

Elektronenmikroskopie

Bericht
über Arbeiten des AEG Forschungs-Instituts
1930 bis 1942

Herausgegeben
von
Prof. Dr. Carl Ramsauer
Direktor des AEG Forschungs-Instituts

Mit über 300 Abbildungen

Dritte vermehrte und verbesserte Auflage



Springer-Verlag
Berlin Heidelberg GmbH
1943

Elektronenmikroskopie

Bericht
über Arbeiten des AEG Forschungs-Instituts
1930 bis 1942

Herausgegeben
von
Prof. Dr. Carl Ramsauer
Direktor des AEG Forschungs-Instituts

Mit über 300 Abbildungen

Dritte vermehrte und verbesserte Auflage



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1943

5.—6. Tausend

**Alle Rechte, insbesondere das der
Übersetzung in fremde Sprachen,
vorbehalten**

ISBN 978-3-662-32209-3 ISBN 978-3-662-33036-4 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-33036-4

Copyright 1943

by Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag o. H. G. in Berlin 1943

Vorwort zur ersten Auflage.

Ende 1930, viele Jahre bevor sich andere industrielle Stellen des In- und Auslandes in eigener experimenteller Forschungs- und Entwicklungsarbeit der Elektronenmikroskopie zugewandt haben, begannen im AEG Forschungs-Institut die systematischen Untersuchungen mit dem Ziel, „die geometrische Optik für Elektronen durchzubilden“ und „ein Elektronenmikroskop mit sehr starker Vergrößerung zu bauen“. Im Vordergrund des Interesses stand die Erschließung eines neuen, der Lichtmikroskopie unzugänglichen Gebietes, nämlich die Mikroskopie der Elektronenstrahler und die Erforschung der hier zugrundeliegenden Vorgänge. Bei Anwendung sehr starker Vergrößerung konnte man außerdem hoffen, zu Auflösungen zu kommen, die dem Lichtmikroskop nicht mehr zugänglich sind. Heute, nach 10 Jahren, ist die geometrische Elektronenoptik weitgehend ausgebaut. Sie ist das Fundament, auf dem die neuzeitliche Oszillographen- und Fernsehrohr, der Bildwandler, das Elektronenmikroskop und manches andere Gerät gewachsen oder zu hoher Vollendung gebracht worden sind. Auch das „Elektronenmikroskop mit sehr starker Vergrößerung“, das wir bei hoher Auflösung später als „Übermikroskop“ bezeichnet haben, ist inzwischen verwirklicht worden.

Diese kleine Schrift soll über den engen Kreis der Fachleute hinaus der Allgemeinheit einen Einblick in unsere nunmehr zehnjährige Arbeit auf dem Gebiete der Elektronenmikroskopie geben. Bei dieser Aufgabe muß das Schwergewicht der Darstellung in den Bildern als den unmittelbaren Ergebnissen liegen, während die zur Erreichung dieser Ergebnisse erforderliche experimentelle und theoretische Vorarbeit trotz ihrer grundlegenden Wichtigkeit hier zurücktritt. Der Text ist, soweit es sich nicht um Fragen des grundsätzlichen Zusammenhanges und der historischen Entwicklung handelt, auf das Notwendigste beschränkt worden. — Auch für die Fachleute wird die Bildzusammenstellung als solche einen gewissen Wert haben. Die einzelnen Mitarbeiter, denen die Firma die Erfolge bei der Erschließung der Elektronenoptik und bei der Entwicklung und Anwendung des Elektronenmikroskops verdankt, gehen am vollständigsten aus dem Literaturverzeichnis hervor. Im Text sind sie gegenüber den gelegentlich genannten institutsfremden Autoren an allen wichtigeren Stellen durch Hinweis auf das Literaturverzeichnis gekennzeichnet.

Berlin-Reinickendorf, Dezember 1940.
AEG Forschungs-Institut.

C. Ramsauer.

Vorwort zur zweiten Auflage.

Die erste Auflage dieses Selbstberichtes war in wenigen Monaten vergriffen. Die Neuauflage wurde auf den letzten Stand gebracht. Sie entspricht der Erstauflage mit folgenden Änderungen: Die technischen Angaben über die verschieden benutzten Durchstrahlungsmikroskope sind nicht mehr durch die zugehörigen Elektronenaufnahmen getrennt, sondern in einem Abschnitt zusammengefaßt. Das übermikroskopische Bildmaterial, das durch viele neue Bilder erweitert wurde, ist ohne Rücksicht auf das benutzte Instrument nach Sachgebieten neu geordnet. Die Literatur ist bis Ende des Jahres 1941 ergänzt.

In der Zwischenzeit haben unsere Forschungen und Entwicklungen über das Elektronenmikroskop eine besondere Anerkennung gefunden. Die Preußische Akademie der Wissenschaften hat an den Entwicklungsleiter unserer elektronenoptischen Arbeiten Dr.-Ing. habil. Brüche und seine Mitarbeiter Dr. Boersch und Dr. Mahl, welche sich besonders um die Entwicklung des Durchstrahlungs-Übermikroskops verdient gemacht haben, die silberne Leibniz-Medaille verliehen. Neben diesen beiden durch die Verleihung ausgezeichneten Mitarbeitern der letzten Jahre dürfen insbesondere die älteren Mitarbeiter Dr.-Ing. Johansson und Prof. Dr. Scherzer nicht vergessen werden, deren Namen mit der Erschließung der Elektronenoptik und der ersten Entwicklung des Elektronenmikroskops im Forschungs-Institut verbunden bleiben werden.

Berlin-Reinickendorf, November 1941.

C. Ramsauer.

Vorwort zur dritten Auflage.

Während des Druckes der zweiten Auflage gelang uns, was noch in einem Zusatz bei der Korrektur berücksichtigt werden konnte, die Verwirklichung des Emissions-Übermikroskops. In die Neuauflage, die wiederum eine Anzahl neuer Bilder des Durchstrahlungs-Übermikroskops enthält, sind auch einige Aufnahmen des Emissions-Übermikroskops aufgenommen, das heute die Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops um rund eine Zehnerpotenz überschritten hat. Die Literatur ist bis Ende 1942 ergänzt.

Bei dem Neudruck wurde der einleitende Teil ergänzt und straffer geordnet. Dabei wurde — auch entsprechend der Anregung von Referenten — versucht, von dem ursprünglich reinen Rechenschaftsbericht ausgehend, sich einer Darstellung anzunähern, die auch zur ersten Orientierung über die Grundlagen herangezogen werden kann.

Die Neugestaltung des Heftes wurde von Dr. Brüche durchgeführt.

Berlin-Reinickendorf, September 1942.

C. Ramsauer.

Inhaltsverzeichnis.

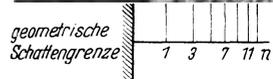
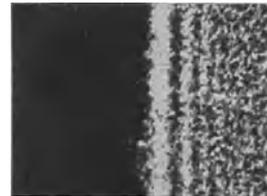
	Seite
I. Geometrische Elektronenoptik	7
Wellenoptik und geometrische Optik des Elektrons. — Elektrische und magnetische Kraftwirkung auf Elektronen. — Elektronenbewegung im elektrischen und magnetischen Feld. — Elektrische und magnetische Bewegungslehre. — Aufgabe und Wesen der Elektronenoptik. — Aus der Entwicklungsgeschichte der Elektronenoptik. — Definitionen der geometrischen Elektronenoptik.	
II. Elemente der geometrischen Elektronenoptik	15
Das elektronenoptische Brechungsgesetz. — Die elektrische Linse. — Die magnetische Linse. — Der Elektronenspiegel. — Das Elektronenprisma. — Die elektrische Einzellinse. — Aus der Entwicklung der elektrischen Einzellinse.	
III. Aus der Entwicklung des Elektronenmikroskops	23
Aufgabestellung 1: Modellversuche über Elektronenbahnen in Feldern. — Aufgabestellung 2: Experimentelle Elektronenoptik. — Aufgabestellung 3: Emissionsmikroskopie. — Aufgabestellung 4: Durchstrahlungs-Übermikroskopie. — Aufgabestellung 5: Emissions-Übermikroskopie. — Aus der Entwicklung des elektrischen Elektronenbildes. — Erste elektronenoptische Oberflächenbilder. — Erste elektronenoptische Durchstrahlungsbilder. — Beispiele guter Elektronenbilder.	
IV. Emissionsmikroskopische Bilder	39
Kathodenforschung: Glühkathode, Oxydkathode, Thoriertes Wolfram, Malterkathode, Fotokathode. — Metallurgie: Entstehen des Strukturbildes, Strukturbild von Nickel, Platin, Wolfram, Eisen; Sammelkristallisation, Eisenumwandlung. — Gleitlinien und Korngrenzen. — Physik: Schmelzvorgänge, Oberflächenschichten, Elektronenauslösung.	
V. Durchstrahlungs-Mikroskopie	77
Zweck des Mikroskops. — Übermikroskopie und Beugung. — Von der Idee des Übermikroskops. — Schatten-Übermikroskop. — Abbildungs-Übermikroskop. — Elektrostatishes Übermikroskop. — Magnetisches Jochlinsen-Übermikroskop. — Lichtbild — Elektronenbild.	
VI. Technik der Durchstrahlungs-Übermikroskopie	91
Vorbereitung eines Objektes, Einschleusen des Objekts, Scharfstellung des Elektronenbildes, Aufnahme des Elektronenbildes. — Präparation: Objektträgerfolie. — Untersuchungstechnik: Dicke Objekte, Vorgetäuschte Strukturen, Verunreinigung, Aufladungserscheinungen, Elektronenschäden. — Methodik: Vergrößerungswahl, Dunkelfeld, Verschiedene Durchstrahlungsenergie. — Sonderverfahren: Oberflächenabdruck. — Stereoaufnahme.	
VII. Übermikroskopische Bilder aus der unbelebten Natur	127
Chemie: Kolloide, Fasern, Rost, Oberflächenfilm, Metallauflösung. — Physik: Aufdampfschicht, Salzkristalloberfläche, Glasoberfläche. — Kristallographie: Aitzfiguren. — Werkstoffkunde: Mineralien, Ruß, Zinkweiß, Kathodenpaste. — Metallographie: Walzstruktur, Tiefätzung, Geätzte Metalle, Ausscheidungen, Gleitlinien. — Bearbeitungsverfahren: Schleifen, Drehen, Polieren.	
VIII. Übermikroskopische Bilder aus der belebten Natur	191
Zoologie: Schmetterlinge, Schneckenschalen. — Botanik: Diatomeen. — Medizin: Protozoen, Leichmanien, Spirochaeten, Bakterien, Pathogene Bakterien, Bakteriophagen, Blutkörperchen, Zellen, Virusarten.	
IX. Veröffentlichungen	223
Buch-Veröffentlichungen: 1934. Geometrische Elektronenoptik. 1937. Beiträge zur Elektronenoptik. 1941. Elektronengeräte. Zehn Jahre Elektronenmikroskopie. 1942. Elektronenmikroskopie. Geometrische Elektronenoptik. — Veröffentlichungen.	

I. Geometrische Elektronenoptik.

Wellenoptik und geometrische Optik des Elektrons.

Um die Jahrhundertwende gilt das Bild des Elektrons als abgeschlossen. Das Elektron ist danach für den Physiker eine Kugel von bestimmter negativer Ladung, bestimmter Ruhmasse und einer Geschwindigkeit, die bis zur Lichtgeschwindigkeit reichen kann. Nach zwei Jahrzehnten, in denen besonders Versuche über die Wechselwirkung zwischen Elektron und Materie durchgeführt wurden, zeigen sich die ersten experimentellen Hinweise, daß das Bild des Elektrons noch nicht vollständig ist. Ramsauer findet 1920 die extreme Durchlässigkeit von Edelgasen gegenüber langsamen Elektronen, Davisson und Kunsman erzielen 1923 Reflexionen von Elektronen in bevorzugten Richtungen an Metallkristallen, beides Erscheinungen, die mit der Korpuskelvorstellung des Elektrons schwer vereinbar sind. Ein Jahr später stellt de Broglie die These auf, daß ein Elektron bestimmter Geschwindigkeit auch als Welle bestimmter Länge aufgefaßt werden könne. 1925 weist Elsäser darauf hin, daß bei den Versuchsergebnissen von Ramsauer sowie Davisson und Kunsman Interferenzerscheinungen im Sinne de Broglies vorliegen könnten. 1927 veröffentlichen Davisson und Germer Versuche über Elektroneninterferenzen am Nickel-Einkristall, bei denen sie die Gültigkeit der de Broglieschen Beziehung nachweisen. Damit ist erkannt, daß das Elektron gleichzeitig Korpuskel- und Wellennatur besitzt. Eine weitere Parallele zwischen bewegten Elektronen und kurzen Lichtwellen erzielt 1928 als erster G. P. Thomson, dem es gelingt, die von Röntgenstrahlen her bekannten Debye-Scherrer-Ringe auch mit Hilfe schneller Elektronen nachzuweisen.

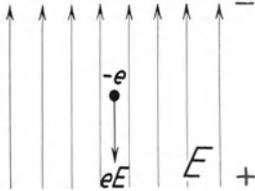
Gegen die Deutung aller dieser Versuchsergebnisse könnte man noch Bedenken erheben, da in allen Fällen die Streuung an Körpern von atomaren Dimensionen erfolgt und infolgedessen vielleicht Wechselwirkungen zwischen Elektron und Atom in unbekannter Weise bestehen. Ein Versuch fehlt noch, nämlich der direkte Nachweis des Wellencharakters durch Interferenzerscheinungen an makroskopischen Objekten. Die inzwischen entwickelte geometrische Elektronenoptik macht 1940 die Durchführung dieses Versuches möglich. Boersch [127] erzeugt einen äußerst feinen Brennfleck, von dem aus er die Kante einer Halbebene bestrahlt. Damit werden Fresnelsche Beugungstreifen erzielt, und es wird so der Wellencharakter des Elektrons mit der gleichen Sicherheit wie der des Lichtes bewiesen. So hat das eine Teilgebiet der Elektronenoptik, die geometrische Elektronenoptik, dem anderen Teilgebiet, der Wellenoptik des Elektrons, zu dem Schlußglied verholfen, das zum überzeugenden Beweise der Wellennatur des Elektrons noch fehlte. Geometrische Optik und Wellenoptik des Elektrons sind heute die beiden Disziplinen der Elektronenoptik, die der geometrischen und der Wellenoptik des Lichtes entsprechen. Die geometrische Elektronenoptik beherrscht die geometrischen Strahlengänge, die Wellenoptik des Elektrons beherrscht die Feinstruktur der Bilder und bestimmt die Auflösungsgrenze der Apparatur. Für die Elektronenmikroskopie ist das Verhältnis ähnlich wie bei der elementaren und der Abbeschen Auffassung des Lichtmikroskops.



Elektronenbeugung an einer Kante nach Boersch [127]
(1, 3, 5 theoretische Lage d. Maxima)

Elektrische und magnetische Kraftwirkung auf Elektronen.

