

## Ionenübermikroskopie

Von H. BÖRSCH<sup>1</sup>

Ein Entwicklungsziel der Mikroskopie ist die Steigerung des Auflösungsvermögens bis zur Auflösung und Sichtbarmachung der Atome. Die heute üblichen Methoden der Elektronenmikroskopie und ihre kontinuierliche Entwicklung durch Verbesserung der heute üblichen Linsen scheinen dazu nicht imstande zu sein. Daher ist es notwendig, sich nach anderen Methoden umzusehen, die dieses Ziel zumindest im Prinzip zu erreichen gestatten. Eine dieser Methoden scheint die Ionenübermikroskopie<sup>2</sup> zu sein, die anstelle von Elektronen als Ladungsträger Ionen benutzt. Die Grundlagen der Ionenmikroskopie sollen hier daher einer eingehenderen Betrachtung unterzogen werden.

Erinnern wir uns zunächst einmal, daß das Auflösungsvermögen des Elektronenmikroskops prinzipiell durch das Zusammenwirken von Linsenfehler und Beugungsfehler begrenzt ist. Zu den unvermeidlichen Linsenfehlern gehört in erster Linie der Öffnungsfehler. Unter optimalen Verhältnissen besitzen der Durchmesser des *Öffnungsfehlerscheibchens*

$$d_o = 2 C_o \vartheta^3 \quad (1)$$

und der Durchmesser des *Beugungsfehlerscheibchens*

$$d_B \approx \frac{\lambda}{\vartheta} \quad (2)$$

angenähert gleiche Größe. ( $C_o$  = Öffnungsfehlerkonstante,  $\vartheta$  = Objektivapertur,  $\lambda$  = Wellenlänge.) Hieraus ergibt sich die *optimale Objektivapertur*

$$\vartheta_{opt} \approx C_o^{-1/4} \lambda^{1/4} \quad (3)$$

und die *optimale Auflösung*

$$d \approx C^{1/4} \lambda^{3/4} \quad (4)$$

Nach (4) beträgt das optimale Auflösungsvermögen der besten heutigen elektrostatischen ( $e$ ) und magnetischen ( $m$ ) Linsen für Elektronenstrahlen von 60 keV Geschwindigkeit  $d_e = 16 \text{ \AA}$  bzw.  $d_m = 8 \text{ \AA}$  (vgl. Tabelle), bei Objektivbrennweiten  $f_e = 5,6 \text{ mm}$  bzw.  $f_m = 2,6 \text{ mm}$ .

Da die *Öffnungsfehlerkonstante* in erster Näherung proportional der Brennweite des Objektivs ist, kann das Auflösungsvermögen nach (4) durch *Verringerung der Brennweite* prinzipiell beliebig groß gemacht werden. Um zum Beispiel Atome mit einem Durchmesser von  $2 \text{ \AA}$  abzubilden, wäre demnach eine Verringerung der Brennweite des magnetischen Objektivs um den Faktor  $1/256$  erforderlich. Die Möglichkeit, die beabsichtigte Verkürzung der Brennweite durch *Verringerung der geometrischen Linsendimensionen* zu erreichen, muß als aussichtslos ausgeschieden werden, da die gleichzeitig notwendige Erhöhung der magnetischen und elektrischen Feldstärke um den gleichen Betrag wegen der Sättigung des Eisens in der magnetischen Linse und wegen der Überschlagsgefahr in der elektrostatischen Linse nicht möglich erscheint. Auch würde die prozentuale Bearbeitungsgenauigkeit der Linsen entsprechend abnehmen, so daß sich andere Linsenfehler, wie Astigmatismus usw., auflösungsbegrenzend in den Vordergrund schieben.

Die andere Möglichkeit zur Auflösungssteigerung besteht nach (4) in der *Verkürzung der Wellenlänge*.

