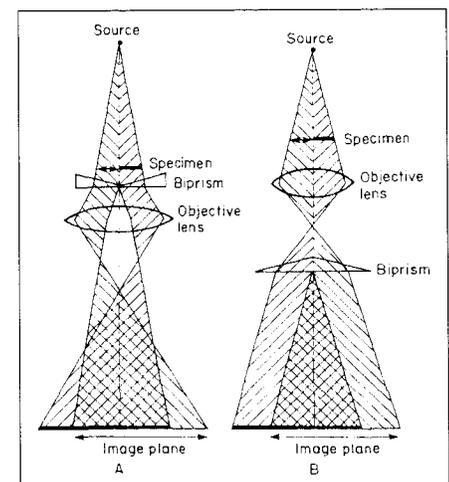


Abb. 11: Elektronen-Biprisma-Interferenzmikroskop mit rotationsymmetrischem elektrostatischem Objektiv; zwei Varianten: a) Biprisma vor, b) Biprisma nach Objektiv angeordnet.

kapselte Mikrospule so um den Magnetfluß ϕ herumgeführt, dass die Elektronen das \vec{B} -Feld nicht spüren (Abb. 14). Dennoch resultiert eine Phasenschiebung $\varphi = (e/h) \cdot \varphi$ [14]*.

4. 1970 konnte Wahl mit dem Apparat nach Abb. 14, in den er anstelle der Spule einen supraleitenden Hohlzylinder einsetzte, die Wirkung des „eingefrorenen“ Flusses auf die Interferenzen nachweisen [18].

Auch die Eigenschaften der Elektronenquelle bedurften hinsichtlich Richtstrahlwert und Kohärenz der Elektronenwelle der näheren Untersuchung. Am Fall der Feldemissionskathode hat Braun 1972 die Sichtbarkeit (den Kontrast) der Biprisma-Interferenzstreifen in Abhängigkeit von

* Der nach Aharonov-Bohm (1959) benannte Effekt [15] war von Ehrenberg und Siday schon 1949 [16] und von Glaser (1952) [17] vorausgesagt worden.

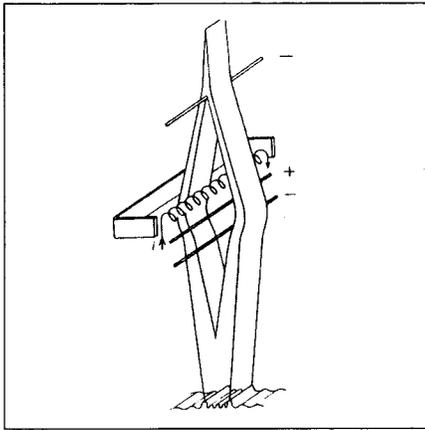


Abb. 14: Prinzipielle Anordnung des Interferometers nach Bayh. Das obere Biprisma an negativem Potential bewirkt Divergenz, das zweite, positive beaufschlagte hingegen Konvergenz. Das dritte sorgt für einen kleinen Überlagerungswinkel in der Beobachtungsebene.

deren Raumfrequenz sowie die räumliche Intensitätsverteilung der Spitzenkathode gemessen [19]. Prof. Y. Sakaki entwickelte diverse Varianten von Feldemissionskathoden.

Im Rahmen seiner Diplom- bzw. Doktorarbeit baut und betreibt Lichte zwischen 1970 und 1978 ein Reflexions-Interferenzmikroskop („Michelson-Interferometer für Elektronenwellen“) [20]. Mit diesem Elektronenspiegel (Abb. 15) wird nachgewiesen, dass Höhenunterschiede von atomarer Größenordnung die Phase um 2π schieben. Das Gerät dient ferner dazu, den Dopplereffekt an Elektronenwellen nachzuweisen [21].