Statische (stationäre) elektrische und magnetische Felder im Vakuum unterscheiden sich grundsätzlich voneinander: Während elektrische Kraftlinien an einer Ladung beginnen und an einer entgegengesetzten enden, kennt



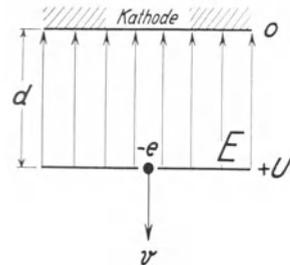
das magnetische Feld keine wahren freien magnetischen Ladungen: Das elektrische Feld ist nicht quellenfrei, jedoch wirbelfrei; das magnetische Feld ist quellenfrei, braucht aber nicht wirbelfrei zu sein.

Es ist daher auch nur natürlich, daß sich ein Elektron, d. h. eine elektrische Ladung im elektrischen Feld grundsätzlich anders ver-

hält als im magnetischen Feld. Besäße man einen einzelnen magnetischen Pol, so würde er sich im magnetischen Feld genau so verhalten wie das Elektron im elektrischen Feld u. s. f.

Bei elektrischen Feldern von der Stärke E wirkt das Feld mit der Kraft $e \cdot E$ auf die Ladung e , auf die es — entsprechend wie das Schwerfeld auf eine Masse — eine Zugwirkung in Richtung der Kraftlinien ausübt. Das Elektron, das negativ geladen ist,

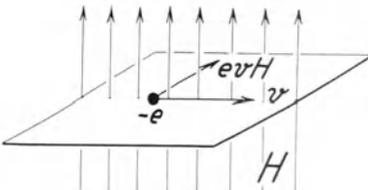
wird dabei wie eine Masse im Schwerfeld, aber entgegen der Richtung des Feldes, durch die Kraft $e \cdot E$ (erstes Bild) beschleunigt. Wird ein Elektron von der Kathode aus beschleunigt, von der es mit der Geschwindigkeit Null ausgeht, so ist die am Elektron längs des Weges d vom Felde geleistete Arbeit $e \cdot E \cdot d$ (zweites Bild). Da $E \cdot d = U$ die durchfallene Spannung bedeutet, ist die geleistete Arbeit $e \cdot U$. Diese Arbeit findet sich in der Bewegungsenergie wieder, so daß also, wenn m die Masse und v die



Geschwindigkeit bedeutet, die das vorher ruhende Elektron erreicht hat, gilt:

$$\frac{1}{2} m v^2 = e E d = e U.$$

Magnetische Felder von der Stärke H wirken nicht auf die Ladung selbst, sondern nur auf die bewegte Ladung, auf den Strom $e \cdot v$. Die Kraft $e v H$ wirkt außerdem nicht in Richtung der Magnetfeldlinien, sondern senkrecht dazu (drittes Bild). Infolge dieser verschiedenen Richtungen der



Kraftwirkungen zur Bahnrichtung wird im Magnetfeld die Geschwindigkeit des Elektrons niemals geändert. Es findet stets nur eine Ablenkung statt.

Aus diesen grundsätzlichen Unterschieden folgt ein praktisch wichtiger Unterschied für die Anwendung der Felder: Elektronen können nur durch elektrische

Felder beschleunigt werden. Man kann nicht mit rein magnetischen Systemen arbeiten, wenn die Elektronen ohne Geschwindigkeit vorgegeben sind.

Elektronenbewegung im elektrischen und magnetischen Feld.

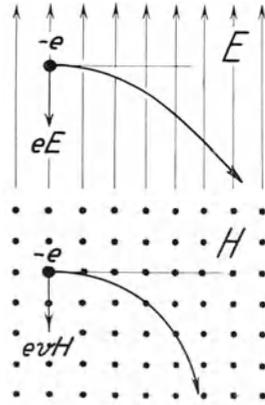
Die Bewegung des Elektrons in einem beliebigen elektrischen oder magnetischen Feld kann auf differentiale Bewegungsvorgänge in homogenen Feldern zurückgeführt und aus diesen heraus verstanden werden:

Es bewege sich ein Elektron in einem beliebigen elektrischen Felde. In einem bestimmten Augenblick seien die Geschwindigkeit des Elektrons und die elektrische Kraft, die auf das Elektron wirkt, nach Größe und Richtung bekannt. Gefragt sei nach der Änderung der Bewegung im folgenden Augenblick. Man denke sich die elektrische Kraft in eine Komponente E_{\parallel} in Richtung und eine Komponente E_{\perp} senkrecht zur Richtung der Bahn zerlegt. Der Bewegungsvorgang wird sich aus der durch die erste Komponente bedingten Geschwindigkeitsänderung und aus der durch die zweite Komponente bedingten Ablenkung ebenso zusammensetzen, wie es bei der Bewegung eines geworfenen Steines im Schwerfeld der Fall ist. In unserem Fall ergibt sich die Geschwindigkeitsänderung, wie es auf der Gegenseite erläutert wurde, nach dem Energiesatz aus der in dem betrachteten Zeitelement durchfallenen Spannungsdifferenz. Für die Ablenkung, die man sich während einer sehr kleinen Strecke auf einer Kreisbahn erfolgend denken kann (erstes Bild), gilt, daß die Feldkraft E_{\perp} als Zentripetalkraft den Wert $\frac{m v^2}{r_e}$ haben muß. Daraus folgt $r_e = \frac{m v^2}{e E_{\perp}}$ als Krümmungsradius der Bahn. Unter Benutzung des Energiesatzes, wobei U wie auf der Gegenseite die Beschleunigungsspannung bedeutet, die das Elektron durchfallen hat, kann man schreiben:

$$r_e = 2 \frac{U}{E_{\perp}} .$$

Es bewege sich das Elektron nun in einem beliebigen magnetischen Felde. Wiederum wird man die Zerlegung der Feldstärke H_{\perp} in die Komponente H_{\parallel} in Richtung und in die Komponente H_{\perp} senkrecht zur Bahnrichtung vornehmen können. Diese Kräfte wirken nun aber durchaus anders als beim elektrischen Fall. Da ein Elektron, das sich in Richtung eines magnetischen Feldes bewegt, nicht beeinflußt wird, bleibt also die Komponente H_{\parallel} wirkungslos. Die Komponente H_{\perp} lenkt das Elektron ab, und zwar, wie es auf der Gegenseite erwähnt wurde, in eine Richtung senkrecht zur Krafrichtung. Unter Wirkung dieser Kraft beginnt das Elektron einen Kreis zu beschreiben (zweites Bild, bei dem die Bahn des Elektrons in die Zeichenebene gelegt ist, so daß nur die Durchstoßpunkte der Feldlinien erkennbar sind). Entsprechend wie im elektrischen Feld ergibt sich nun:

$$r_m = \frac{1}{H_{\perp}} \sqrt{\frac{2m}{e} U} .$$



Elektrische und magnetische Bewegungslehre.

Den Unterschieden des elektrischen und magnetischen Feldes entspricht eine grundsätzlich verschiedene Wirkungsweise der beiden Felder auf das bewegte Elektron (vgl. S. 8): Im elektrischen Feld wird das Elektron wie ein Stein im Schwerfeld längs der Kraftlinien beschleunigt; im magnetischen Feld findet eine Abdrängung aus der Bahn senkrecht zu der Richtung der Kraftlinien statt. Das elektrische Feld wirkt unmittelbar auf das Elektron; das magnetische Feld auf den durch das fliegende Elektron repräsentierten Strom ev .

Die Unterschiede in dem Mechanismus der Beeinflussung prägen sich in den Formeln aus, die die Beeinflussungen zahlenmäßig zu erfassen erlauben (vgl. S. 9). So ist der Krümmungsradius des Kreises, den ein Elektron unter der Wirkung eines elektrischen Feldes E zu beschreiben beginnt, der Bewegungsenergie $eU = \frac{mv^2}{2}$ des Elektrons (Bezeichnungen s. S. 8), d. h. dem Quadrat der Geschwindigkeit v proportional; im magnetischen Feld H dagegen der Geschwindigkeit v selbst.

Dieser Unterschied in der Gesetzmäßigkeit ist nicht auf den Krümmungsradius beschränkt, sondern kehrt in allen Formeln der elektrischen und magnetischen Bewegungslehre wieder. Da er in der Formel des Krümmungsradius steckt, steckt er ebenso in der Formel für den Ablenkwinkel (vgl. S. 19), denn beide Formeln sind nur verschiedene Ausdrücke für die Ablenkung. Aber auch die Formeln der Brennweiten von elektrischen und magnetischen Linsen, für die ebenfalls die Ablenkgesetze maßgebend sind, zeigen die entsprechenden Unterschiede (vgl. S. 16 und 17). So tritt hier ebenso wie bei den einfachen Ablenkformeln im elektrischen Fall stets nur die Kombination E/U oder ein Spannungsverhältnis, im magnetischen nur H/\sqrt{U} auf, was der Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsquadrat im ersten Fall von der Geschwindigkeit im zweiten Fall entspricht.

Diese grundsätzlichen Unterschiede haben mancherlei wichtige Konsequenzen. Für die Elektronenmikroskopie ist besonders die folgende von Bedeutung: Der Strahlengang eines Elektronengerätes, das eine Glühkathode als Elektronenquelle und ausschließlich elektrische Spannungen der gleichen Spannungsquelle benutzt, bleibt ungeändert, wenn die Spannung der Spannungsquelle schwankt, weil nur ein Spannungsverhältnis in allen Formeln auftritt. Für das Elektronen-Übermikroskop bedeutet dies, daß das elektrostatische Gerät nicht nur einfacher durch den Fortfall der Akkumulatorenbatterie für die magnetischen Linsen, sondern auch einfacher durch geringere Anforderungen an die Glättung der Hochspannung ist.

Wesen und Aufgabe der Elektronenoptik.

Die Mechanik beschäftigt sich mit der Bewegung von Massen unter der Wirkung von Kräften. Man betrachtet die Bewegungsvorgänge und studiert die Bahnen, die die Massenteilchen beschreiben. Dabei können Teilchen bzw. Kräfte sehr verschiedener Natur sein. Meist handelt es sich um schwere Massen und Gravitationskräfte, aber auch die Bewegung einer Ladung in einem elektrischen oder magnetischen Feld ist eine Aufgabe der Bewegungslehre. Im ersten Falle handelt es sich um ein Problem der eigentlichen Mechanik oder Ballistik, im zweiten um ein Problem der Elektrik.

Die geometrische Optik im weitesten Sinne untersucht die Ausbreitung des Lichtes. Ihre wichtigste Aufgabe ist das Studium der Fokussierung, d. h. der Wiedervereinigung der von einem Punkte ausgehenden Strahlung und die Untersuchung der damit auf engste zusammenhängenden Bilderzeugung.

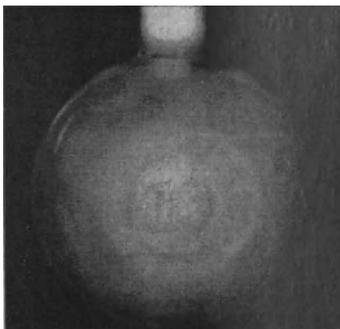
In der geometrischen Optik beschäftigt man sich im allgemeinen mit der Ausbreitung des Lichtes durch brechende Medien, wie z. B. Glas. Die optische Betrachtung ist jedoch nicht auf diese Lichtstrahlung beschränkt, sie ist ebenso anwendbar auf andere Strahlungen, insbesondere auch auf die Elektronenstrahlung, fasse man die Elektronen als Wellen oder als Korpuskeln auf. So erhält man als Analogon zur geometrischen Lichtoptik die geometrische Elektronenoptik. Ihre Strahlungen sind die Strahlen geladener Teilchen, ihre brechenden Medien sind die elektrischen und magnetischen Felder, ihre Linsen die rotationssymmetrischen Felder.

Damit ist der Elektronenoptik ihre Stellung angewiesen. Ihre Aufgabe ist die Betrachtung der sich in elektrischen oder magnetischen Feldern ausbreitenden Elektronenstrahlung unter besonderer Berücksichtigung der Erscheinungen bei der Wiedervereinigung der von den Punkten eines Objektes ausgehenden Strahlung. Die Methode ihrer Theorie ist wahlweise die der Mechanik, indem man bei dem geläufigeren Begriff des Elektrons als einer Korpuskel stehen bleibt, oder sie ist auch die der Optik, indem man die Elektronenstrahlung lichtoptisch auffaßt, die optischen Regeln und Ergebnisse übernimmt, prüft und den geänderten Bedingungen anpaßt. Ihre Terminologie entspricht der der Lichtoptik, denn man spricht hier wie dort von Optik, Linse und Mikroskop.

Aus der Entwicklungsgeschichte der Elektronenoptik.

Die geometrische Elektronenoptik ist die Grundwissenschaft großer Teile der heutigen Hochvakuum-Elektronik. Auf ihrem Fundament wuchs die neuzeitliche Oszillographen- und Fernsehöhre, der Bildwandler und das Elektronenmikroskop in seinen verschiedenen Formen.

Die Entwicklung der geometrischen Elektronenoptik ist aufs engste mit der Entdeckungsgeschichte des Elektrons verbunden. Auch für die Elektronenoptik ist die Entdeckung der magnetischen und elektrischen Ablenkung der



„Abbildung“ mit einem Originalrohr Goldsteins.

Aus Brüche-Scherzer [26].

Ausgangspunkt. Bei Goldstein, Crookes, Birkeland und anderen finden wir um 1880 die ersten Fokussierungserscheinungen durch Hohlspiegel-Kathoden und Schattenprojektionen beschrieben. Von Goldstein wurde auch das erste Elektronenbild erzielt, wenn man eine Projektionsabbildung, wie sie nebenstehendes Bild zeigt, so nennen darf. Jedoch erst 1906 wurde eine elektrische Elektronenlinse im strengeren Sinne benutzt, der Wehnelt-Zylinder, den Westphal beschrieb.

Die magnetische Linse war in Gestalt der fokussierenden Stromspule schon

früh benutzt. Plücker und Hittorf hatten bereits die Verschraubung der Kathodenstrahlen beobachtet. Riecke beschäftigte sich 1881 theoretisch mit der Elektronenbewegung im homogenen Magnetfeld. Wiechert benutzte 1898 das Magnetfeld einer langen, über die Versuchsröhre geschobenen Spule zur Fokussierung. Nachdem 1903 Lenard im Rahmen seiner für die Entwicklung der Elektronik grundlegenden Untersuchungen gezeigt hatte, daß das Streufeld einer Spule fokussierend wirkt, bewies 1905 Rankin, daß auch eine übliche Spule, die kurz gegenüber dem Strahlenweg ist, ähnliche Wirkungen auf Elektronen ausübt. 1927 konzentrierte Gabor durch seine Spulenkapselung die Wirkung auf einen engeren Bereich.

Die Theorie wurde 1907 durch Störmer gefördert, der eine Gruppe von konzentrischen Stromringen in ihrer Wirkung auf Elektronen behandelte, aber erst 1926/27 gelangte Busch zu dem abschließenden Erfolg.