Nach der Beziehung von DE BROGLIE,

$$\lambda = \frac{h}{v \cdot m} \approx \frac{h}{\sqrt{2 m e U}} \quad (5)$$

könnten kürzere Wellenlängen durch *höhere Elektronenvoltgeschwindigkeiten*  $U$  hergestellt werden. Jedoch ist mit der Erhöhung der Voltgeschwindigkeit eine Vergrößerung der Öffnungsfehlerkonstanten verbunden, da z.B. bei elektrostatischen Linsen der Abstand der Elektroden und damit die Minimalbrennweite wegen der Überschlagsgefahr proportional der Elektronenvoltgeschwindigkeit ist. Damit wird aber auch die Öffnungsfehlerkonstante proportional der Elektronenvoltgeschwindigkeit, so daß für elektrostatische Linsen

$$d \sim U^{-1/4} \quad (6)$$

gilt. Für magnetische Linsen gelten ähnliche Zusammenhänge. Auch eine Spannungserhöhung bringt also bei den heute üblichen Linsen keinen wesentlichen Gewinn an Auflösungsvermögen, denn um nur eine Auflösungserhöhung des Faktors 2 zu erreichen, müßte die Spannung um den Faktor 256 erhöht werden.

<sup>1</sup> Institut de Recherches Scientifiques, Tettanng (Württemberg).

<sup>2</sup> H. BÖRSCH, Jb. AEG.-Forschung 7, 27 (1940); Naturwiss. 30, 711 (1942). — CL. MAGNAN in: L. DE BROGLIE, «L'optique électronique», Paris 1946.

Nach der Beziehung von DE BROGLIE (5) bleibt jetzt noch die *Erhöhung der Masse*<sup>1</sup> der Ladungsträger übrig, also die Verwendung von Ionen anstelle von Elektronen, um eine Verkürzung der Wellenlänge zu erzielen. Als Funktion der Masse und der Voltgeschwindigkeit  $U$  lautet die Beziehung (3) über das optimale Auflösungsvermögen

$$d \approx C_0^{1/4} h^{3/4} (2 e m U)^{-3/4}. \quad (7)$$

Für die Abbildung mit Ionenstrahlen kommen *nur elektrostatische* Linsen in Betracht, da deren Brennweite und Öffnungsfehlerkonstante bei gleicher Voltgeschwindigkeit unabhängig von der Masse der Ladungsträger ist. Die Brennweite magnetischer Linsen ist dagegen proportional der Wurzel aus der Masse der Ladungsträger.

In der Tabelle ist das optimale Auflösungsvermögen für Elektronen und Ionen verschiedener Masse bei einer Voltgeschwindigkeit von 60 kV sowie die experimentell erreichten Auflösungen  $d_{exp}$  zusammengestellt. Es wurde eine elektrostatische Linse ( $f = 5,6$  mm) zugrunde gelegt, deren Öffnungsfehlerkonstante ( $C_0 = 5,5$  cm) nach dem Verfahren des Verfassers aus der Verzeichnung eines schattenmikroskopischen Bildes<sup>2</sup>

Elektrische Linse				Magnetische Linse
$e^-$	$H^+$	$Li^+$	$Cs^+$	$e^-$
$\lambda$ 490	12,0	4,5	1,0	$490 \cdot 10^{-12}$ cm
$\delta_{opt}$ 3,1	1,2	0,95	0,66	$6,2 \cdot 10^{-3}$
$\Delta U$ 1,6	0,25	0,15	0,07	3,8 Volt
$d$ 16	0,96	0,47	0,16	7,9 Å
$d_{exp}$ 28*		500 <sup>3</sup>		12** Å

\* Das Auflösungsvermögen von 28 Å wurde im November 1944 mit dem elektrostatischen Elektronenmikroskop<sup>4</sup> aus dem Abstand getrennter Objektpartikel bestimmt.