Auch das Analogon zum Doppelspiegel-Experiment nach Young und Fresnel gelingt elektronenoptisch mit dem Echelette-Gitter als Doppelspiegel [22]. Sämtliche aus der Lichtoptik bekannten Kardinalexperimente sind in Möllenstedts Tübinger Schule elektronenwellenoptisch analog verifiziert worden.

Ein diffiziles Experiment betrifft die interferometrisch messbare Frequenzänderung (beating), wenn die kohärenten Teilwellen ein Mikro-Betatron umfassen (Abb. 16). Eine kontinuierliche Änderung des Magnetflusses ϕ induziert ein elektrisches Wirbelfeld E um die Flussröhre. Die Teilwelle längs Weg 1 wird beschleunigt, jene längs Weg 2 verzögert. Eine Flussänderung um ein Fluxon $\phi_0 = h/e$ pro sec resultiert in einer beat-Frequenz von 1Hz; Bayh (1962) [23].

Ab 1980 folgt eine Serie entscheidender Arbeiten zur atomar auflösenden Elektronen-Holographie. So gelangen Lichte erstmalig Hologramme atomarer Strukturen und deren Rekonstruktion mittels Computer unter Korrektur der Abbildungsfehler am Nioboxid-Kristall [24] (Abb. 17). Damit wird u.a. nachgewiesen, dass sich die Vision der holographischen Bildrekonstruktion von Dennis Gabor (NP Physik 1971) elektronenoptisch verwirklichen lässt. Ein weiteres wesentliches Resultat in dieser Zeit ist die holographische atomare Auflösung der Dumbbells längs [110] in Si-

litzium (0.134 nm). Der Lichte-Fokus, ein bestimmter Defokussierungswert, verbürgt maximale Information im Hologramm [25]. Studien zum Signal-Rausch-Verhältnis bezweckten die Ermittlung der ultimativen Nachweisgrenze unter den jeweiligen Abbildungs- und Registrierungs-Bedingungen, was unter anderem für die Untersuchung schwacher Phasenobjekte (z.B. biologischer Präparate) wesentlich ist [24].

Voraussetzend eine CCD-Kamera mit hinreichender Pixel-Anzahl und unter Einsatz einer Work-Station, worin die Funktionen eines Elektronenmikroskops impliziert sind, stellen Lehmann und Mitarbeiter zwischen 1994 und 1997 die Rekonstruktion der Hologramme nach Amplitude und Phase auf eine handhabbare rationale Grundlage [26, 27, 28] (Abb. 18). Rau und Mitarbeitern gelingt 1999 erstmalig das elektrostatische Potential in n- und p-MOSFETs im Phasenbild deutlich sichtbar zu registrieren [29]. Soweit Wesentliches zu den Arbeiten im Institut für Angewandte Physik der Universität Tübingen.

Triebenberglabor

Was war in der jüngsten Vergangenheit und was ist heute aktuell?

Dies vor allem unter den hervorragend störungsfreien Bedingungen im weltweit einmaligen „Speziallabor für Höchstauflösungs-Elektronenmikroskopie und Holographie“ der TU

