

(Mitteilung aus dem Laboratorium für Elektronenoptik der
Siemens & Halske A.-G.)

Der Einfluß der Strahlspannung auf das übermikroskopische Bild.

Von B. v. Borries und E. Ruska.

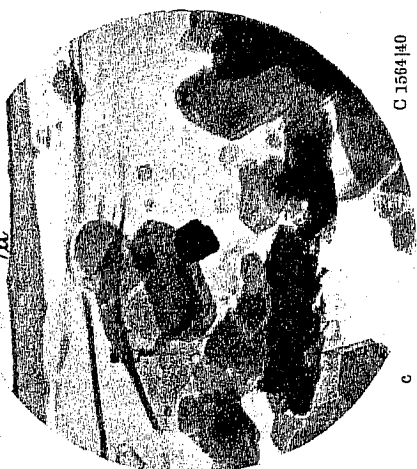
Mit 5 Abbildungen. (Eingegangen am 29. Juni 1940.)

An Hellfeldbildern identischer Objekte bei verschiedener Strahlspannung wird gezeigt, daß mit steigender Strahlspannung die Objekte durchsichtiger werden und sich auch durch dickere Objekte hindurch feinere Einzelheiten erkennen lassen. Bei Dunkelfeldbildern sind diejenigen Massendicken, die zur maximalen Aufhellung führen, bei höheren Strahlspannungen größer als bei niedrigen.

Seit Lenard¹⁾ ist es qualitativ und quantitativ bekannt, daß die Elektronen um so dickere Materieschichten zu durchdringen vermögen, je schneller sie sind, und daß ihre Richtungsänderung in einer gegebenen Materieschicht mit steigender Strahlspannung abnimmt. Kirchner²⁾ hat später gezeigt, daß auch derjenige Anteil eines Elektronenstrahles, der die durchstrahlte Schicht in nahezu unveränderter Richtung verläßt, mit der Geschwindigkeit der Elektronen zunimmt. Da im Übermikroskop und den anderen Durchstrahlungs-Elektronenmikroskopen die Abbildung von diesen unbeeinflußt hindurchtretenden Elektronen bewirkt wird³⁾, kann man erwarten, daß mit steigender Strahlspannung dickere Objektschichten mit gutem Auflösungsvermögen untersucht werden können. Andererseits sollten geringe Massenunterschiede bei insgesamt dünner Schicht besser bei kleinen Elektronengeschwindigkeiten nachweisbar sein⁴⁾. Es wird daher an Aufnahmen identischer Objekte bei verschiedener Strahlspannung deren Einfluß im einzelnen untersucht.

Fig. 1⁵⁾ zeigt ein Präparat von Kaolinkristallen, die auf einer teils gerissenen, teils gefalteten Kollodiumfolie liegen, im Hellfeld und im Dunkel-

¹⁾ P. Lenard, Wied. Ann. 56, 255, 1895. — ²⁾ F. Kirchner, Ann. d. Phys. 13, 38, 1932. — ³⁾ B. v. Borries u. E. Ruska, ZS. f. techn. Phys. 19, 402, 1938. — ⁴⁾ L. Marton, Physica 3, 959, 1936. — ⁵⁾ Bei den Kopien der Bilder 1, 3, 4 und 5 wurde darauf geachtet, daß sie möglichst gut die Schwärzungsverteilung der Platten wiedergeben.