Busch verfolgte rechnerisch die Elektronenbewegung in dem rotations-symmetrischen Magnetfeld einer Spule:

„Es gelang ihm dabei, eine geometrische Optik für Elektronen zu entwickeln, in der die Konzentrationsspule an die Stelle der optischen

Sammellinse tritt. Busch konnte zeigen, daß sogar die bekannte Linsenformel der Optik Gültigkeit hat, wenn man die von einer punktförmigen Elektronenquelle ausgehenden Elektronen durch eine kurze Spule zu einem Brennpunkt wiedervereinigt. Die Analogie geht noch weiter: Ist die Elektronenquelle nicht punktförmig, sondern z. B. ein Draht, so wird genau wie in der Optik durch die Spule ein umgekehrtes Bild entworfen, dessen Größe durch die gleichen Beziehungen wie in der geometrischen Optik berechenbar ist. Auch die Linsenfehler, so z. B. die Aberration, hat ihr Analogon. Es scheint weiter möglich zu sein, die Wirkungsweise eines inhomogenen Magnetfeldes von endlicher Ausdehnung in ähnlicher Weise zu beschreiben, wie in der elementaren geometrischen Optik mit Hilfe der Gaußschen Hauptebenen“. (Auszug aus unserer ersten elektronenoptischen Arbeit [1]) von 1930.)*

Wolf, ein Schüler von Busch, war der erste, der diese Erkenntnisse verwertete, indem er das Bild der Mitte eines Fadenkreuzes beobachtete. Bald darauf, im Jahre 1930, unterstrich Brüche nochmals die Erkenntnisse von Busch, zog verschiedene andere Parallelen und schloß das Gebiet durch den Begriff „geometrische Elektronenoptik“ zusammen. Er wies ferner darauf hin, daß es auch elektrische Linsen, die an sich in den Formeln von Busch unerkannt enthalten waren, als selbständige Abbildungsorgane geben müsse und erkannte sie in einem aufgeladenen Ring:

„Gelingt es, einen Elektronenstrahl magnetisch zu fokussieren, so muß es auch elektrisch gelingen . . . Nachträgliche Wiedervereinigung durch elektrische Felder, ähnlich wie mit der Striktionsspule, führten Jones und Tasker durch, indem sie einen aufgeladenen Ring um den divergierenden Elektronenstrahl legten“ [1].

Doch erst 1931/32 trat die elektrische Linse der magnetischen Linse als gleichberechtigt zur Seite, worüber 1936 H. Busch, der Begründer der geometrischen Elektronenoptik, in seinem Hauptvortrag auf der Physikertagung sagte:

„Soviel über die Grundlagen. Sie wurden 1926/27 im Hinblick auf die magnetische Konzentrierung von Kathodenstrahlen entwickelt, nur die in ihnen enthaltene Folgerung der Existenz der elektrischen Linse als selbständigen Abbildungsorgans wurde damals noch nicht gezogen; diese Möglichkeit wurde vielmehr erst 1931/32 unabhängig von Davisson und Calbick einerseits und Brüche und Johannson andererseits erkannt“.

* Ziffern in edigen Klammern [] beziehen sich auf unsere im Literaturverzeichnis zusammengestellten Arbeiten am Ende des Heftes. Bei wörtlichen Zitaten sind Hinweise im Originaltext auf Fußnoten und Veröffentlichungen meist fortgelassen.

Definitionen der geometrischen Elektronenoptik.

Der Tatsache, daß ein großer Teil der geometrischen Elektronenoptik im AEG Forschungs-Institut aufgebaut wurde, entspricht, daß die wichtigeren Definitionen des neuen Gebiets — wie sein Name selbst — durch unsere Arbeiten veröffentlicht wurden.

Die **g e o m e t r i s c h e E l e k t r o n e n o p t i k** ist die Lehre von der Elektronenbewegung in elektrischen und magnetischen Feldern, unter optischem Gesichtspunkt betrachtet (1930 [1])*.

Das **E l e k t r o n e n m i k r o s k o p** ist gegenüber einem Lichtmikroskop eine vergrößernde Vorrichtung, bei der Elektronenstrahlen an Stelle von Lichtstrahlen verwendet werden (1932 [2]).

Das **Ü b e r m i k r o s k o p** — genauer das Elektronen-Übermikroskop — ist ein Elektronenmikroskop, das über die Auflösungsleistung des Lichtmikroskops hinausgeht, was wegen der gegenüber den Lichtwellen um Größenordnungen kürzeren Wellenlänge bewegter Elektronen möglich ist (1933 [13]).

Der **B i l d w a n d l e r** ist eine Anordnung zur Umwandlung eines Lichtbildes in ein Elektronenbild (1935 [48]).

E l e k t r i s c h (elektrostatistisch) bzw. **m a g n e t i s c h**, vor Elektronenoptik, Elektronenlinse, Elektronenmikroskop gesetzt, bedeutet, daß es sich um die Elektronenoptik, die Elektronenlinse, das Elektronenmikroskop usw. mit elektrischen bzw. magnetischen Linsenfeldern handelt (1932 [3]).

Die elektrische **E i n z e l l i n s e** ist eine der Glaslinse entsprechende elektrische Elektronenlinse, die einzeln im Raum steht und zu deren beiden Seiten der Brechungsindex (Elektronengeschwindigkeit) gleich ist (1932 [5]).

Die elektrische **I m m e r s i o n s l i n s e** ist eine Elektronenlinse, an deren beiden Seiten der Brechungsindex (Elektronengeschwindigkeit) verschieden ist (1934 [26]).

Das elektrische **I m m e r s i o n s o b j e k t i v** ist eine Immersionslinse, die mit ihrem Feld an das Objekt anschließt (1933 [16]). Das Objekt kann dabei ein Selbststrahler (z. B. Kathode) oder ein durchstrahlter Gegenstand (z. B. Folie) sein.

* Die Zitate beziehen sich auf diejenigen Stellen unserer Arbeiten, an denen die betreffende Bezeichnung zum erstenmal in der Gesamtliteratur erscheint. (Vgl. das Literaturverzeichnis S. 226.)

II. Elemente der geometrischen Elektronenoptik.

Das elektronenoptische Brechungsgesetz.

Wenn ein Lichtstrahl aus einem Gebiet des Brechungsindex n_1 z. B. auf eine Glasplatte vom Brechungsindex n_2 trifft, wie es das nebenstehende obere Bild zeigt, so wird er zum Einfallslot hingebrochen. Zwischen dem Einfallswinkel i_1 und dem Austrittswinkel i_2 gilt das Brechungsgesetz nach Snellius:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Für den Fall des fliegenden Elektrons, d. h. für den Elektronenstrahl, wird die Glasfläche als brechende Fläche durch ein sehr engmaschiges Doppelnetz vertreten. Beim Eindringen des Elektrons unter dem Einfallswinkel i_1 in diesen Kondensator wird es beschleunigt, so daß es ihn unter dem kleineren Austrittswinkel i_2 verläßt. Um den Zusammenhang zwischen Einfalls- und Austrittswinkel und den Elektronengeschwindigkeiten vor und nach dem Durchgang durch die „brechende Fläche“ zu erhalten, denke man sich die Anfangsgeschwindigkeit v_1 zerlegt in die rechtwinkligen Komponenten v_y (senkrecht zur Schicht) und v_x (parallel zur Schicht). Da die Geschwindigkeit v_x beim Durchgang durch die Schicht keine Änderung erfährt, gilt: $v_{1x} = v_{2x}$. Damit wird

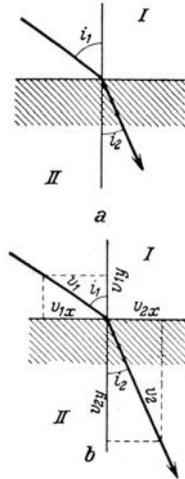
$$\sin i_1 = \frac{v_{1x}}{v_1} ; \sin i_2 = \frac{v_{2x}}{v_2} = \frac{v_{1x}}{v_2}$$

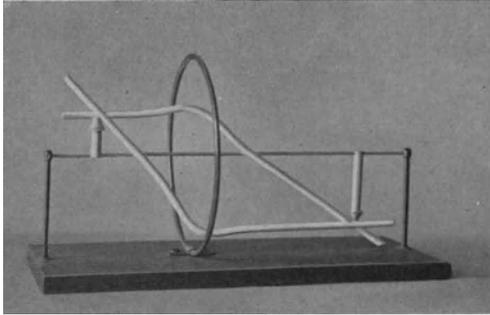
und es entsteht durch Division das elektronenoptische Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_2}{v_1}.$$

Zwischen Einfalls- und Austrittswinkel gilt also in der Licht- und Elektronenoptik das gleiche Sinusgesetz, wobei die Elektronengeschwindigkeit oder die Wurzel der seit Austritt aus der Kathode vom Elektron durchfallenen Beschleunigungsspannung an die Stelle des optischen Brechungsindex tritt.

Wie man weiß, daß dem Brechungsgesetz von Snellius die geometrische Optik entspricht, deren Grundlage es ist, so kann man aus der Gültigkeit eines gleichartigen Gesetzes für Elektronen schließen, daß es eine analoge geometrische Optik für Elektronen geben muß.





Die elektrische Linse.

Die elektrische (oder elektrostatische) Linse ist ein rotationsymmetrisches elektrisches Feld (Beispiel: aufgeladener Ring).

Die elektrische Linse entspricht nach dem Ergebnis ihrer Wirkung und den Einzelheiten ihrer Arbeitsweise weitgehend der Glaslinse.

Die elektrische Linse läßt sich zwar nicht in vollständiger Analogie zur Glaslinse verwirklichen, denn es lassen sich die Kugelflächen der Glaslinse, an denen der Brechungsindex springt, nicht nachbilden. Es läßt sich jedoch eine spezielle Form des optischen Brechungsfeldes gut nachbilden, das geschichtete Medium der Augenlinse. Ihm entspricht das stetig veränderliche elektrische Feld, in dem sich der elektronenoptische Brechungsindex (nach S. 15 die Wurzel aus der seit Austritt des Elektrons aus der Kathode durchfallenen Beschleunigungsspannung) stetig ändert.

In der Optik wird ein Objekt mit Hilfe einer Folge von achsenzentrigen Kugelflächen abgebildet. Also wird wegen des elektronenoptischen Brechungsgesetzes auch ein elektronenabgebendes Objekt durch ein achsenzentrigen elektrisches Feld abgebildet. Die Gesetze dieser Abbildung sind den optischen Gesetzen genau analog. Ein elektrisches Feld, das eine solche Abbildung leistet, nennt man Elektronenlinse.

Die konstruktiv einfachste Form der elektrischen Linse ist der aufgeladene Ring (s. Bild). Die Brennweite f einer solchen Linse ist, wenn R den Radius und ϱ den Drahradius, U die bei der Beschleunigung des Elektrons durchfallene Spannung und u die Spannung des aufgeladenen Ringes bedeutet

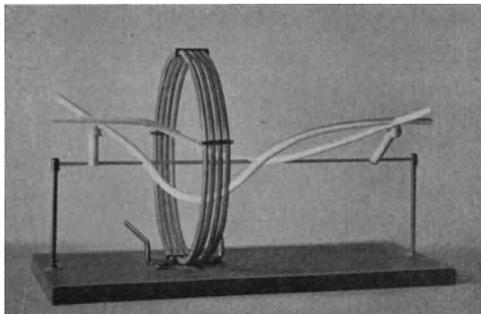
$$f = 7,3 R \left(\log_{10} \frac{8 R}{\varrho} \right)^2 \cdot \frac{U^2}{u^2} .$$

Aus dem aufgeladenen Ring kann man sich die heute für das Durchstrahlungs-Elektronenmikroskop benutzte „Einzellinse“ abgeleitet denken (vgl. S. 20). Für das Emissions-Elektronenmikroskop wird die elektrische Linse heute in der Form des „Immersionsobjektivs“ verwendet (vgl. S. 26).

Immersionsobjektiv [3] und Einzellinse [5, 8] wurden als elektronenmikroskopische Abbildungselemente von Brüche und Johansson untersucht. Für das elektrostatische Übermikroskop wird die Einzellinse heute in der von Boersch [99] und Mahl [98] den Hochspannungsanforderungen angepaßten Form benutzt (s. S. 22).

Die magnetische Linse.

Die magnetische Linse ist ein rotationssymmetrisches magnetisches Feld (Beispiel: Stromspule).



Die magnetische Linse entspricht im Endergebnis ihrer Wirkung der Glaslinse. Ihre Funktion im einzelnen ist dagegen ganz anders. Für sie ist die Konstanz der Elektronengeschwindigkeit und die in der Lichtoptik unbekanntere Bildrotation charakteristisch.

Wie jedes rotationssymmetrische elektrische Feld eine Elektronenlinse ist, so auch jedes rotationssymmetrische magnetische Feld. Allerdings kann man hier nicht ohne weiteres von einem Brechungsindex sprechen wie bei der Lichtoptik oder dem elektrischen Zweig der Elektronenoptik. Ein für das magnetische Feld definierter Brechungsindex hängt nicht nur von der Elektronengeschwindigkeit und dem Magnetfeld, sondern auch von der spezifischen Ladung des Elektrons und — was besonders wichtig ist — von der Strahlrichtung im Magnetfeld ab. Das magnetische Feld muß zu den anisotropen Kristallen in Parallele gesetzt werden, bei denen ebenfalls der Brechungsindex richtungsabhängig ist.

Die konstruktiv einfachste Form der magnetischen Linse ist der stromdurchflossene Ring (s. Bild). Die Brennweite f in cm einer solchen Linse ist, wenn R den Radius des Stromringes in cm, i den den Ring durchfließenden Strom in Amp. und U die gesamte Beschleunigungsspannung in Volt bedeutet:

$$f = 97 \frac{R}{i^2} U.$$

Die magnetische Linse wird heute meist in der Form einer „gepanzerten Spule“ benutzt, d. h. einer Spule, bei der das Außenfeld bis auf einen kleinen Bereich im Spuleninnern durch einen magnetischen Schluß aufgenommen ist. Auf diese Weise lassen sich die für das magnetische Übermikroskop erforderlichen kräftigen Felder geringer Ausdehnung erzielen. Die gepanzerte Spule ist von Gabor angegeben und durch Ruska, Knoll und v. Borries wesentlich verbessert und in die heute benutzten Formen gebracht worden.

Eine andere brauchbare Linsenform, die sich ebenfalls bei dem magnetischen Übermikroskop bewährt hat, ist die Jochlinse, die Kinder und Pendzich [112] für das Jochlinsen-Übermikroskop [141] verwandten, worüber man S. 28 vergleiche.

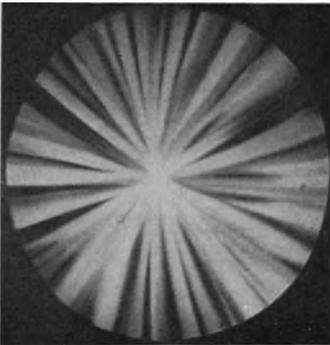
Der Elektronenspiegel.

Der Elektronenspiegel ist ein rotationssymmetrisches elektrisches Feld, das die Richtung des Elektronenstrahlanges umkehrt. (Beispiel: Eine Kugelschale, die so stark negativ gegen die Kathode aufgeladen ist, daß sie die Elektronen reflektiert).