\*\* Das Auflösungsvermögen von 12 Å wurde im November 1944 durch den Verfasser mit dem magnetischen Siemens-Übermikroskop aus dem Abstand getrennter Objektpartikel bestimmt.

bestimmt worden war. In der Tabelle sind ferner die Daten einer magnetischen Linse aufgenommen, deren Öffnungsfehler  $C_0 = 3,3$  mm von DOSSE<sup>5</sup> nach dem gleichen Verfahren bestimmt worden war. Die angenäherte Übereinstimmung zwischen dem theoretischen und dem experimentell erreichten elektronenoptischen Auflösungsvermögen kann als Beweis für die Richtigkeit der angestellten Überlegungen gelten.

Außerdem ist in der Tabelle die *optimale Objektivapertur* angegeben, die zur Erzielung der optimalen Auflösung notwendig ist. Im Elektronenmikroskop finden nun im Experiment wesentlich größere als die optimalen Objektivaperturen Anwendung, um Störungen

durch Aufladungen usw. an den Rändern der Aperturblende möglichst zu vermeiden. Damit aber die tatsächlich ausgeleuchtete Objektivapertur von der Größenordnung der optimalen wird, darf die Kondensorapertur nicht größer als die optimale Objektivapertur werden. Aber auch bei reeller optimaler Objektivapertur ist es sinnlos, eine höhere Kondensorapertur zu wählen als die optimale Objektivapertur, da sie nicht zu einer höheren Bildhelligkeit beiträgt, sondern die Kontraste herabsetzt und das Objekt nur unnötig belastet. Die gleichen Gründe sprechen auch im Ionenmikroskop für eine Herabsetzung der Kondensorapertur unter das Maß der in Tabelle angegebenen optimalen Objektivapertur.

Damit die angegebene optimale Auflösung nicht durch den *chromatischen Fehler* beeinträchtigt wird, darf der Durchmesser des *chromatischen Fehlerscheibchens*

$$d_c = 2 C_c \frac{\Delta U}{U} \vartheta \quad (8)$$

höchstens so groß wie die optimale Auflösung werden. ( $C_c$  = chromatische Fehlerkonstante,  $U$  = Voltgeschwindigkeit der Ladungsträger,  $\Delta U$  = mittlere Geschwindigkeitsstreuung in Volt.) Aus dieser Bedingung und den vorangegangenen Beziehungen (3, 4) ergibt sich der *Maximalwert der zulässigen Geschwindigkeitsstreuung* angenähert zu

$$\Delta U \approx C_c^{-1} C_0^{1/2} h^{1/2} (2 e m)^{-1/4} U^{3/4}. \quad (9)$$

Die chromatische Fehlerkonstante ( $C_c = 2$  cm) der elektrostatischen Linse wurde vom Verfasser<sup>1</sup>, die der magnetischen Linse ( $C_c = 0,2$  cm) von DOSSE<sup>2</sup> nach der erwähnten schattenmikroskopischen Methode bestimmt. Unter Zugrundelegung dieser Werte und einer Elektronenenergie von 60 eV sind in der Tabelle Angaben über die Geschwindigkeitsstreuung  $\Delta U$  gemacht, die das Objektiv nach (9) ohne wesentliche Einbuße an optimalem Auflösungsvermögen verarbeiten kann.

Die *Geschwindigkeitsstreuung* selbst kann schon von der Ionenquelle stammen oder durch die Wechselwirkung mit dem Objekt verursacht werden. Als *conditio sine qua non* muß also die Ionenquelle eine hinreichend monochromatische Strahlung liefern, die zumindest im Prinzip immer durch geeignete Spektrometeranordnungen hergestellt werden kann. Über die Geschwindigkeitsstreuung von Ionen in dünnsten Objekten liegen dagegen noch zu wenig Unterlagen vor, um auch nur qualitative Aussagen machen zu können. Es ist jedoch zu befürchten, daß wegen der besseren Impulsübertragung durch die größere Masse der Ionen die unelastischen Streuakte zahlreicher und auch intensiver als die von Elektronen sind. Es ist also nicht ausgeschlossen, daß das — durch die höhere Masse der

<sup>1</sup> H. BÖRSCH, l. c.