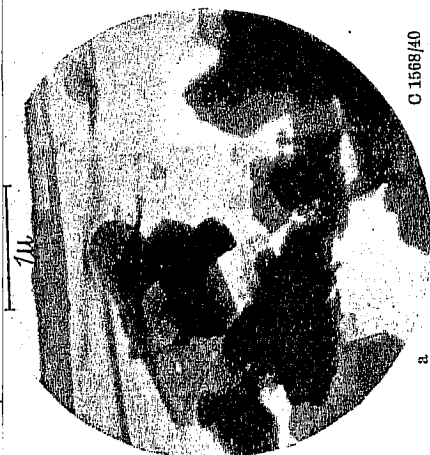
C 1564/40

c



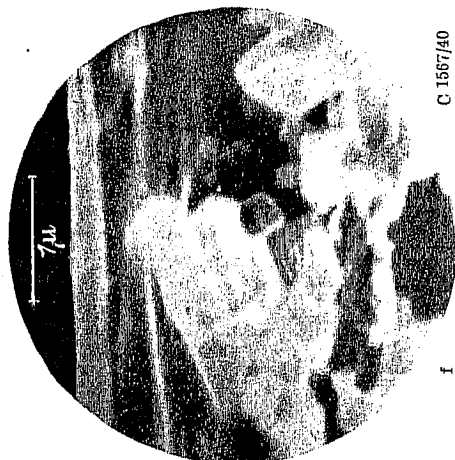
C 1561/40

b



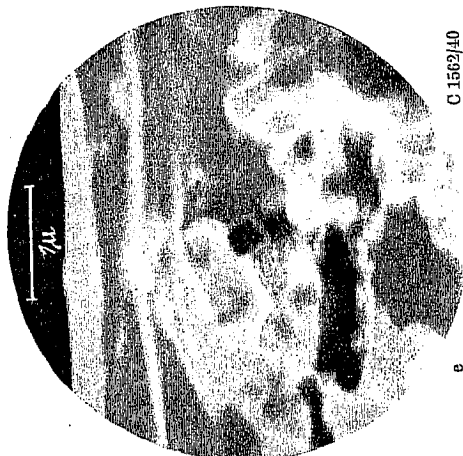
C 1568/40

a



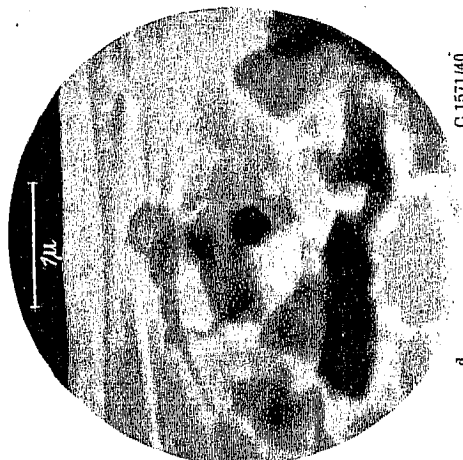
C 1567/40

f

16 000 : 1
90 kV

C 1562/40

e

15 000 : 1
68 kV

C 1571/40

d

16 000 : 1
38 kV

Fig. 1. Schnaittebacher Kaolin.

feld jeweils bei 38, 63 und 90 kV Strahlspannung aufgenommen. Bei den Hellfeldbildern drängt sich als erster Eindruck auf, daß die Gegenstände mit steigender Strahlspannung „durchsichtiger“ werden. Sie zeigen immer deutlicher Einzelheiten ihres inneren Aufbaues. Sehr auffällig ist weiter die Verbesserung der Bildqualität mit steigender Spannung. Als Erklärung dafür sei nur wiederholt¹⁾: kleinere Wellenlänge, größere Energie der Strahlung auf dem Leuchtschirm, größerer Richtstrahlwert des bestrahlenden Bündels; aus allen drei Gründen können Bilder ausreichender

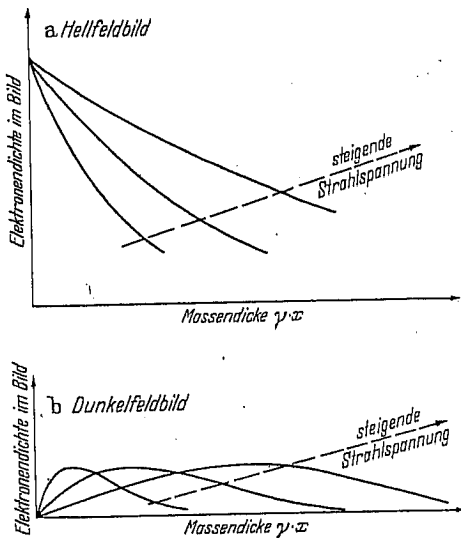


Fig. 2. Elektronendichte im übermikroskopischen Bild, abhängig von durchstrahlter Massendicke und Strahlspannung. (Qualitative Darstellung).