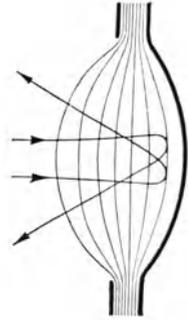
Die Wirkung des sammelnden und zerstreuenden Elektronenspiegels entspricht im Endergebnis derjenigen des optischen Spiegels, zeigt aber im einzelnen gewisse Abweichungen. So finden Reflexion und Strahlkonzentrierung nicht an einer bestimmten Fläche statt. Vielmehr beruhen die Abbildungseigenschaften auf der durch die kontinuierliche Strahlbrechung erzeugten Linsenwirkung, die Strahlumkehr ist durch Totalreflexion nach tiefem Eindringen und Abbremsung des Elektrons zu deuten.

Während in der Optik ein Spiegel von einer Linse äußerlich vollkommen verschieden ist, braucht das in der Elektronenoptik nicht der Fall zu sein. Ein und dieselbe Anordnung kann je nach den benutzten Spannungen sowohl eine Linse als auch ein Spiegel sein. (Beispiel: Der Kreisring, der als Sammellinse, Sammelspiegel und Zerstreungsspiegel wirken kann.)

Die Tatsache, daß eine Elektronenlinse bei Erniedrigung der Linsenspannung in einen Spiegel übergehen kann, führt zu einer technisch wichtigen Anwendung, der Steuerung von Elektronenströmen: Die Intensität des Elektronenstromes, der beispielsweise durch einen Kreisring hindurchgeht, kann in seiner Intensität durch mehr oder weniger starke Erniedrigung der Ringspannung gesteuert werden. Das Potentialfeld wirkt so, als ob sich eine spiegelnde Irisblende zuzöge. Der Übergang ist mit einer starken Verschlechterung der Bildqualität verbunden, so daß man im Moment des Überganges von einer Abbildung überhaupt nicht mehr sprechen kann. Das untenstehende Bild zeigt dies am Beispiel der Verzeichnung, die ein Netz mit quadratischen Maschen im Moment des Überganges, am „Überschlagspunkt“, erfährt. Die Steuerung durch Spiegelung findet bei den Raumladegitter-Röhren Anwendung: Die Netzmaschen des Steuergitters wirken als kleine Elektronenlinsen, die sich bei Spannungserniedrigung in Spiegel umstellen.



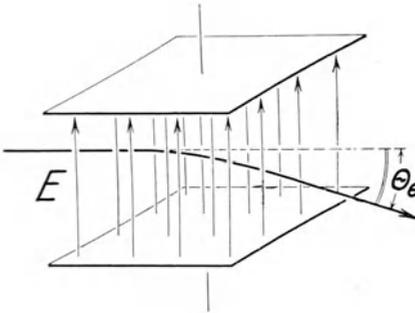
Die Theorie des Elektronenspiegels wurde von Henneberg und Recknagel [54] sowie Recknagel [72, 77, 89] entwickelt. Experimentelle Untersuchungen an Elektronenspiegeln hat Hottenroth durchgeführt [70, 83].



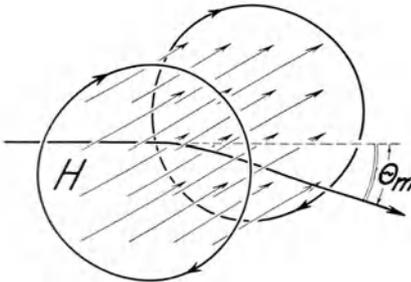
Das Elektronenprisma.

Das Elektronenprisma ist ein (meist homogenes) elektrisches oder magnetisches Feld, das zur Ablenkung eines Elektronenstrahls oder zur Zerlegung eines Strahlungsgemisches nach der Geschwindigkeit dient. (Beispiel: Feld eines Plattenkondensators.)

Gelegentlich werden die elektrischen und magnetischen Querfelder als Elektronenprismen bezeichnet. Diese entsprechen hinsichtlich der von ihnen gelösten Aufgabe dem optischen Prisma. Sie unterscheiden sich aber in den Einzelheiten der Wirkungsweise wesentlich von ihnen. Während das Prisma der Optik ähnlich wie die Linse aufgebaut ist, so daß der Lichtstrahl die brechenden Flächen vorzugsweise senkrecht durchdringt, erfolgt auch bei dem elektrischen Elektronenprisma ein vorzugsweise streifender Verlauf des Strahls zu der die brechende Fläche vertretenden Potentialfläche.



Der typische Vertreter des elektrischen Elektronenprismas ist der Plattenkondensator, d. h. eine Anordnung aus zwei parallelen Platten, die gegeneinander aufgeladen sind. Die Ablenkung erfolgt von der negativen zur positiven Platte (erstes Bild). Die magnetische Ablenkung wird durch ein entsprechendes Querfeld, das durch zwei parallele, gleichsinnig vom Strom durchflossene Spulen erzeugt wird, bewirkt (zweites Bild).



Durchläuft das Elektron, das die Beschleunigungsspannung U durchfallen hat, im homogenen elektrischen Feld E senkrecht an den Kraftlinien ein Bahnstück von der kleinen Länge l und ist r_e der Krümmungsradius der Bahn (vgl. S. 9), so ist die kleine Ablenkung

$$\theta_e = \frac{l}{r_e} = \frac{1}{2} \left(\frac{E}{U} \right) l.$$

Entsprechend gilt für die Ablenkung im magnetischen Feld der Stärke H

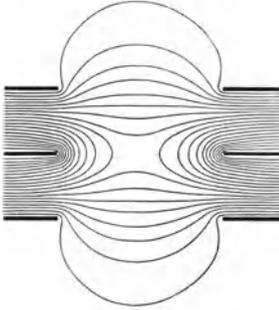
$$\theta_m = \sqrt{\frac{e}{2m}} \left(\frac{H}{\sqrt{U}} \right) l.$$

Beim Dispersionsprisma wird die unterschiedliche Beeinflussung eines Ladungsträgers im elektrischen bzw. magnetischen Feld von großer Bedeutung. Die elektrische Ablenkung hängt von U ab, die magnetische von

$\sqrt{\frac{m}{e}} U$ (vgl. S. 10). Besteht der Strahl nicht nur aus Elektronen, wie es bisher immer vorausgesetzt wurde, sondern aus einem Gemisch verschiedener negativer und positiver Ladungsträger, so kann man durch Kombination einer elektrischen Ablenkung mit einer magnetischen den Strahl analysieren. In der Tat können die beiden Ablenkformeln als Bestimmungsgleichungen für U und e/m , d. h. für Teilchengeschwindigkeit und spezifische Ladung betrachtet werden. Auf dieser Tatsache beruht die Massenspektroskopie.

Die elektrische Einzellinse.

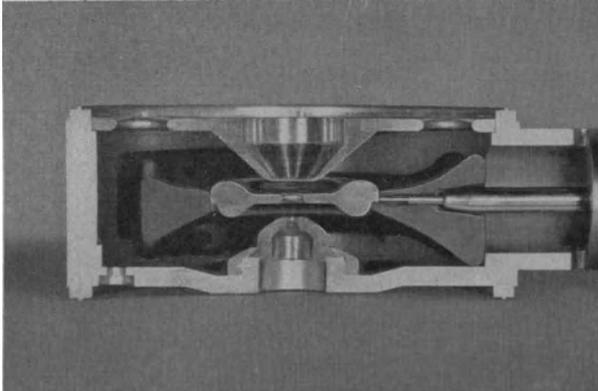
Der aufgeladene Ring (vgl. S. 16) wird als Elektronenlinse in dieser einfachsten Form nicht verwendet. Bei der praktischen Ausführung der „Einzelinse“ (vgl. S. 14) werden noch auf beiden Seiten des aufgeladenen Ringes Gegenelektroden angebracht, unter deren Wirkung das elektrische Feld auf einen wesentlich kleineren Bereich zusammengedrängt wird.



Potentialfeld einer einfachen Einzellinse.

Diese nebenstehende einfache Einzellinse besteht aus drei Lochblenden, deren mittlere dem aufgeladenen Ring (vgl. S. 16) entspricht. Die Mittelelektrode wird gegenüber den beiden miteinander verbundenen äußeren Elektroden aufgeladen. Es entsteht so eine Folge von rotations-symmetrischen Potentialflächen, die den brechenden Flächen von Glaslinsen entsprechen. Die Gesamtwirkung aller dieser brechenden Potentialflächen, die in ihrem wirkenden Bereich nahe der Achse in erster Näherung als Kugelflächen aufgefaßt werden

können, ist die eines Sammelsystems, ganz gleich, ob die Mittelelektrode negativ oder positiv gegenüber den Außenelektroden aufgeladen ist.

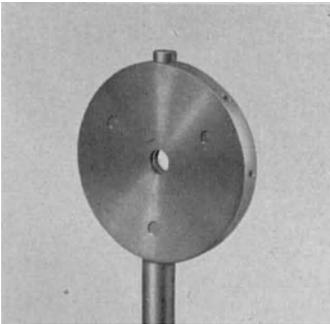


Aufbau einer Hochspannungseinzellinse. Diese Linse wird im elektro-statischen Übermikroskop verwendet. Aus Gründen der Spannungs-festigkeit sind die Außenelektroden nur im Mittelbereich nahe an die Mittel-elektrode herangeführt. Die Mittelelektrode selbst hat aus gleichen Gründen eine Außenwulst. Die Linse ist für 50—60 kV mit Sicherheitsreserve ge-baut und hat z. B. bei 2 mm lichter Weite der Mittelelektrode eine Brenn-weite von 2,5 mm.

Aus der Entwicklung der elektrischen Einzellinse.

Da die geometrische Elektronenoptik nur der Ausdruck dafür ist, daß man die aus der geometrischen Optik bewährte Anschauungsweise auf das Gebiet der Elektronenbewegung in Feldern angewandt hat, sind die „Elemente der geometrischen Elektronenoptik“ schon bekannt gewesen, lange bevor man von ihr sprach. So benutzte z. B. bereits 1906 Westphal eine fokussierende Anordnung in Form des Wehnelt-Zylinders mehr als 20 Jahre bevor die Elektronenlinsen erkannt wurden. Auch viele Einzelformen stammen aus der Zeit vor der Elektronenoptik. So wurde die „Immersionslinse“ aus Lochblenden bereits 1923 durch Lilienfeld beschrieben. Die „Einzellinse“ in ihrer konstruktiv einfachsten Form als aufgeladener Ring kommt 1924 in einer Arbeit von Jones und Tasker vor. Doch auch die Linse aus Lochelektroden gleichen Potentials, zwischen denen eine Lochelektrode auf abweichendem Potential sitzt, wird bereits vor dem Ausbau der Elektronenoptik in der Patentliteratur behandelt.

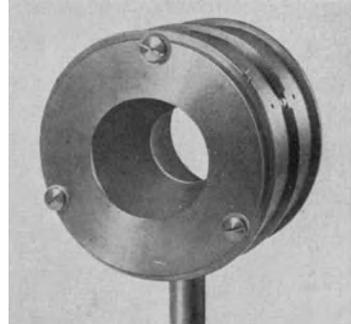
Die Elektronenoptik hat die Wirkungsweise dieser und anderer Elektrodenanordnungen verstehen gelehrt und den Impuls zu ihrem wissenschaftlichen Studium und zu ihrer technischen Durchbildung geliefert. Aus dieser Entwicklung, für die besonders die theoretischen Arbeiten von Scherzer [9], Henneberg [54] und Recknagel [77, 78] von Bedeutung waren, seien einige experimentelle Stadien im folgenden gezeigt.



1932

Erste Einzellinse nach Brüche und Johannson [5, 9].

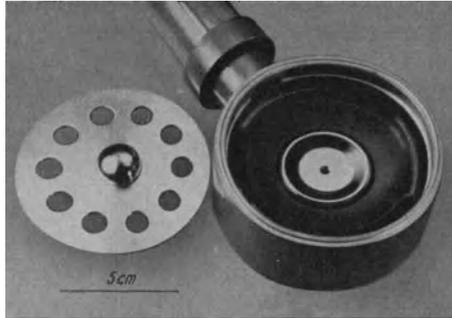
Bei der ersten Einzellinse waren die drei Elektroden flache Lochblenden in gleichem Abstand. Die Linse, deren Elektroden durch Bernsteinstifte gegeneinander isoliert gehalten wurden, wurde bis zu einigen hundert Volt Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden benutzt.



1935

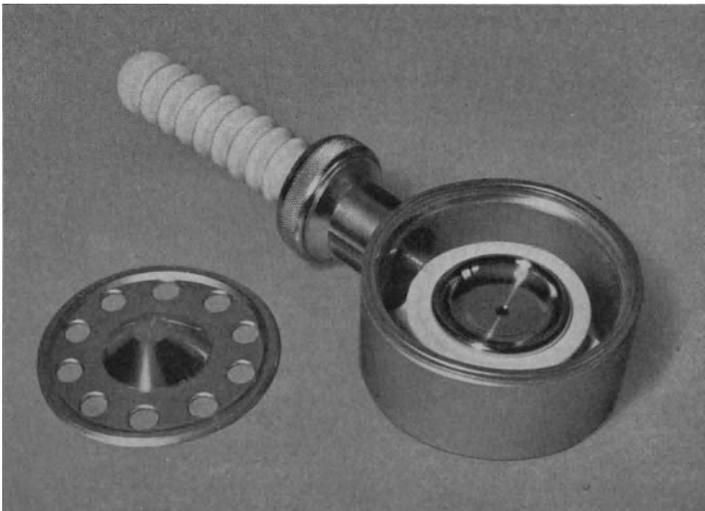
Einzellinse aus Untersuchungen nach Behne [62, 63, 69]

Bei dieser Linsenform sind die Außenelektroden als Trichter ausgebildet, die sich zur Linsenmitte öffnen. So wird eine Verringerung der Linsenfehler erreicht, wie es Messungen von Johannson gezeigt haben. Dieser Fortschritt mußte bei der folgenden Konstruktion aus Hochspannungsgründen wieder aufgegeben werden.



1939 Hochspannungs-Einzellinse,

wie sie für ältere elektrostatische Übermikroskope, so für das Abbildungs-Übermikroskop von Mahl [102, 115, 119] und in ähnlicher Form für das Schattenmikroskop von Borsch [99, 104, 114] benutzt wurde. Die Mittelelektrode ist in einem Hartgummiring eingedrückt. Durch einen seitlich herausgeführten Stift wird eine negative Spannung von 50 kV zugeführt. Der Mittelelektrode stehen beiderseitig die auf dem Potential des geerdeten Gehäuses befindlichen Gegenelektroden gegenüber (Schnitt s. S. 20).