<sup>2</sup> Jb. AEG.-Forschung 7, 34 (1940); Z. techn. Physik 20, 346 (1939).

<sup>3</sup> H. BÖRSCH, Naturwiss. 30, 711 (1942).

<sup>4</sup> H. BÖRSCH, Phys. Z. 43, 515 (1942).

<sup>5</sup> I. DOSSE, Z. Phys. 117, 722 (1941); 118, 375 (1942).

<sup>1</sup> L. c.

<sup>2</sup> I. DOSSE, Z. Phys. 117, 722 (1941); 118, 375 (1942).

Ionen bedingte — höhere optimale Auflösungsvermögen durch die — aus dem gleichen Grunde — erhöhte Impulsübertragung wieder herabgesetzt wird. Über das Verhältnis beider Effekte kann nur das Experiment Aufschluß geben.

Von den in der Tabelle aufgeführten Ionen ist das  $H^+$ -Ion bezüglich seines Feldes dem Elektron am ähnlichsten, während das  $Li^+$ - und das  $Cs^+$ -Ion noch zusätzlich Elektronen mit sich führen. Die Ausdehnung ihrer Elektronenwolken dürfte von der Größenordnung der Ionendurchmesser in Kristallen sein. Zum Beispiel beträgt der Ionendurchmesser (nach PAULING) des  $Li^+$ -Ions  $1,2 \text{ \AA}$ , der des  $Cs^+$ -Ions  $3,38 \text{ \AA}$ . Ob und unter welchen Bedingungen derartige Ionen durch feste Materie hindurchgehen, ist noch ganz ungewiß. Jedoch macht es, abgesehen von der geringeren Impulsübertragung, schon dieser Umstand wahrscheinlich, daß das nackte  $H^+$ -Ion am geeignetsten zur Erzielung hoher Auflösung ist.

Naturgemäß werden infolge der besseren Impulsübertragungen durch Ionen auch Veränderungen des Objekts durch Herausschlagen von Atomen, Anlagerungen aus dem Ionenstrahl, Umlagerungen usw. herbeigeführt, die ebenfalls einer Auflösungsbegrenzung gleichzusetzen sind.

Da aber über alle diese auflösungsbegrenzenden Faktoren noch zu wenig bekannt ist, besteht so lange Hoffnung, das Auflösungsvermögen des Elektronenmikroskops durch den Übergang zum Ionenmikroskop zu steigern, als nicht das Gegenteil bewiesen wird.

### Versuche

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden Versuche mit dem schon früher beschriebenen elektrostatischen Übermikroskop<sup>1</sup> durchgeführt. Es enthält zwei elektrostatische Linsen, die eine Maximalvergrößerung von 1:6000 zulassen. Durch Herabsetzung der Spannung an der Mittelelektrode des Projektivs (über ein Hochspannungspotentiometer) konnten auch geringere Vergrößerungen eingestellt werden. Das Objektiv besaß eine reelle Apertur von  $1,8 \cdot 10^{-3}$ , so daß das Öffnungsfehlerscheibchen nach (1) einen Durchmesser von  $6,4 \text{ \AA}$  erhält.

Die üblicherweise benutzte Elektronenquelle konnte gegen eine Ionenquelle ausgetauscht werden. Infolgedessen konnten nacheinander elektronen- und ionenmikroskopische Aufnahmen hergestellt werden. Obwohl nach den vorausgegangenen Betrachtungen Protonen wahrscheinlich günstigere Eigenschaften besitzen, wurden die Untersuchungen wegen des geringeren experimentellen Aufwandes vorerst mit Alkaliionen durchgeführt.

Die Anforderungen, die an eine Ionenquelle gestellt werden müssen, sind folgende:

Geringe Geschwindigkeitsstreuung,  
geringe Beleuchtungsapertur,  
hohe Flächenhelligkeit,  
große Ergiebigkeit,  
leichte Regenerierbarkeit,  
geringe Gasabgabe,  
Unempfindlichkeit gegen schlechtes Vakuum.