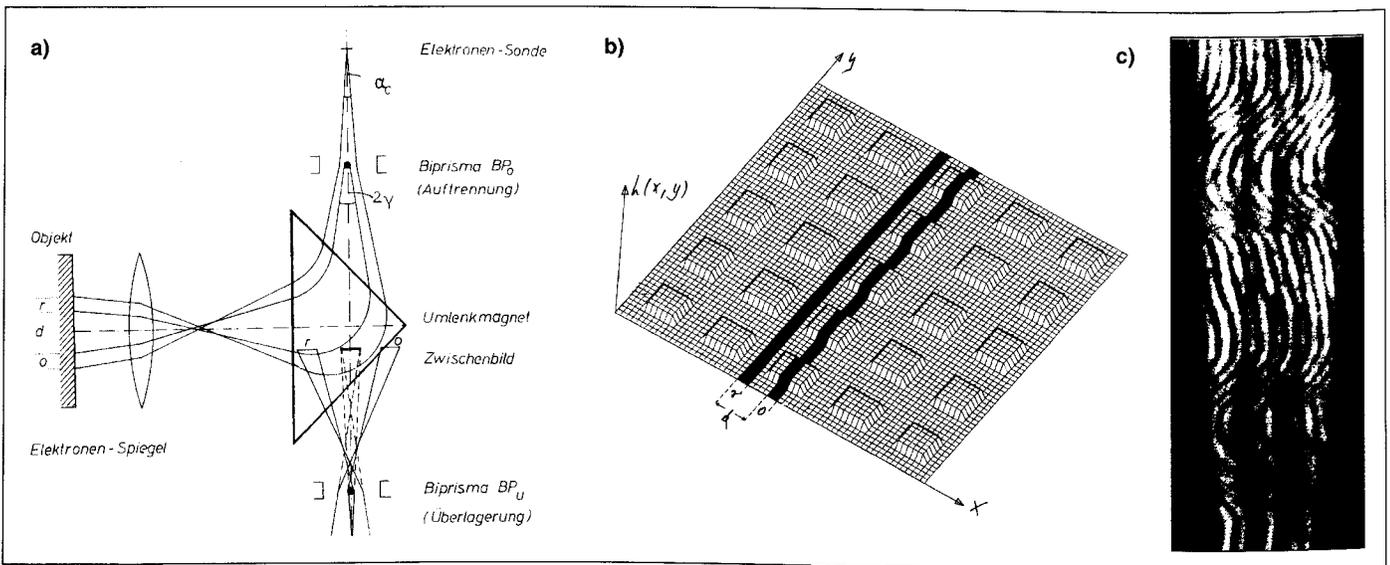


Abb. 15:
a) Schema des Reflexions-Elektronenmikroskops mit elektrostatischem Spiegel
b) Testobjekt: Gold-Quadrate 25 Å hoch, gegenseitiger Abstand 12 μm
c) Interferogramm der Teilwellen r und o, reflektiert an den schwarzen Flächen.

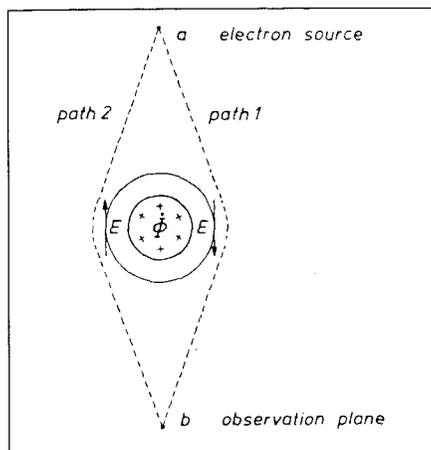


Abb. 16: Schema zur Frequenzänderung mittels Mikro-Betatron.

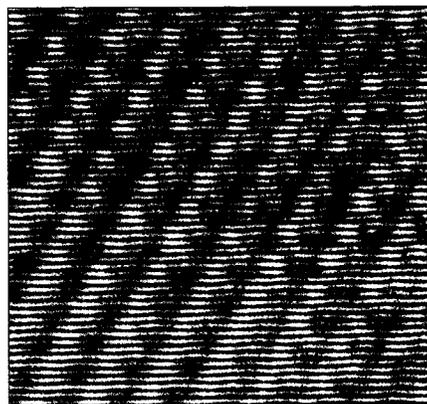


Abb. 17: Elektronen off-axis Bildebenen-Hologramm eines Nb₂O₅-Kristalls. Die Auslenkung der 0,075 nm-Interferenzstreifen zeigt die starke Phasenmodulation.

Dresden am CM 30 FEG UT/Special Tübingen.