1941 Hochspannungs-Einzellinse nach Mahl,

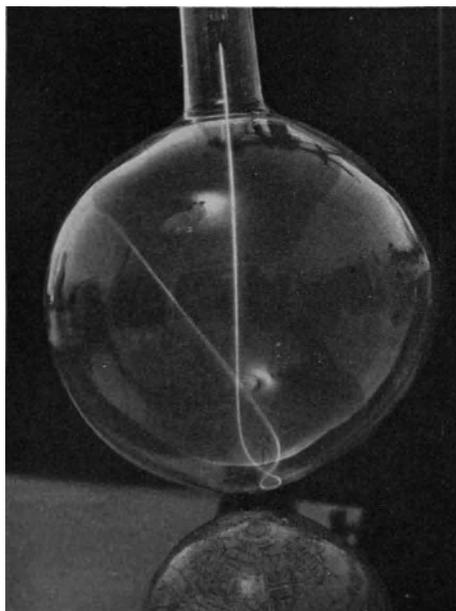
wie sie heute im elektrostatischen Übermikroskop benutzt wird. Der Hartgummiring der obigen Linse von 1939 ist durch einen Kalit-Körper in Form eines Dreifußes ersetzt. Die Mittelelektrode besteht aus zwei verschraubbaren Teilen, die einen festen Sitz in dem Kalit-Körper gewährleisten. Die Linsenelektroden können bei dieser Form leicht mit der erforderlichen Genauigkeit von $\frac{1}{100}$ mm zueinander justiert werden.

III. Aus der Entwicklung des Elektronenmikroskops.

Aus den Versuchen von 1928/31 über gaskonzentrierte Elektronenstrahlen und ihrer Anwendung zur Modelldarstellung von Störmers Polarlichttheorie entwickelte sich im AEG Forschungs-Institut die elektrische Elektronenoptik. Die Etappen dieser Entwicklung sind: Modellversuche über Elektronenbahnen in magnetischen und elektrischen Feldern — Experimentelle Untersuchungen über geometrische Elektronenoptik — Mikroskopie selbstemittierender Objekte — Übermikroskopie durchstrahlter Objekte.

Aufgabestellung 1: Modellversuche über Elektronenbahnen in magnetischen und elektrischen Feldern.

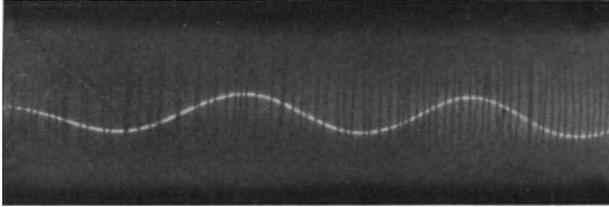
1930 „Es ist ohne weiteres einleuchtend, daß die Fadenstrahlen zur Durchführung mancher physikalisch interessanten Versuche geeignete Hilfsmittel sind. So bietet es jetzt — abgesehen von der Möglichkeit, elektrische und magnetische Ablenkbarkeit der Elektronen anschaulich zu zeigen — keine Schwierigkeit mehr, das Verhalten der Strahlen in verschieden gearteten Feldern zu untersuchen und so auf die Struktur der Felder zu schließen“. [1]*)



1929/30 Polarlichtexperiment.

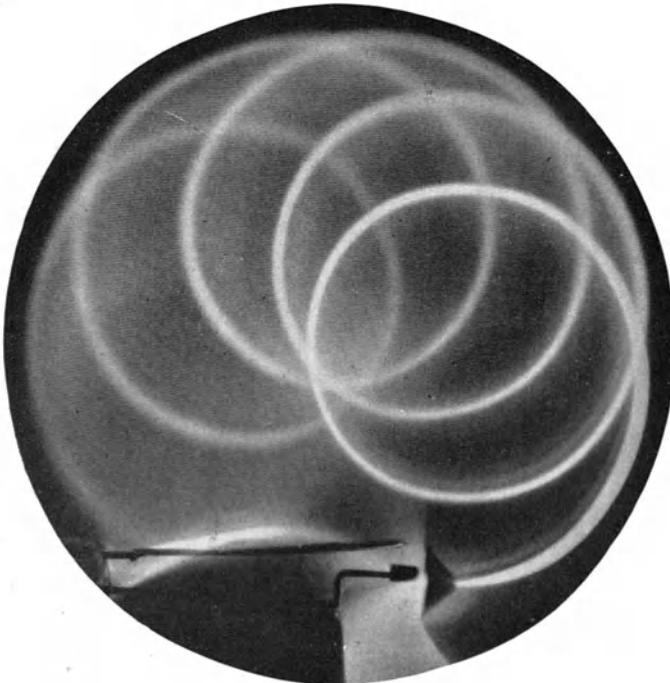
Die Elektronen wurden in das magnetische Dipolfeld der Modellerde (Terella) geschossen. Der leuchtende Elektronenstrahl zeigt die Bahn der Elektronen, die unter entsprechenden Bedingungen von der Sonne her in das Magnetfeld der Erde gelangen. Brüche und Ende [Phys. Z. 31. 1015. 1930].

*) Dieser und die folgenden Kursivtexte sind Zitate aus den angegebenen Arbeiten.



1929/30 Elektronenbewegung im homogenen Längsfeld.

Das Feld wurde von einer sehr langen Stromspule geliefert, deren Drähte sichtbar sind. Die Elektronen beschreiben Schraubenlinien (in der Projektion: Sinuslinien).
Brüche u. Ende [1].



1930 Elektronenbewegung im nahezu homogenen Querfeld.

Das Feld wurde durch eine senkrecht zur Zeichenebene stehenden Stromspule erzeugt, wie sie als magnetische Linse benutzt wird. Da die Krümmung der Elektronenbahn der Feldstärke proportional ist, zeigt die Figur, daß die Feldstärke in der Spulenmitte am stärksten ist. Bei vollständig homogenem Feld würde sich ein Kreis ergeben.
Brüche [Naturwiss. 18, 1085, 1930.]

Aufgabestellung 2: Experimentelle Elektronenoptik.

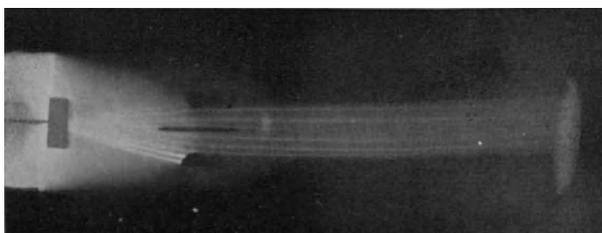
1932 „Die geometrische Elektronenoptik soll durchgebildet werden, wobei mit einer „optischen Bank“ die Abbildungsgesetze bei Elektronen studiert und demonstriert werden“. [2]



1930/31 Fokussierung und Überkreuzung von Elektronenstrahlen bei einer magnetischen Linse.

Ein gaskonzentrierter Elektronenstrahl wird unter bestimmter, wählbarer Neigung durch eine als Linse wirkende kurze Spule geschossen. Die entstehende Bahn ist bei verschiedenen Anfangsneigungen auf der gleichen Platte photographiert. So entstand obiges Bild, das die Fokussierung und Überschneidung von Elektronenbahnen demonstriert, die von einem und demselben Achsenpunkte kommend zu denken sind. Mit schwächerem Spulenstrom läßt sich auch die Parallelisierung von Elektronenbahnen zeigen.

Brüche [132].



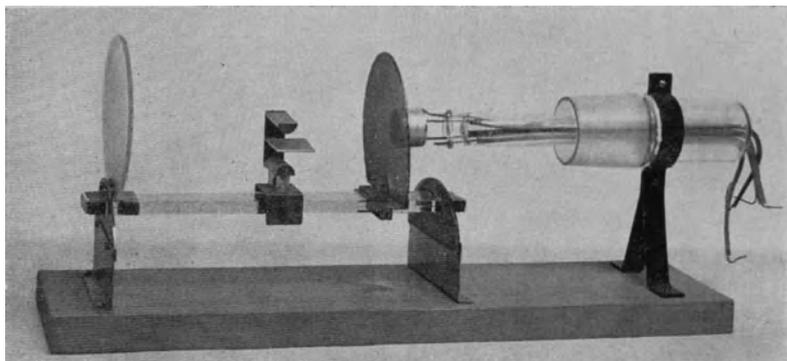
1931 Parallelisierung von Elektronenstrahlen durch eine elektrische „Linse“.

Bei diesem Versuch wird ein breites Elektronenbündel durch ein Netz in Einzelstrahlen aufgeteilt. Die Strahlen durchlaufen nun das elektrische Feld eines als Linse angesehenen Doppelkondensators, in dem sie parallelgerichtet werden. Ebenso läßt sich die Fokussierung zeigen.

Brüche und Johansson [2].

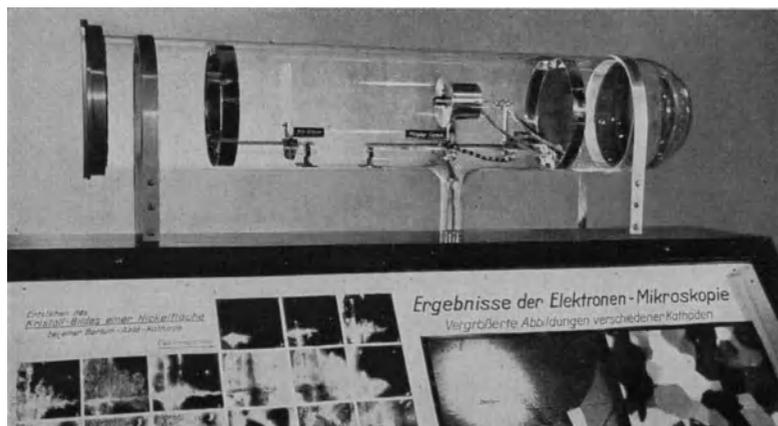
Aufgabestellung 3: Emissionsmikroskopie.

1932 „Unter Benutzung der auf diese Weise erworbenen Kenntnisse soll ein „Elektronenmikroskop“ mit sehr starker Vergrößerung gebaut werden, um mit ihm den Emissionsvorgang einer Oxydkathode zu verfolgen . . .“. [1]



1931 Erstes elektrisches Elektronenmikroskop.

Apparatur, mit der Brüche und Johansson die Abbildung eines durchstrahlten Netzes zu erzielen gedachten, wobei sie die Abbildbarkeit von Glühkathoden durch elektrostatische Linsen fanden [2, 3].



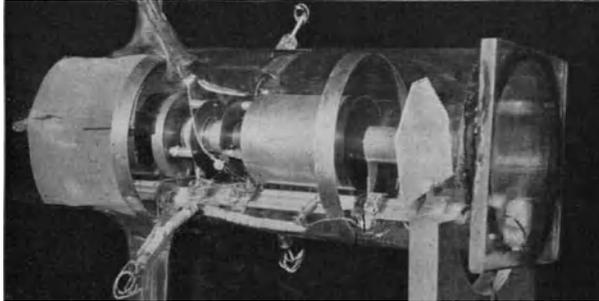
1932 Älteres elektrostatisches Emissions-Elektronenmikroskop.

Emissionsmikroskop nach Brüche und Johansson, das aus der ersten Apparatur (siehe oben) entwickelt wurde [3, 6]. Aufgestellt im Deutschen Museum. (Vgl. F. Fuchs, Deutsches Museum, Guericke-Ausstellung 1936, S. 42). Die Eigenschaften dieser als Immersionsobjektiv bezeichneten Anordnung werden in der Dissertationsarbeit von Johansson untersucht [16]

Aufgabestellung 4: Durchstrahlungs-Übermikroskopie.

1933/34 *„Bei der Weiterentwicklung der Abbildungssysteme geht die Arbeit dem fernen Ziel des „Übermikroskops“ entgegen, d. h. eines Mikroskops, das infolge der Kleinheit der Elektronenwellenlänge auch dann noch aufzulösen vermag, wenn das Lichtmikroskop längst seine prinzipielle Grenze erreicht hat“.* [13]

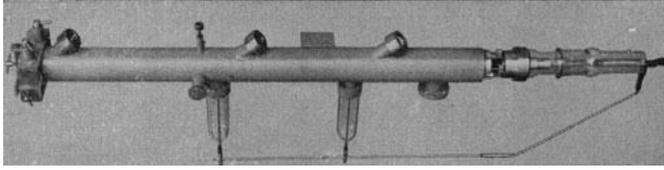
„Die Hoffnung der Elektronenmikroskopie ist es, die prinzipiellen Möglichkeiten auszunutzen, die sich bei der Verwendung der kurzwelligeren Elektronenstrahlung zur Abbildung bieten . . . Heute stehen wir am Anfang der Entwicklung des Übermikroskops“. [26]



1936 Elektrostatistisches Elektronenmikroskop.

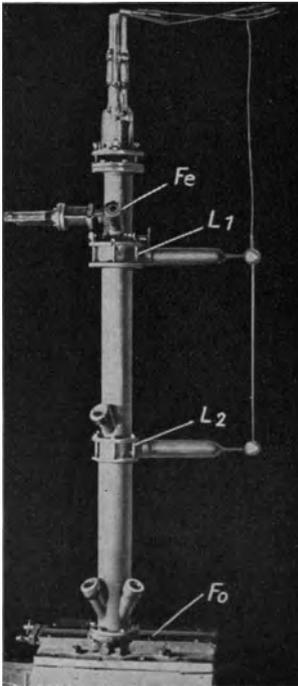
Elektrisches Immersionsobjektiv nach Behne für durchstrahlte und sekundäremittierende Objekte. Diese elektrische Linse steht in der Art ihres Potentialfeldes in der Mitte zwischen dem Immersionsobjektiv nach Brüche und Johansson und der Hochspannungseinzellinse nach Boersch und Mahl, wie sie heute als Objektiv des elektrostatistischen Abbildungs-Übermikroskops benutzt wird. Dieses Elektronenmikroskop bildet den Übergang von den Emissions- zu den Durchstrahlungs-Elektronenmikroskopen mit elektrischen Linsen. Seine Eigenschaften wurden in der Dissertation von Behne [62] geklärt.

1939 *„Während mit magnetischen Linsen seit 1932 fortlaufend Untersuchungen zur Erzielung sehr hoher Auflösung durchgeführt und veröffentlicht worden sind, ist bisher über entsprechende Versuche mit elektrischen Elektronenlinsen kaum etwas bekannt geworden. Daraus könnte der Eindruck entstehen, daß es nicht möglich sei, mit elektrischen Linsen ebenfalls die Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops . . . zu unterschreiten. In Wirklichkeit liegt natürlich kein Grund zu einer solchen Annahme vor . . . Die Aufnahme zeigt also, daß auch mit dem elektrischen Elektronenmikroskop die Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops wesentlich unterschritten werden kann“.* [103]



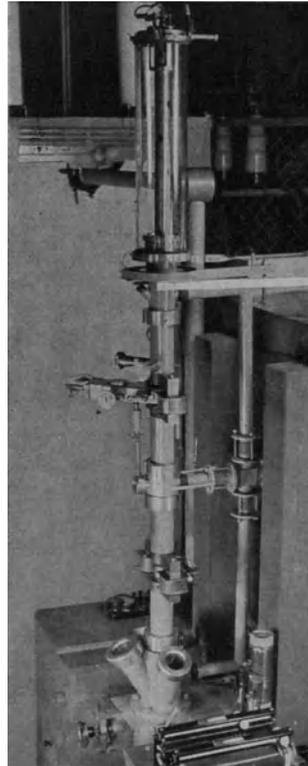
1939 Elektrostatishes Schatten-Übermikroskop.