Diese Forderungen erfüllt in fast idealer Weise die in Abb. 1 dargestellte Alkaliionenquelle, deren Prinzip von KOCH<sup>1</sup> angegeben wurde. Sie besteht aus einem indirekt geheizten Molybdänrohr, dessen vorderes Ende mit ausgeglühtem Wolframpulver ausgefüllt ist. Ähn-

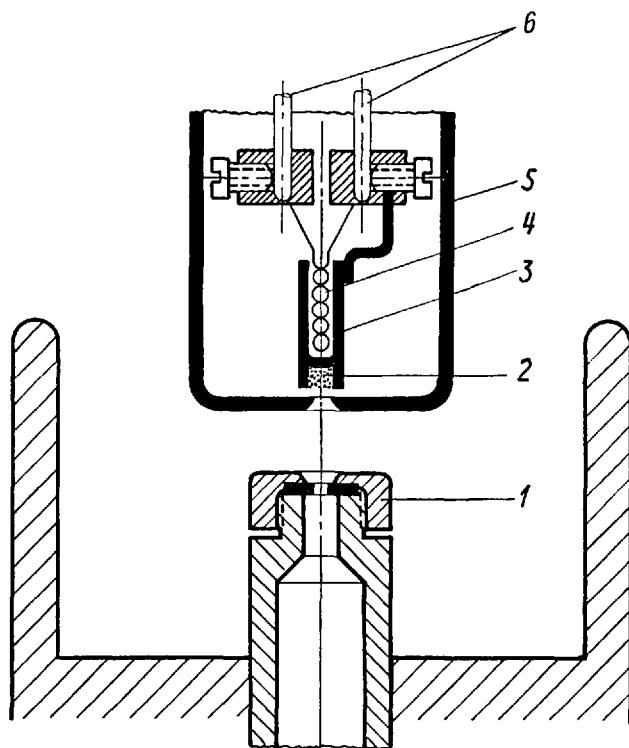


Abb. 1. Alkaliionenquelle. 1 Kathode mit Blenden, 2 eingepreßtes Wolframpulver, 3 Molybdänrohr, 4 keramisch isolierter Heizwendel, 5 Wehnelt-Zylinder, 6 Zuführung des Heizstromes.

lich wie die normalen Haarnadelkathoden des Elektronenmikroskops ist die Ionenquelle mit einem positiv geladenen Wehnelt-Zylinder umgeben. Die Aktivierung der Ionenquelle erfolgt durch Einträufeln einer wäßrigen Lösung des Alkalisalzes in das Wolframpulver und anschließender Aufheizung in einem besonderen Pumpstand im Vakuum, so daß sich das Salz zersetzt und die überschüssige Substanz abdampft. Dann kann die Ionenquelle aus dem Vakuum entfernt und im Mikroskop benutzt werden. Lagerung in Luft ist unschädlich. Eine Aktivierung reichte für etwa 2–3 Aufnahmen aus. Es wurden Aufnahmen mit  $Li^+$ -,  $Na^+$ -,  $K^+$ - und  $Cs^+$ -Ionen hergestellt.

<sup>1</sup> H. BÖRSCH, Phys. Z. 43, 515 (1942).

<sup>1</sup> J. KOCH, Z. Phys. 100, 669 (1936). – J. KOCH und W. WALCHER, Z. Phys. 97, 131 (1936).

Entsprechend einer Betriebstemperatur von etwa  $1000^{\circ}\text{C}$ , die mit einem Glühfadenpyrometer überwacht werden konnte, erzeugt diese Ionenquelle nur Ionen mit einer *Geschwindigkeitsstreuung* von etwa 0,2 V. Bei dem gewählten Abstand vom Präparat betrug die *Beleuchtungsapertur* etwa  $3 \cdot 10^{-4}$ .