Die von Möllenstedt vor einem halben Jahrhundert gestellte Frage nach der Kohärenz wird heute stets erneut, jedoch schärfer gestellt. Haben wir unter den jeweiligen experimentellen Bedingungen, der speziellen Frage an die Natur, hinreichend Kohärenz? Lichte hat die Kohärenz nachgewiesen als er – gemeinsam mit Freitag – mit inelastisch gestreuten Elektronen ein Hologramm registrierte [30]. In der höchstauflösenden Elektronenholographie geht die Entwicklung zur „Holographie mittels eines öffnungsfehler-korrigierten Elektronenmikroskops“. Damit können sowohl die Auflösung als auch das Signal-Rauschverhältnis verbessert werden.

Unvermeidliche Rest-Bildfehler lassen sich nachträglich mittels Computer korrigieren [31].

Anwendungen betreffen mikromagnetische Felder, Ferroelektrika, biologische sowie organisch chemische Objekte, z.T. gekoppelt mit analytischen Fragen. Huhle [32] gelingt es beispielsweise, das magnetische Streufeld einer Eisennadel im Nanobereich – separiert von elektronischen Einflüssen – als Phasenbild zu registrieren. In Ferroelektrika, wie Lithiumniobat oder Bariumtitanat offenbart das Phasenbild die Kompliziertheit der ferroelektrischen Domänenstruktur [33]. Überdies ist nachgewiesen, um welchen Betrag ein ferroelektrischer Dipol im BaTiO₃ die Phase schiebt – Von analytischem Belang ist,

dass anhand des Phasenbildes Ort und Art der Atome im GaAs präzise angegeben werden können. Damit ist ein erster Schritt zur quantitativen analytischen Holographie getan [33].

Abschließend sei noch auf ein quantenphysikalisch bedeutsames Experiment der Tübinger Schule hingewiesen: „Ein einzelnes Elektron erzeugt kein Interferenzmuster. Erst wenn durch entsprechend lange Integrationszeiten eine hinreichend grosse Elektronenanzahl auf dem Detektor aufsummiert ist, werden die Interferenzstreifen als Häufigkeitsverteilungen sichtbar (zitiert nach H. Lichte, unveröffentlicht).“

Schlussbemerkungen

Wieder einmal bewahrheitet sich, „kleine Ursachen, große Wirkungen“: Ein winziges, positiv geladenes Drähtchen im elektronenoptischen Strahlengang „halbiert“ die Welle, überlagert die Teilwellen, so dass beeindruckende Interferenzen entstehen. Überdies: Dennis Gabors Vision, das holographische Prinzip [34] (NPP 1971), „alles schreiben“ ist, bis in atomare Dimensionen, inzwischen beeindruckende Realität. Elektronenmikroskopische Laboratorien in aller Welt bedienen sich des Möllenstedt-Prismas.

Herrn Prof. Dr. Michael Lehmann sei für die kritische Durchsicht des Manuskripts herzlich gedankt.

Literatur

- [1] Möllenstedt, G., Düker, H.: Die Naturwissenschaften **42** (1954) 41.
- [2] Möllenstedt, G.: Optik **73** (1986) 87.
- [3] Möllenstedt, G., Düker, H.: Z. Phys. **145** (1956) 377.
- [4] Möllenstedt, G., Jönsson, C.: Z. Phys. **155** (1959) 472; Jönsson, C.: Z. Phys. **161** (1961) 454.
- [5] Möllenstedt, G., Speidel, R.: Phys. BI **16** (1960) 192; Z. angew. Physik **13** (1961) 231; Z. angew. Physik **16** (1963) 347.
- [6] Grote, K. H. von, Möllenstedt, G. und Speidel, R.: Optik **22** (1965) 252.
- [7] Krimmel, H., Möllenstedt, G., Rothmund, W.: Appl. Phys. Lett. **5** (1964) 209; Brünger, W.: Z. Phys. **250** (1972) 263.
- [8] Keller, M.: Z. Phys. **164** (1961) 274.