Dieses Elektronen-Übermikroskop für durchstrahlte Objekte nach Boersch [99, 104] ist das einfachste Übermikroskop. Durch ein zweistufiges Verkleinerungssystem, das mit zwei elektrischen Linsen arbeitet, wird ein sehr feiner Überkreuzungspunkt der Elektronenstrahlen hergestellt, von dem aus das Objekt als starkvergrößerter „Schatten“ auf den Leuchtschirm projiziert wird“ [vgl. S. 86].



1939 Elektrostatishes Abbildungs-Übermikroskop

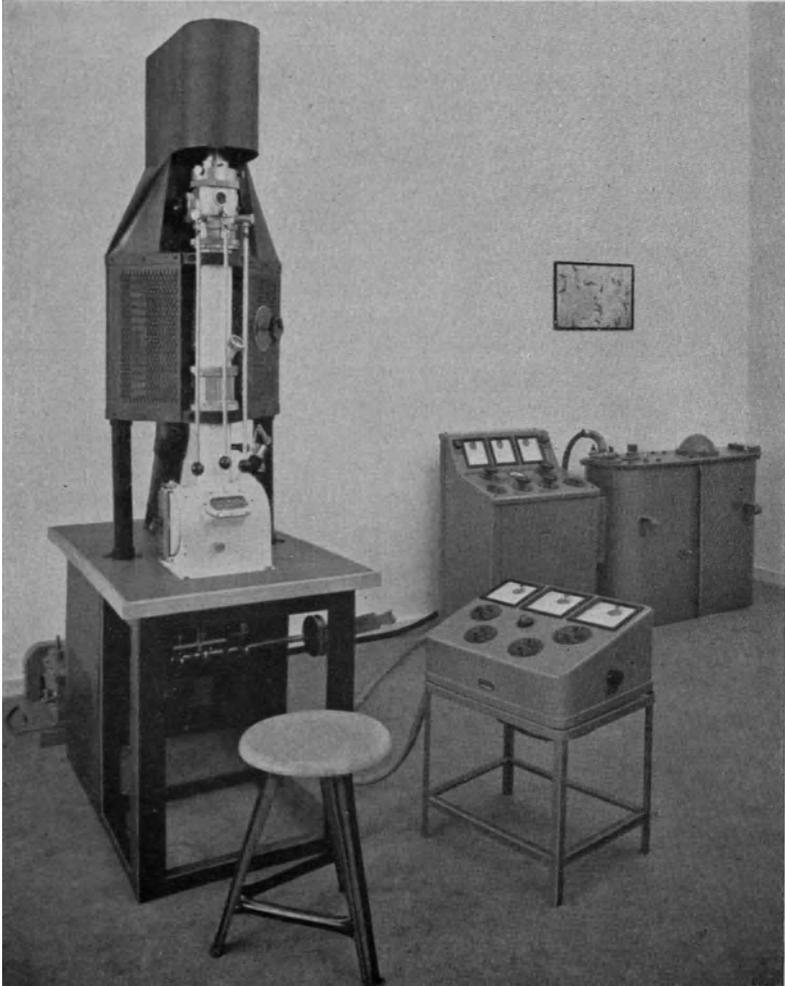
für durchstrahlte Objekte nach Mahl [98, 102]. Dieses Gerät ist das erste Übermikroskop, das mit elektrostatishes Linsen arbeitet: L_1 und L_2 Elektronenlinsen, Fe Fenster, Fo Fotografiereinrichtung.



1940 Magnetishes Abbildungs-Übermikroskop

für durchstrahlte Objekte nach Steudel, Kinder und Pendzich [112]. Erstes Elektronen-Übermikroskop für Spannungen über 100 kV. Es verwendet keine gekapselten Spulen, sondern unsere Doppeljochlinsen.

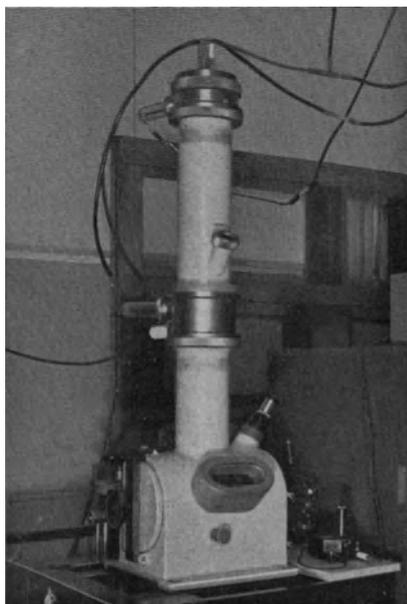
1940 „Unser Übermikroskop, das nach zehnjähriger Entwicklungsarbeit jetzt in seinem grundsätzlichen Aufbau vorliegt, benutzt nicht, wie das Übermikroskop nach Ruska, die magnetische Elektronenlinse, sondern unsere elektrostatische Abbildungsoptik. Für die Wahl des elektrostatischen Prinzips sprach die wesentlich größere Einfachheit von Konstruktion und Handhabung, gegen diese Wahl sprach die wesentlich größere Schwierigkeit der physikalischen und technischen Durchbildung“. [109]



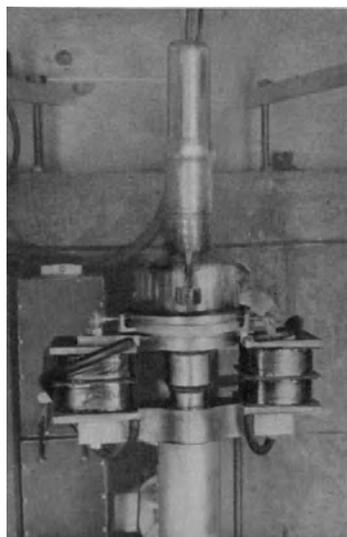
Elektrostatisches Übermikroskop (Modell 1940) mit Spannungsanlage.

Aufgabestellung 5: Emissions-Übermikroskopie.

- 1936 „Brüche und Knecht konnten an Abbildungen von Selbstleuchtern zeigen, daß $1,5 \mu$ voneinander entfernte Bariumtröpfchen auf der Kathode... noch gut getrennt werden... Eine systematische Untersuchung, wie hoch sich die Auflösung hier treiben läßt, liegt allerdings noch nicht vor“. [71]
- 1941 „Bei Anwendung einer Anodenspannung von etwa 10000 V bei dem Johannsonschen Immersionsobjektiv werden die Abbildungsfehler so klein, daß das Immersionsobjektiv zum Selbststrahlungs-Übermikroskop werden kann. Wie weit sich diese Voraussage erfüllen wird, läßt sich zur Zeit wegen der experimentellen Schwierigkeiten noch nicht sagen“. [145]
- 1942 „Das Emissions-Übermikroskop ist dem Durchstrahlungs-Übermikroskop an die Seite getreten. Damit ist auch die wissenschaftliche Streitfrage, ob es ein solches Emissions-Übermikroskop geben könne, endgültig im Sinne unserer Ansichten durch das Experiment entschieden“. [148]



1941 Elektrostatisches Abbildungs-Übermikroskop für selbstemittierende Objekte nach Mecklenburg [163].



1942 Objektiv des magnetischen Abbildungs-Übermikroskops für selbststrahlende Objekte (Emissions - Elektronenmikroskop mit Jochlinsen) nach Kinder [160].

Aus der Entwicklung des elektrischen Elektronenbildes.

Erste Bilder von 1931.

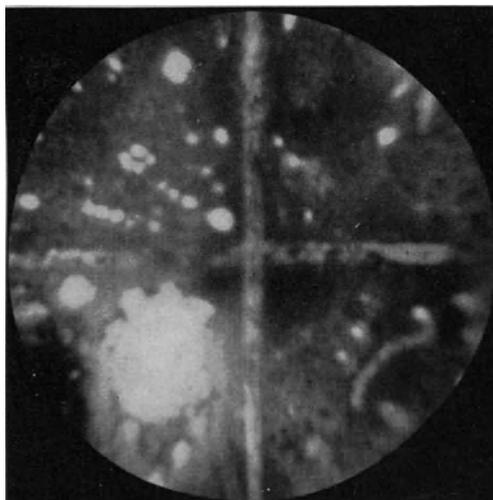


Erstes aufgenommenes Elektronenbild einer Glühkathode mit dem Schatten eines Netzes.



Elektronenbild zum Beweis der Abbildung geometrischer Strukturen.

(etwas verkleinert wiedergegeben)
Brüche und Johansson [132]



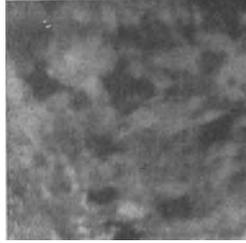
Erstes veröffentlichtes Elektronenbild einer Glühkathode, zugleich die erste veröffentlichte Aufnahme, die mit elektrischen Linsen erhalten wurde. Es ist die erste Aufnahme, die mehr als Umrisse von Blenden, Leuchtflecke und Netze zeigte. Das Bild bewies die Möglichkeit, mit der elektronenmikroskopischen Methode neue Gebiete zu erschließen. 1932 Brüche und Johansson [3].

Vergr. Original: 83fach,
Wiedergabe: 220fach.

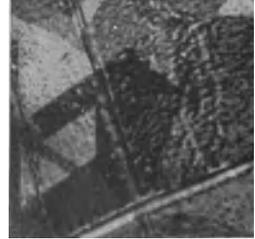
Erste elektronenoptische Oberflächenbilder.



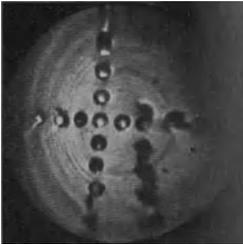
1932
Erstes Glühkathodenbild
(Oxyd cathode).
Brüche und Johansson [3].
Vergr.: 80 fach.



1932
Erstes Strukturbild
(reines Wolfram).
Brüche und Johansson [8].
Vergr.: 100 fach.



1933
Erstes Aktivierungs-Strukturbild
(Nickel).
Brüche und Johansson [13].
Vergr.: 50 fach.



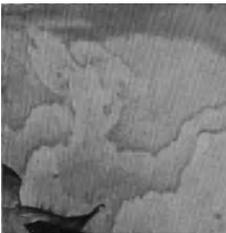
1933
Erstes Photokathodenbild mit
kurzer magnetischer Linse
(Zinkplatte mit Bohrungen).
Brüche [18]. Vergr.: 3,5 fach.



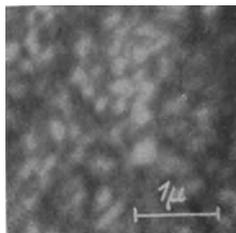
1935
Erstes Emissionsbild eines
gekrümmten Körpers
(thorierter Wolframdraht).
Mahl [57]. Vergr.: 25 fach.



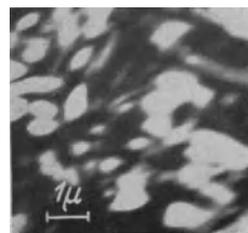
1940
Erstes Abdruckbild, gleich-
zeitig erstes übermikroskop.
Oberflächenbild (Aluminium).
Mahl [119]. Vergr.: 21 000 fach.



1940
Erstes übermikroskopisches
Lackabdruckbild
(Steinsalz).
Mahl. Vergr.: 2000 fach.



1941
Erstes übermikroskopisches
Emissionsbild mit elektr. Linse
(Oxyd cathode).
Medlenburg [148]. 10 000 fach.

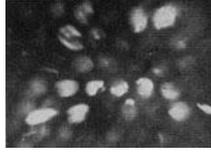


1942
Erstes übermikroskopisches
Emissionsbild mit magn. Linse
(thoriertes Molybdän).
Kinder [160]. Vergr.: 6000 fach.

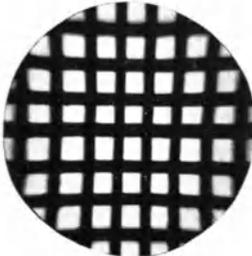
Erste elektronenoptische Durchstrahlungsbilder.



„Abbildung“ eines Netzes, die unter Mitwirkung von Gas-konzentration zustande kam. Engel [5].
(Erst 1932 veröffentlicht.)



Erste Folienabbildung. Zerrissene Goldfolie auf einer Wabenplatte (Lenardfenster). 35 keV-Elektronen. Brüche und Johansson [8]. Vergr.: 2 u. 9 fach.
(Die Bilder wurden September 1932 auf der Physikertagung im Diapositiv gezeigt. In der Veröffentlichung des Tagungsvortrages [8] wurde auf sie hingewiesen. Sie wurden 1933 auch im Druck wiedergegeben [13].)



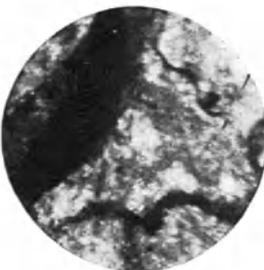
1932
Erstes Umrißbild mit elektr. Einzellinse (Drahtnetz). Johansson u. Scherzer [9]. Vergr.: 27fach.



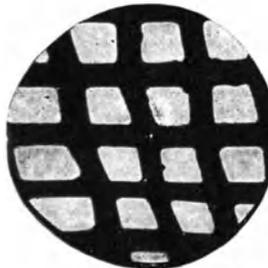
1936
Erstes Umrißbild mit elektr. Immersionsobjektiv (zerrissene Folie). Behne [62]. Vergr.: 60fach.



1935
Erstes Halbtonbild mit elektrischer Linse (verbrannte Folie). Behne [63]. Vergr.: 150 fach.



1936
Erste Dunkelfeldabbildung (zerrissene Goldfolie) 30 keV-Elektronen. Boersch [65]. Vergr.: 16 fach.



1936
Erstes Umrißbild mit einem Elektronenspiegel (Drahtnetz). Hottenroth [70]. Vergr.: 80fach.



1938
Erste übermikroskopische Aufnahme mit elektrostatischen Linsen (Ruß). Mahl [148]. Vergr.: 4000 fach.



Gutes Emissions-Oberflächenbild bei kleiner Vergrößerung.
Fotokathode mit aufprojiziertem Bild.
1936 Brüche u. Komitsch [75]. Elektr. Aufn. Vergr.: etwa 5 fach.



Gutes Emissions-Oberflächenbild.
Glühendes Molybdän.