Helligkeit mit kleineren Kondensoraperturen und damit kleineren Fehlern erzeugt werden. — Bei dem hier gewählten Objekt tritt dagegen nicht besonders deutlich hervor, daß kleinere Massendifferenzen bei kleiner Anodenspannung größere Kontraste ergeben. Bei den Dunkelfeldbildern, deren Auflösungsvermögen infolge der, verglichen mit der Kondensorapertur von $\alpha_K \approx 0,001$, großen verwendeten Objektivblendenapertur $\alpha_{OB} \approx 0,01$ beträchtlich schlechter ist als das der zugehörigen Hellfeldbilder, beobachten wir deutlich, daß für eine gegebene Spannung mit steigender Massendicke der Objektteile die Helligkeit der entsprechenden Bildteile zunächst ansteigt, um nach Erreichung eines Höchstwertes bei

¹⁾ B. v. Borries u. E. Ruska ZS. f. techn. Phys. 20, 232, 1939.

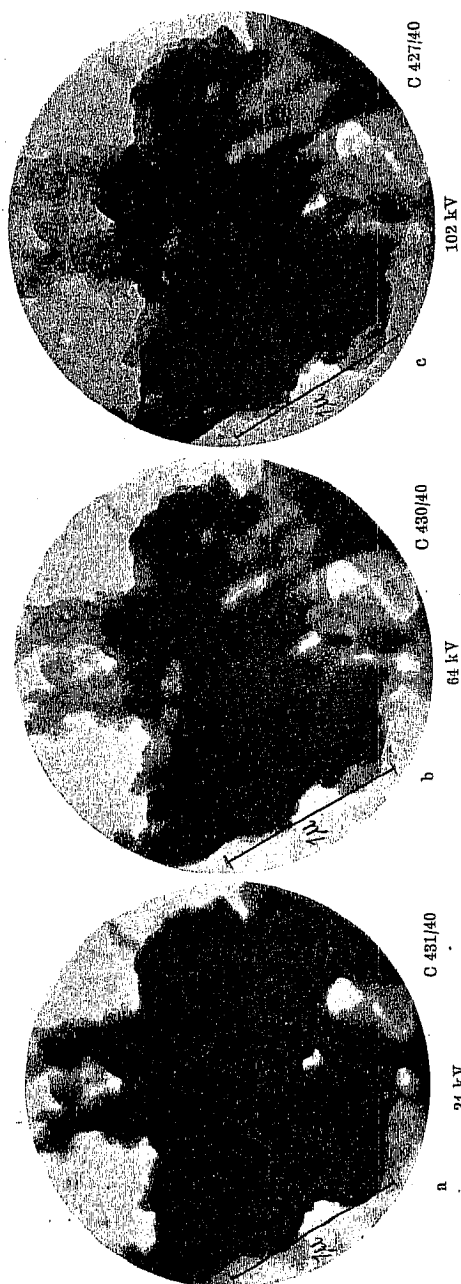


Fig. 3. Chloroplastentrümmer der Tabakpflanze.
Elektronenoptisch: 28 000 : 1.
Abbildungsmaßstab: 25 000 : 1.