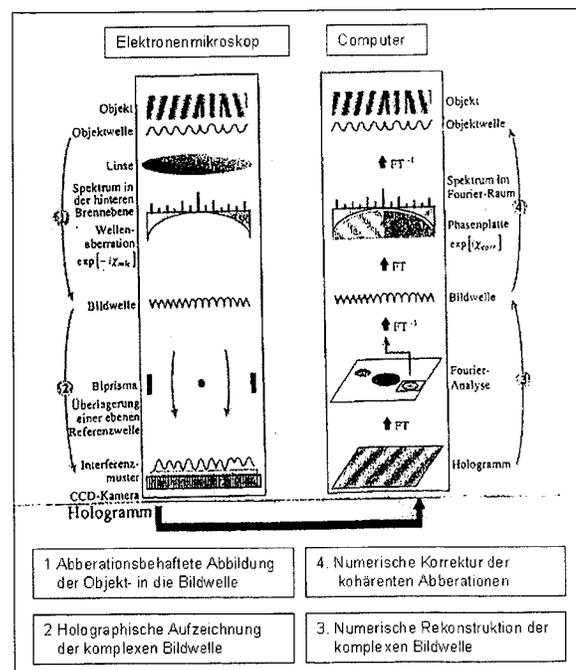


Abb. 18: Schema zur holographischen Registrierung der Elektronenwelle im Elektronenmikroskop und anschließender Prozessierung im Computer. Durch Einsatz einer CCD-Kamera und eines leistungsfähigen Rechners lässt sich sowohl die Bildwellenrekonstruktion als auch die Aberrationskorrektur on-line durchführen. Wenige Sekunden nach dem Auslesen des CCD-Signals werden – nach Generierung einer Phasenplatte $\exp\{i\chi_{corr}(q)\}$ und deren Anwendung auf die rekonstruierte Bildwelle – Amplitude und Phase der Objektwelle auf einem Monitor dargestellt.

- [9] Kerschbaumer, E.: Z. Phys. **201** (1967) 200.
 [10] Schaal, G.: Z. Phys. **241** (1971) 65.
 [11] Möllenstedt, G., Buhl, R.: Phys. BI. 13 (1957) 357.
 [12] Buhl, R.: Z. Phys. **155** (1959) 395.
 [13] Wahl, H.: Optik **39** (1974) 585; Habilitationsschrift, Tübingen 1975.
 [14] Bayh, W.: Z. Phys. **169** (1962) 492.
 [15] Aharonov, Y., Bohm, D.: Phys. Rev. **115** (1959) 485.
 [16] Ehrenberg, W., Siday, R. E.: Proc. Phys. Soc. B **62** (1949) 8.
 [17] Glaser, W.: Grundlagen der Elektronenoptik, Springer-Verl., Wien 1952.
 [18] Wahl, H.: Optik **30** (1970) 508, 577.
 [19] Speidel, R., Kurz, D.: Optik **49** (1977) 173 Braun, K. J.: Diplomarbeit. Tübingen (1972).
 [20] Lichte, H., Möllenstedt, G., Wahl, H.: Z. Phys. **249** (1972) 456.
 [21] Möllenstedt, G., Lichte, H.: 9. Int. Congr. EI. Microscopy, Toronto. Vol. **1** (1978) 178.
 [22] Möllenstedt, G., Lichte, H.: Optik **51** (1978) 423.
 [23] Bayh, W.: Z. Phys. **169** (1962) 492.
 [24] Lichte, H., Herrmann, K.-H., Lenz, F.: Optik **77** (1987) 135.
 [25] Lichte, H.: Ultramicroscopy. **38** (1991) 13.
 [26] Lehmann, M., Völkl, E., Lenz, F.: Ultramicroscopy **54** (1994) 335.
 [27] Lehmann, M.: „Numerische Rekonstruktion der aberrationsfreien Objektwelle aus off-axis Elektronenhologrammen“, Dissertation, Tübingen 1997; Lehmann, M.: Ultramicroscopy **85** (2000) 165.
 [28] Lehmann, M., Lichte, H.: in Tomomura et al. (Edit.): „Holography“, p. 69, Elsevier Science, B.V.; 1995.
 [29] Rau, W. D. et al.: Phys. Rev. Letters **82** (1999) 2614.
 [30] Lichte, H., Freitag, B.: Ultramicroscopy **81** (2000) 177.
 [31] Lichte, H., Lehmann, M.: Advances in Imaging and Electron Physics **123** (2000) 225.
 [32] Huhle, R., Goldberg, R., Lichte, H.: Elektronenmikroskopie **21** (2001) 23.
 [33] Brand, K. et al.: in G. W. Bailey (Edit.). Conf. an Microscopy and Microanalysis 2001, Longbeach, CA., Springer, New York, p. 284.
 [34] Gabor, D.: Nature **161** (1948) 777.