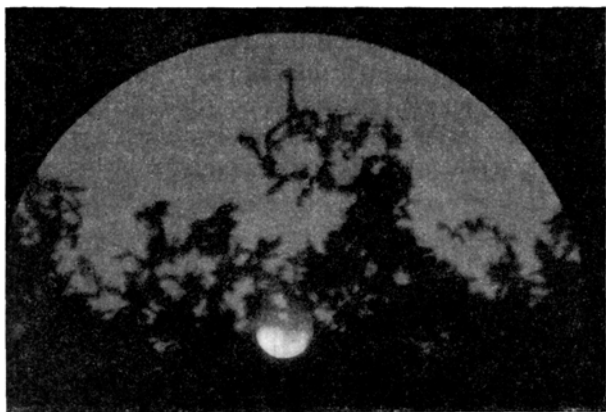


Abb. 2.  $\text{Li}^+$ -Ionenbild von freitragendem  $\text{MgO}$ -Rauch mit neutralem Fleck. Zweistufige ionenoptische Abbildung.  
 $V_{\text{Ion}} = 1700:1$ ,  $V_{\text{gesamt}} = 6200:1$ .

Unter diesen Umständen war die *Leuchtdichte* so gering, daß bei  $\text{Li}^+$ -Ionen und 6000facher Vergrößerung Belichtungszeiten von 5–10 Minuten erforderlich waren, um auch nur unterbelichtete Aufnahmen (vgl. Abb. 5) auf den für Ionenaufnahmen notwendigen Schumann-Platten herzustellen. Die Belichtungszeit ist deshalb von Bedeutung, weil die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Störungen durch Erschütterungen, Überschlüsse usw. mit der Belichtungszeit zunimmt. Die Leuchtschirmhelligkeit des Ionenbildes war bei 6000facher Vergrößerung so gering, daß mit dunkeladaptiertem Auge nur ein schwacher Lichtschimmer wahrgenommen und deshalb nur Blindaufnahmen hergestellt werden konnten. Die eigentliche Objekteinstellung wurde daher mit Elektronenstrahlen oder mit dem vom Objektiv entworfenen ersten Leuchtschirmbild oder bei etwa 1000facher Vergrößerung auf dem Endbildleuchtschirm vorgenommen.

Die ersten ionenoptischen Abbildungen (vgl. Abb. 2 und 3a) wiesen einen auffallenden *hellen Fleck* im Zentrum der Aufnahme auf, der gleichzeitig mit dem ionenoptischen Bild auftauchte und verschwand. Der Zentralfleck der Abb. 3a wurde in Abb. 3b lichtoptisch auf den gleichen Durchmesser wie das Ionenbild der Abb. 3a vergrößert und um  $180^{\circ}$  gedreht wiedergegeben. Obwohl die Konturen der Abb. 3b undeutlicher als die der Abb. 3a sind, ist ohne weiteres erkennbar, daß beide Abbildungen gleichen Bildinhalt besitzen. Die Erklärung dieses Effektes besteht darin, daß der Zentralfleck durch *neutrale* Teilchen gebildet wird, die sich auf dem Wege zwischen dem Objektiv und dem Projektiv durch Neutralisation der Ionen gebildet haben und im Gegensatz zu den Ionen unbeeinflusst durch das

elektrostatische Feld des Projektivs hindurchgegangen sind. Der Durchmesser des Zentralflecks und die Drehung um  $180^{\circ}$  finden hierdurch ihre unmittelbare Erklärung. In Übereinstimmung hiermit hat die in Abb. 4 wiedergegebene Ionenabbildung gleichen Durchmesser wie der Neutralfleck. Diese Ionenabbildung wurde nach Erdung der Mittelelektrode des Projektivs gewonnen und lichtoptisch im gleichen Verhältnis wie der Neutralfleck der Abb. 3b vergrößert. Abb. 4 (und daher auch Abb. 3b) stellt also eine einstufige ionenmikroskopische (bzw. neutrale) Abbildung allein mit dem Objektiv dar, deren Durchmesser durch die Bildfeldblende des Projektivs bestimmt wird.