1941 Mahl [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 550 fach.

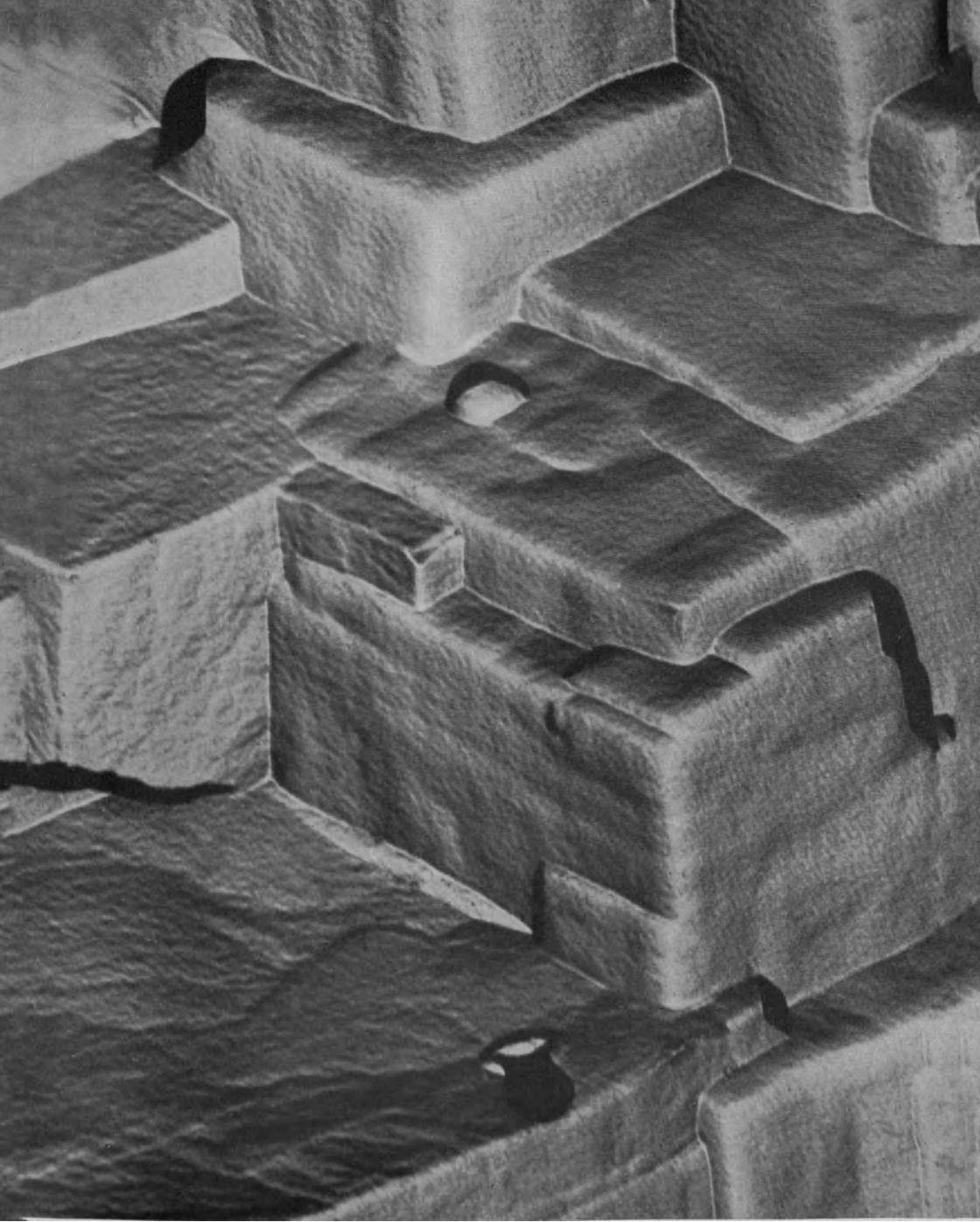


Gutes Durchstrahlungsbild.
Bakterium Novy.

1941 Jakob u. Mahl.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 6300 fach.



Gutes übermikroskopisches Oberflächenbild.

Geätztes Hydronalium.

1941 Mahl [136].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 38 000 fach.

Das Elektronenmikroskop ein deutsches Forschungsergebnis.

Das AEG Forschungs-Institut über die Arbeit der Technischen Hochschule Berlin (E. Brüche u. H. Johannson, Naturwiss. 20, 354, 1932):

„Zwei Wege führen zu dem Ziel, ein Elektronenmikroskop zu bauen entsprechend den beiden Möglichkeiten, eine Elektronenlinse auf magnetischem und elektrischem Wege herzustellen. Die beiden Wege sind gleichzeitig und unabhängig von Knoll und Ruska einerseits (magnetisches Mikroskop), von den Verfassern andererseits (elektrisches Mikroskop)* beschritten worden“.*

Das Hochspannungslaboratorium der Technischen Hochschule Berlin (Vorstand: A. Matthias) über die Arbeit des AEG Forschungs-Instituts (E. Ruska, ZS. f. Phys. 89, 90, 1934):

„Das Gegenstück zu diesem magnetischen Mikroskop wurde davon unabhängig zu gleicher Zeit von Brüche und Johannson entwickelt, die das elektrische Feld zwischen ringförmigen, den Strahl koaxial umgebenden Elektroden als Linse für die Kathodenstrahlen benutzten (elektrisches Mikroskop)“.

Das Ausland über die ältere Entwicklung der Elektronenoptik (L. M. Myers in dem Vorwort des englischen Hauptwerks über Elektronenoptik: Electron Optics, Chapman & Hall Ltd., London 1939, 618 Seiten)**.

„Zweifelloos wurde in den letzten Jahren der größte Teil der experimentellen und theoretischen Arbeiten ... in Berlin ... durchgeführt“.

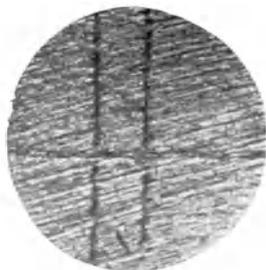
* Die Klammern werden, um Mißverständnisse des aus dem Zusammenhang gerissenen Satzes zu vermeiden, beim Abdruck zugesetzt.

** Without doubt the greatest porportion of experimental and theoretical work during the last few years has been carried out at the A.E.G. Forschungs-Institut in Berlin, under the supervision of Dr. Brüche.

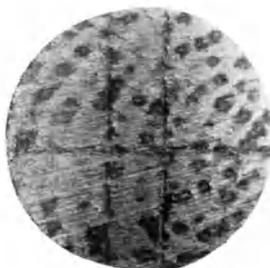
IV. Emissionsmikroskopische Bilder.

Mit der Erkenntnis der Elektronenlinse durch Busch war die geometrische Elektronenoptik erschlossen. Jedem Physiker war es nun möglich, die aus der Optik gewohnten Überlegungen und Konstruktionen, wie Mikroskop, Fernrohr und Spektralapparat, auf das Gebiet der Elektronen zu übertragen. Dabei schien insbesondere die Verwirklichung des Elektronenmikroskops erstrebenswert, denn das Elektronenmikroskop würde in zwei dem Lichtmikroskop unzulängliche, neue Welten, zu den elektronenemittierenden und der sublichtmikroskopischen Objekten führen können.

Der Lösung der elektronenmikroskopischen Aufgaben dienen das Emissions- oder Selbststrahlungs-Mikroskop und das Durchstrahlungs-Mikroskop. Beide Mikroskoptypen, von denen es verschiedenartige Einzelformen gibt, können höhere Auflösungen erreichen, als sie mit dem Lichtmikroskop möglich sind.



Lichtmikroskopisches Bild. Es zeigt die geometrische Struktur.



Elektronenmikroskopisches Bild. Es zeigt außerdem die Emissionseigenarten.

Das Emissionsmikroskop zeigt die Elektronen emittierenden Stellen von Kathoden (z. B. bei Verstärkerröhren) und erlaubt es, Emissionserscheinungen in ihrem zeitlichen Ablauf zu studieren. Eine spezielle Anwendung dieses Prinzips ist die Abbildung von Metallgefügen, insbesondere im Glühzustand, die Beobachtung von Umkristallisationen usw. Es ergibt damit im allgemeinen bereits bei geringen Vergrößerungen Bilder, die man mit dem Lichtmikroskop nicht zu erhalten vermag. Als Emissions-Übermikroskop zeigt es in doppelter Weise Neues.

Die Aufnahmen der folgenden Seiten sind mit fünf unterschiedlichen elektronenoptischen Vergrößerungssystemen aufgenommen worden, und zwar mittels folgender Emissionsmikroskope:

Elektrisches Immersionsobjektiv (System aus Lochblenden), 1932, Brüche u. Johansson [2, 3].

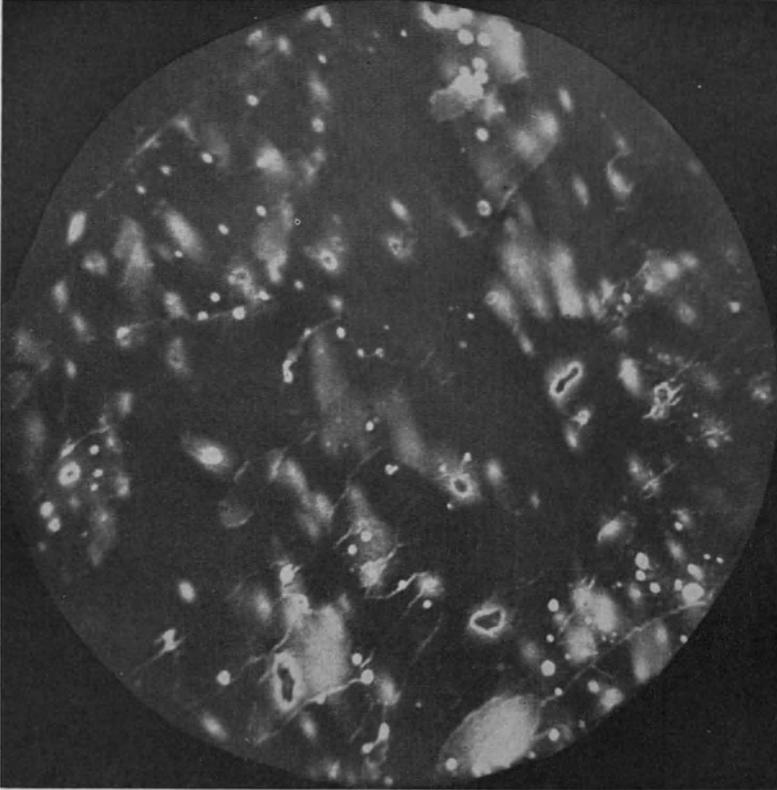
Magnetisches Emissionsmikroskop nach Knoll, Houtermans und Schulze (kombiniert mit Immersionsobjektiv und Lichtmikroskop), 1933, Johansson und Knecht [17, 24].

Elektrostatisches Zweipolssystem (gewölbte Fläche und Zylinder), 1935, Schaffernicht [58].

Elektrisches Emissions-Übermikroskop, 1942, Mecklenburg [148].

Magnetisches Emissions-Übermikroskop, 1942, Kinder [160].

Kathodenforschung: Glühkathode.



Typisches Elektronenbild des Emissionsmikroskops.

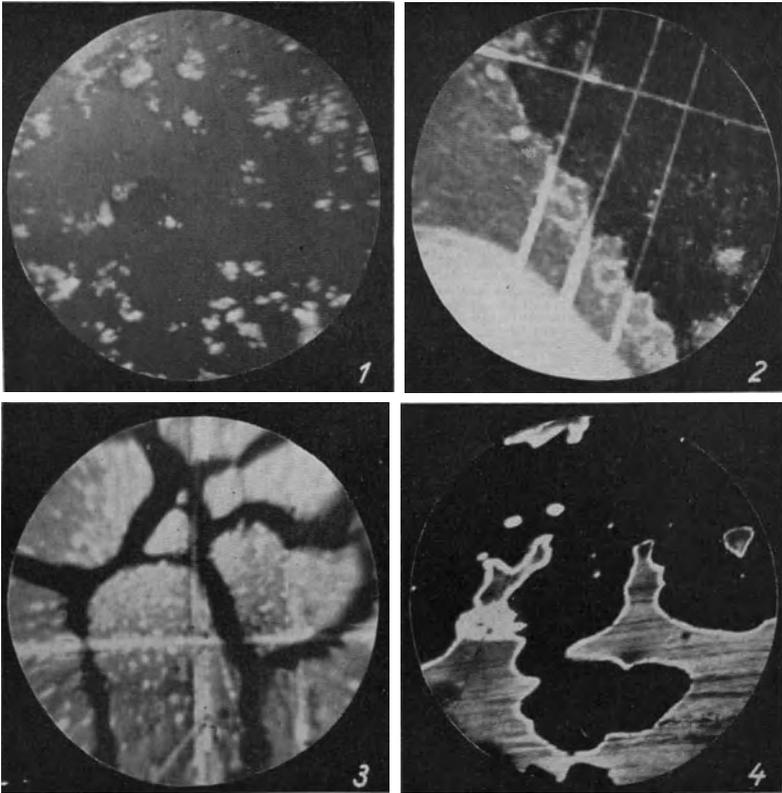
Das Elektronenmikroskop eröffnet neue Welten, deren Kenntnis uns das Lichtmikroskop nicht zu vermitteln vermag. Diese Tatsache gilt für das Emissionsmikroskop in noch überzeugenderer Weise als für das Durchstrahlungs-Übermikroskop. Denn während es bei letzterem immer noch dieselben Objekte sind, deren Kenntnis durch das Elektronenmikroskop in ähnlicher Weise, aber in stärkerem Maße erweitert wird, wie z. B. durch das Ultraviolettmikroskop, führt das Emissionsmikroskop in ein jungfräuliches Forschungsgebiet, in die bildmäßige Verfolgung der Emissionsvorgänge, und eröffnet damit gleichzeitig viele, gänzlich neuartige Möglichkeiten der Anwendung. So hatte man z. B., bevor das Elektronenmikroskop vorhanden war, keine Vorstellung davon, wie eine glühende Kathode von thoriertem Wolfram Elektronen aussendet, während obiges Bild nun erstens zeigt, daß sich Emissionsinseln gebildet haben, zweitens, wo die aktiven Bezirke liegen, und drittens, daß bei dieser Kathode im vorliegenden Aktivierungszustand große und kräftige scharfbegrenzte Emissionsstellen vorhanden sind. Das Bild zeigt ferner, daß die Korngrenzen für die Emission eine besondere Rolle spielen.

1936 Mahl [79].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 90 fach.

Kathodenforschung: Glühkathode.



Typen von Glühkathodenbildern.