einer bestimmten Massendicke der Objektteile wieder auf Null abzufallen¹⁾. Die zum Höchstwert der Helligkeit gehörige Massendicke wächst erwartungsgemäß mit steigender Strahlspannung. Die unbeschickte Kollodiumfolie ist so dünn, daß ihre Dicke selbst für 38 kV unterhalb des Bestwertes liegt und daher nicht die volle Aufhellung liefert; bei den höheren Spannungen ergibt sie entsprechend noch geringere Helligkeiten. Der gefaltete Folienrand liegt etwa bei 63 kV im Maximum der Helligkeit, während dickere Teile des Objekts von anfänglicher Dunkelheit erst bei 90 kV aufgehellt erscheinen. Die dicksten Objektteile endlich beginnen erst bei der höchsten verwendeten Spannung eine merkliche Aufhellung zu zeigen. Es scheint, als wenn mit der Dunkelfeldaufnahme der untersuchbare Dickenbereich größer ist als

¹⁾ B. v. Borries u. E. Ruska, ZS. f. techn. Phys. 19, 402, 1938.

im Hellfeld, denn selbst bei 90 kV ist das dicke, in der Bildmitte gelegene Teilchen beim Hellfeld noch völlig dunkel, während wir im Dunkelfeldbild bei der gleichen Spannung schon gerade einige Einzelheiten sehen können. Es bedarf allerdings noch der Klärung, ob die durch energische Beschränkung der Objektivblendenapertur durch v. Ardenne¹⁾ erreichte

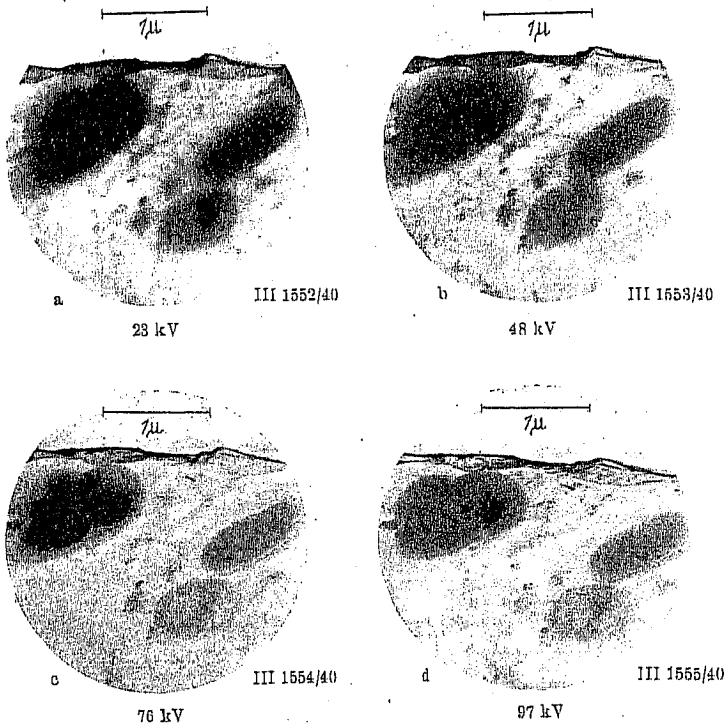


Fig. 4. Prodigiosubakterien.

Elektronenoptisch: 21 000 : 1.

Abbildungsmaßstab: 14 000 : 1.

Verbesserung des Auflösungsvermögens der Dunkelfeldaufnahme für so große Massendicken ungestört durch den chromatischen und Streuungsfehler bleibt. Bemerkenswert ist in den Dunkelfeldbildern ein links unterhalb des zentralen dicken Teiles liegender Kristall, der eine streifige Zeichnung aufweist. In den zugehörigen Hellfeldbildern erscheint er relativ dünn. Die Streifen dürften von Elektroneninterferenzen am Raumgitter

¹⁾ M. v. Ardenne, Die Naturwissensch. 28, 113, 1940.

herrühren. Hier besteht kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Massendicke und Elektronendichte im Bild¹⁾ 2).