Die *Unschärfe des Neutralbildes* wird durch die Unschärfe des ionenoptischen Bildes außerhalb der Bildebene des Objektivs und durch die Ablenkung der neutralisierten Teilchen bei der Neutralisation verursacht. Die aus der Abbildung 3b zu entnehmende Geringfügigkeit des Streuwinkels bei der Neutralisation steht in Übereinstimmung mit direkten Streuversuchen von Protonen.

Die Neutralisation der Ionen findet durch *Zusammenstöße mit dem Restgas* statt. Die Abhängigkeit der Intensität des Neutralflecks vom Dampfdruck konnte unmittelbar auf dem Leuchtschirm beobachtet werden. Zur Erzielung hoher Auflösung ist nach den Beobachtungen mit  $\text{Li}^+$ -Ionen demnach ein Dampfdruck von höchstens  $5 \cdot 10^{-5}$  mm Hg zulässig, der ohne Schwierigkeit mit der Öldiffusionspumpe *P* und der einstufigen rotierenden Ölvorpumpe von LEYBOLD aufrechterhalten werden konnte.

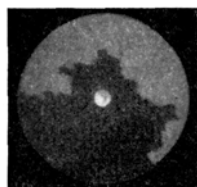


Abb. 3a.  $\text{Li}^+$ -Ionenbild mit neutralem Fleck. Zweistufige ionenoptische Abbildung.  
 $V_{\text{Ion}} = 1700:1$ .

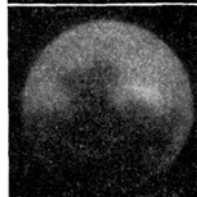


Abb. 3b. Neutraler Fleck der Abb. 3a lichtoptisch auf den Durchmesser des Ionenbildes nachvergrößert und um  $180^{\circ}$  gedreht.



Abb. 4.  $\text{Li}^+$ -Ionenbild eines anderen Objekts. Einstufige ionenoptische Vergrößerung durch Ausschaltung des Projektivs. Gleiche lichtoptische Vergrößerung wie in Abb. 3b.

Um die Ausbildung des störenden Neutralflecks zu vermeiden, wurde im Projektiv eine *Aperturblende* von 0,05 mm Durchmesser angebracht. Diese Blende hatte andererseits den Vorteil, daß sie die Schwärzung der photographischen Schicht durch gelegentliche Entladungen und Überschlüsse im Projektiv verhinderte.

Unter diesen Voraussetzungen wurde die in Abb. 5 wiedergegebene Aufnahme von Zinkoxyd mit  $\text{Li}^+$ -Ionen bei einer Belichtungszeit von 7 Minuten erhalten.

Hier und in entsprechenden anderen Aufnahmen konnten erstmalig *ionenübermikroskopische* Auflösungen von  $500 \text{ \AA}$  erreicht werden; allerdings war das *elektronenmikroskopische* Auflösungsvermögen der gleichen Apparatur noch um eine Größenordnung besser. Für diese Diskrepanz kann u.a. die Veränderung des Objekts durch die Ionenstrahlung verantwortlich sein.

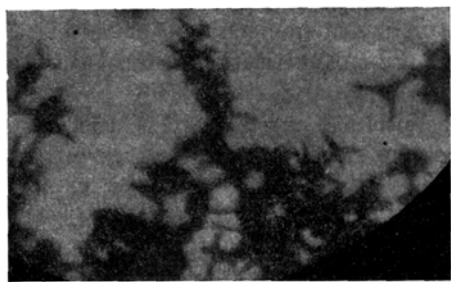


Abb. 5.  $\text{Li}^+$ -Ionenbild von freitragendem ZnO-Rauch.  $V_{\text{Ion}} = 6000:1$ .  
 $V_{\text{gesamt}} = 14500:1$ .