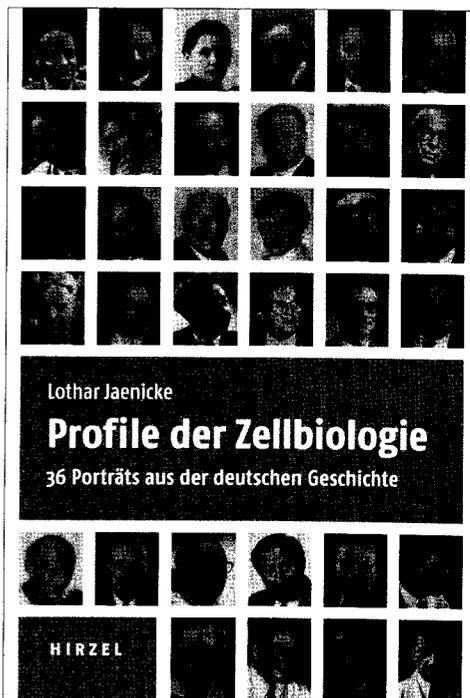
*Prof. (em.) Dr. Dietrich Schulze
 Technische Universität Dresden
 Institut für Strukturphysik*

Profile der Zellbiologie

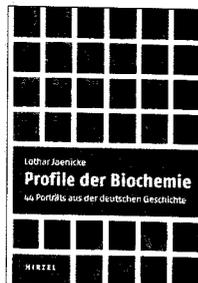
36 Porträts
 aus der deutschen
 Geschichte

Von Lothar Jaenicke
 2010. 329 Seiten.
 52 Abbildungen.
 Gebunden mit
 Schutzumschlag.
 ISBN 978-3-7776-
 1693-3

€ 34,- [D]



Lothar Jaenicke verfolgt die Spuren von Frauen und Männern, die zu den Pionieren der Entwicklungs-, Vererbungs- und Zellbiologie zählen. Seine Porträts sind mittelbare und unmittelbare Erinnerungen an Talente, von denen Deutschland die meisten durch Hitlers Politik verlor. Sie alle kennzeichnet die Leidenschaft, mit der sie Wissenschaft, Forschung und Fragen nach den Konsequenzen ihrer Arbeit – aber nicht immer ihres Tuns – zum Beruf machten und darin lebten und dachten. Dieses Buch soll dazu beitragen, dass ihre Schicksale nicht vergessen werden.



Ebenfalls erhältlich:

Jaenicke,
Profile der Biochemie
 € 36,- [D].
 ISBN 978-3-7776-1517-2

Kombipreis für beide Titel zusammen:

ISBN 978-3-7776-2095-4
 € 59,- [D]

HIRZEL

Birkenwaldstr. 44 · 70191 Stuttgart
 Tel. 0711 2582 341 · Fax 0711 2582 390
 service@hirzel.de · www.hirzel.de