Der Verlauf der Elektronendichte im Bild (Helligkeit) mit der Massendicke bei verschiedener Strahlspannung ist in Fig. 2 qualitativ aufgezeichnet, wie man ihn etwa aus den Aufnahmen von Bild 1 entnehmen kann. Es kann noch nicht sicher entschieden werden, ob die Kurven 2 a (Hellfeld) zur Abszisse hin oder von ihr fort gekrümmt sind. Die absolute Höhe dieser Kurven ist dadurch gegeben, daß bei der Massendicke Null die Bildstromdichte gleich der Objektstromdichte geteilt durch das Quadrat der Vergrößerung ist. Bei den Kurven 2 b (Dunkelfeld) ist die absolute Höhe des Maximums außer durch Objektstromdichte und Vergrößerung noch durch die Objektivblendenapertur, die Schiefheit des Strahlenganges und die besonderen Objekteigenschaften bestimmt.

Fig. 3 zeigt ein weiteres Objekt, untersucht mit drei sehr verschiedenen Strahlspannungen. Während bei 24 kV überhaupt noch keine Struktur der Chloroplastentrümmer sichtbar wird, zeigt sich bei 64 kV in den dünneren Randgebieten schon eine Gliederung des Stromas; aber erst bei 102 kV erkennen wir im dichten Kern einzelne Grana.

Die übermikroskopischen Aufnahmen der Fig. 4 lassen die innere Struktur der *Prodigiosus*-Bakterien erst bei einer Strahlspannung von 76 kV gut erkennen. Noch bei 48 kV scheinen einige der hier untersuchten Keime ganz „undurchsichtig“. Besonders bemerkenswert ist, daß in der links oben dargestellten Bakteriengruppe auch die Bakteriengrenzen erst bei der höheren Strahlspannung festgestellt werden können.

Um näher zu untersuchen, ob und wieweit feinere Einzelheiten auch durch relativ dicke Materie hindurch aufgelöst werden können, wurde ein Kollodiumfilm zunächst mit sehr feinem kolloidem Gold beschickt und anschließend daran mit Colibazillen. Das Ergebnis der Untersuchung dieses Präparates bei 38, 63 und 89 kV ist in Fig. 5 dargestellt. Es ergibt sich, daß bei der niedrigen Spannung die kolloiden Goldteilchen nur durch die dünnsten Keime und durch die manche der Bakterien umhüllenden Membranen hindurch aufgelöst werden, während bei der hohen Spannung auch in den dickeren Keimen noch die darunter liegenden Goldteilchen einwandfrei festgestellt werden können. Hierin prägt sich eine erhebliche Überlegenheit der höheren Spannung aus. Dagegen zeigt sich, daß die lichten Membranen erwartungsgemäß bei der niedrigen Spannung besser zur Darstellung kommen, woraus sich die Folgerung ergibt, daß ein Elek-

¹⁾ H. Boersch, Ann. d. Phys. 26, 631, 1936. — ²⁾ B. v. Borries u. E. Ruska, Die Naturwissensch. 28, 366, 1940.



Fig. 5. Kolloides Gold und Kolibakterien. Elektronenoptisch : 10 000 : 1.

tronenmikroskop, das mit variabler und möglichst hoch hinaufgreifender Strahlenspannung arbeitet, besonders umfassend die Objektstrukturen wiedergeben kann. Zudem sinkt mit steigender Strahlenspannung bei den praktisch verwendeten Objektdicken die Erwärmung¹⁾.

Die Aufnahmen der Fig. 5 zeigen außerdem, daß dort, wo die kolloiden Goldteilchen überhaupt noch einen Kontrast gegen die Bakterienleiber aufweisen und damit erkennbar sind, die Schärfe der Abbildung wenig gelitten zu haben scheint. Hieraus würde folgen, daß bei dieser Objektdicke der Fehler der räumlichen Elektronenstreuung im Bakterium und der chromatische Fehler noch keinen sehr merkbaren Einfluß gehabt haben.

¹⁾ B. v. Borries u. E. Ruska, Die Naturwissensch. 27, 285, 1939.