Um einen Eindruck von der Größenordnung dieses Faktors zu gewinnen, wurde das Objekt aus freitragenden Zinkoxydkristallen vor und nach der Bestrahlung mit Lithiumionen (3fache Dosis der Abb. 5) elektronenoptisch abgebildet (nach Auswechslung der jeweiligen Strahlungsquellen und Umpolung der Hochspannung). Der Vergleich der Aufnahmen zeigte, daß einige Kristallnadeln durch die Bestrahlung mit Ionen bis zu  $60\text{--}70 \text{ \AA}$  verbreitert worden waren. Die Diskrepanz zwischen dem ionen- und elektronenoptischen Auflösungsvermögen der Apparatur ist also nicht durch die Veränderung des Objekts bedingt, sondern durch andere, schon angedeutete Faktoren, die sich prinzipiell beseitigen ließen. Andererseits bedeutet die Feststellung einer Objektänderung durch die Ionenstrahlung, daß die Darstellung der atomaren Struktur mit Lithiumionen (und höchstwahrscheinlich auch mit Protonen) trotz ihrer kurzen Wellenlänge prinzipiell ausgeschlossen ist, zumal hierzu eine etwa 100 000fache ionenoptische Vergrößerung und daher eine mindestens 300fach stärkere Bestrahlungsdosis notwendig wird. Auch die geplante Erhöhung der Ionenvoltgeschwin-

digkeit auf  $300\,000 \text{ V}^1$  dürfte hierauf ohne wesentlichen Einfluß sein.

Das Resultat dieser Untersuchung besteht also darin, daß es zwar gelingt, mit dem Ionenmikroskop übermikroskopische Auflösungen zu erreichen, daß es aber nicht möglich ist, Atome mittels Ionenstrahlen abzubilden, da das Objekt durch die Strahlung selbst verändert wird. Durch diese Untersuchung ist also mit relativ geringem Aufwand ein Weg zur Lösung dieser schwierigen Aufgabe als prinzipiell nicht gangbar erkannt. Andere Möglichkeiten bestehen in der Entwicklung *neuartiger* Abbildungsverfahren mit Elektronenstrahlen, da diese, wenigstens nach unseren heutigen Vorstellungen, nicht zu solchen Veränderungen des Objekts führen müssen, die eine Abbildung des atomaren Aufbaus verhindern.

#### Résumé

Les méthodes employées à l'heure actuelle en microscopie électronique ne sont pas encore en mesure de rendre perceptibles les atomes. La raison de cet échec réside principalement dans la présence inévitable d'aberrations dans les lentilles. On a été amené dans la suite à chercher d'autres procédés plus appropriés. C'est ainsi qu'on a envisagé la mise au point d'une méthode de microscopie ionique. En effet, on peut déduire de la relation établie par LOUIS DE BROGLIE que les rayons ioniques, sous des tensions égales à celles couramment utilisées dans le cas des électrons, ont une longueur d'onde suffisamment faible pour pouvoir théoriquement conduire, même avec les lentilles électrostatiques actuelles, à la résolution des distances interatomiques dans la matière solide. Cependant leur masse et par conséquent leur inertie qui sont nettement plus importantes que celles des électrons, entraînent des modifications profondes dans l'objet irradié: celui-ci peut réagir plus ou moins intensivement avec les ions et sous l'influence de leur bombardement peut même subir des arrachements d'atomes. Les essais que l'auteur a effectués dans le but de préciser les conditions de la méthode ionique montrent que les résolutions pratiquement atteintes, sont de l'ordre hypermicroscopique ( $500 \text{ \AA}$ ). Ainsi les modifications subies par l'objet, au cours de son irradiation, bien que faibles en regard de ces résolutions, excluent en principe la possibilité d'obtenir des images d'objets à l'échelle atomique avec des rayons ioniques. En revanche, on peut espérer que les électrons, malgré leurs effets souvent néfastes, conviendront tout de même au but cherché, mais il sera nécessaire pour cela de trouver de nouveaux procédés techniques. D'où la nécessité de poursuivre plus avant le développement des méthodes de microscopie électronique.

<sup>1</sup> CL. MAGNAN in: L. DE BROGLIE, « L'optique électronique », Paris 1946.