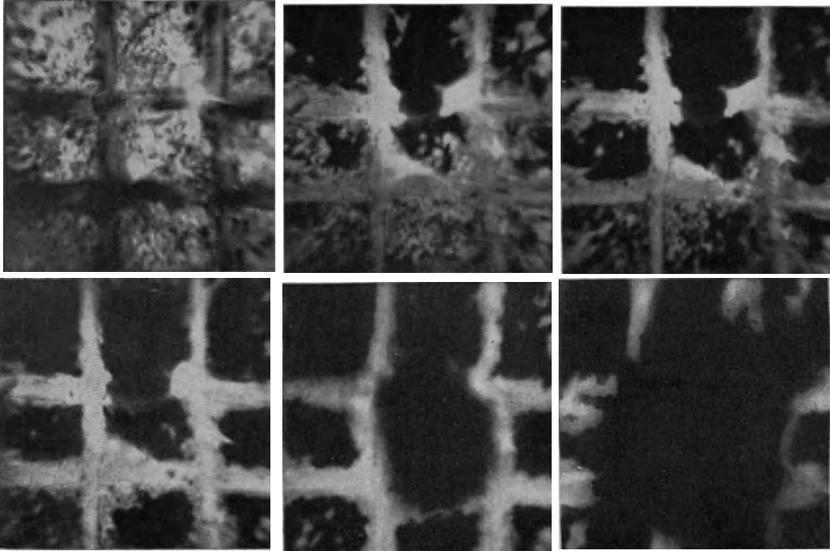
Die erste Frage, die sich dem Elektronenmikroskopiker aufdrängte, war die Frage nach den Unterschieden im Elektronenbild der wichtigsten technischen Glühkathoden, wie sie in den Verstärkerröhren der Rundfunkapparate, in den Senderöhren der Rundfunksender, in den Braunschen Röhren usw. als Elektronenquelle benutzt werden. In unseren Bildern sind vier typische Kathodenbilder zusammengestellt, die die Verschiedenartigkeit von Glüh-elektronenbildern erkennen lassen. Bilder 1 und 2 geben Oxydkathoden wieder, Bild 3 zeigt eine Aufdampfkathode, Bild 4 eine von ungereinigtem thoriierten Wolfram ab-brennende Emissionsschicht. Beide Oxydkathodenbilder stammen von technisch unbrauch-baren Kathoden. Bei ersterer sind nur noch wenige grobe Oxydbrocken vorhanden, bei letzterer ist die Schicht teilweise fein und zusammenhängend, aber — vermullich infolge von Sauerstoffadsorption — teilweise inaktiv. Gleichmäßiger ist die aufgedampfte Schicht, die nur Störungen der aktiven Gebiete an den Korngrenzen der Kristallite aufweist. Bei dem letzten Bild ähnelt die Emissionsschicht in ihrem Verhalten einer benetzenden Flüssigkeit.

1932/36 Johansson, Knecht, Mahl.

Elektr./Magnet. Aufn.

Vergr.: 30—70 fach.

Kathodenforschung: Oxydkathode.



Zerstörung einer Oxydkathode.

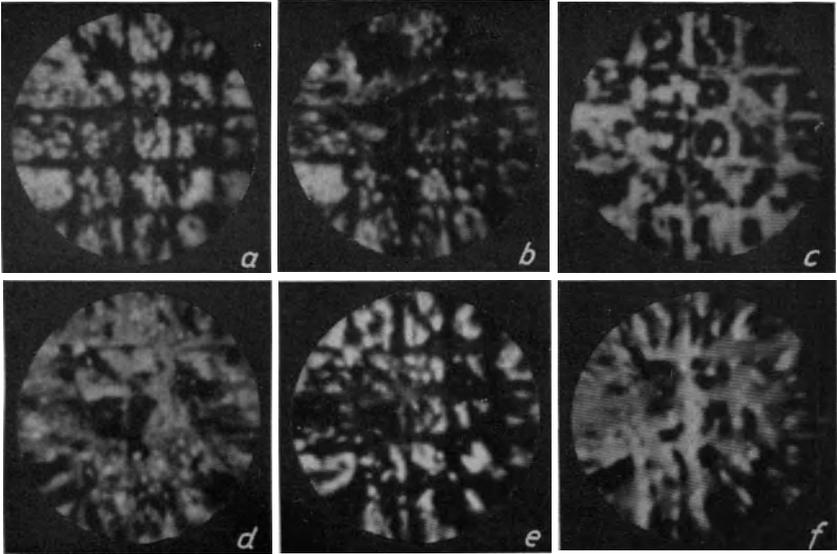
Eine mit Bariumpaste bestrichene Nickelkathode, auf die dann einige Striche eingekratzt worden waren, wurde geglüht. Dabei dampfte das durch Zersetzen des Oxyds befreite Barium zu dem freigelegten Metall, auf dem es sich auch bei dem weiteren Glühen der Kathode am längsten hielt. Allmählich wurde alles Bariumoxyd reduziert und in entsprechendem Maße verschwanden die Oxydkörner. Während des weiteren Glühens verdampfte nun auch das Barium aus den Kratzern mehr und mehr, bis die Kathode beim letzten Bild kaum mehr emittierte. Die Kathode war „ausgebrannt“. — Die obigen Bilder geben die erste Versuchsreihe wieder, die mit einem Elektronenmikroskop aufgenommen wurde. Bei dieser Untersuchung zeigte sich zum ersten Mal die Bedeutung der Elektronenmikroskopie zum Studium von Vorgängen auf Kathoden.

1932 Brüche und Johannson [3].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 65 fach.

Kathodenforschung: Oxydkathode.



Bildumkehr bei Pastekathoden.

Bereits bei den ersten elektronenmikroskopischen Untersuchungen von Oxydkathoden, bei denen einzelne Stellen blankgekratzt waren, zeigte sich folgende Erscheinung: Während zunächst diejenigen Stellen emittierten, auf die die Oxydpaste aufgetragen war (Bild a), stellte sich nach einiger Zeit der Bildeindruck ins Gegenteil um: Jetzt emittierten die freigekehrten Metallflächenteile der Unterlage, während die Oxydschicht keine Elektronen aussandte (Bild c). Diese „Bildumkehr“, die wieder rückgängig werden (Bild e) und sich mehrfach wiederholen kann (Bild f), ist durch das Überdampfen des reduzierten Bariums von der Paste zu den freien Metallflächen zu deuten. Die Wiederherstellung des Ausgangsbildes kommt durch Abdampfen des Bariums von den blanken Metallteilen und durch neue Reduktion des Bariumoxyds zu metallischem Barium zustande.

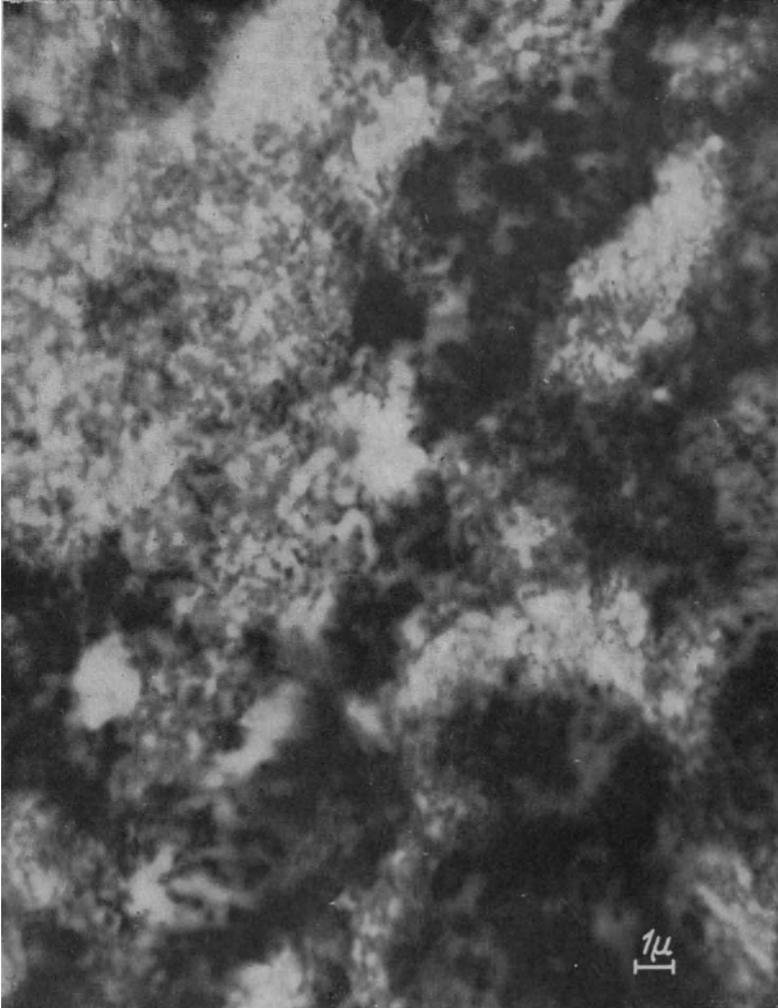
1932 Brüche und Johansson [6].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 57 fach.

Über solche und manche andere für den Emissionsfachmann interessante Erscheinungen liegen gefilmte Beobachtungen vor [6, 55, 60, 67], die von der Reichsstelle für den Unterrichtsfilm 1938 zu einem Lehrfilm verarbeitet wurden. [Vgl. Veröffentlichungen der Reichsstelle für den Unterrichtsfilm zu dem Hochschulfilm Nr C 313/1939.]

Kathodenforschung: Oxydkathode.



Einbrennen einer Oxydkathode.

Die obige Aufnahme, die in fast 100 mal so hoher Vergrößerung wie die vorhergehenden Bilder mit dem Emissions-Übermikroskop aufgenommen wurde, läßt erkennen, daß die Emission von vielen kleinen Zentren ausgeht, die teilweise einen Durchmesser von weniger als 50 μ haben. Einzelne Emissionszentren der indirekt geheizten Barium-Strontium-Kathode haben sich zu Glühinseln zusammengeschlossen und bilden Gebiete mit vorgelegter starker Raumladung. Bei anderer Einstellung des Elektronenmikroskops gelingt es, die Wirkung dieser zusätzlichen Elektronenlinse zu berücksichtigen und so die einzelnen Emissionszentren unter der Raumladungswolke scharf abzubilden.

1942 Mecklenburg.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 5000 fach.

Kathodenforschung: Thoriertes Wolfram.



Anheizen eines thorierten Wolframbandes.

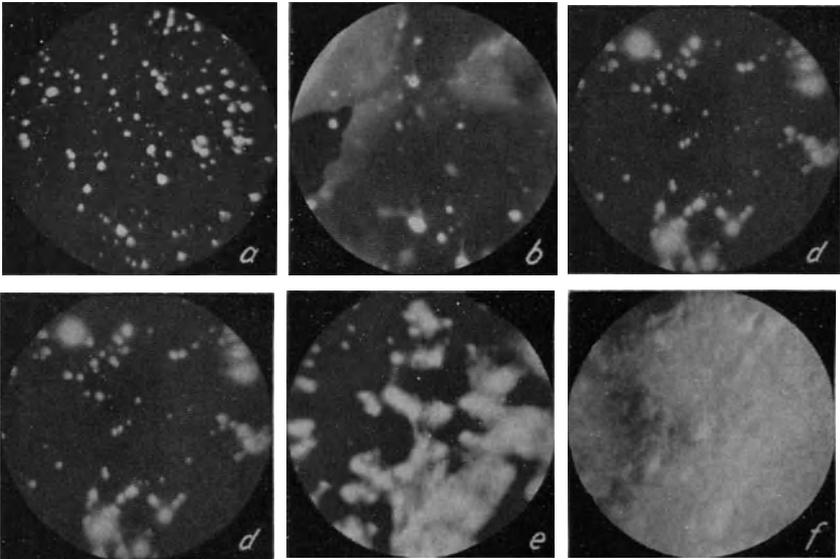
Gelegentlich ist es gar nicht erforderlich, auf Kathoden eine besondere aktive Schicht künstlich aufzubringen. Die Kathode sendet bereits bei relativ tiefer Temperatur Elektronen aus, da die „Schmutzschichten“ auf der Metalloberfläche bereits aktiv sind. Ein solcher Fall liegt bei dem oben gezeigten Band von thoriertem Wolfram vor, das noch nicht reduziert ist, d. h., bei dem das Thoroxyd noch im Wolfram eingeschlossen ruht. Trotzdem sendet die Kathode in großen Gebieten Elektronen aus, die von sehr stark emittierenden Grenzen scharf umrandet sind. Die Gebiete verengern sich schnell, und wenige Minuten, ja Sekunden, nach dem Anheizen ist diese Erscheinung für immer verschwunden. Die Kathode ist gleichsam „gereinigt“. Man hat die Erscheinung als Abdampfen aktiver, aber unbeständiger, dicker Schichten gedeutet und hat vermutet, daß ihr Rand darum verstärkt emittiert, weil dort gerade die Schicht „monoatomar“ ist [55].

1935 Mahl [148]

Magnet. Aufn.

Vergr.: 50 fach.

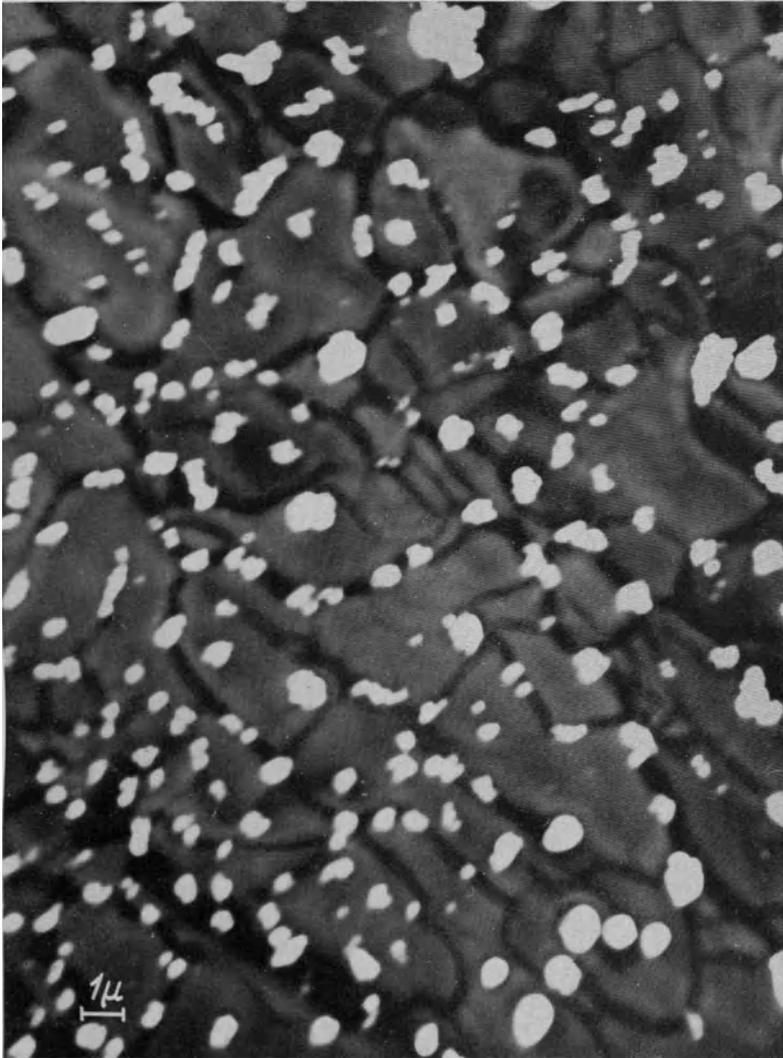
Kathodenforschung: Thoriertes Wolfram.



Aktivierung.

Nach Langmuirs Anschauung sollte das Thorium, das dem Wolfram bei Herstellungsprozeß beigemischt wird, aus dem Wolfram beim Glühen „herausdiffundieren“ und die Oberfläche mit einer monoatomaren aktiven Schicht überziehen. Das Elektronenmikroskop zeigte, daß sich nach der Reduktion einzelne Emissionszentren ausbilden (Bild a), von denen aus dann die Aktivierung der Oberfläche, d. h. das Überziehen der Oberfläche mit aktivem Thor, erfolgt (Bilder a, d, e, f). Ferner lehrt das Elektronenmikroskop, daß außer den Austrittsstellen des Thors auch die kristalline Struktur des Wolframs zu zeigen vermag, daß das Thor mitten aus den Kristalliten durch feinste Poren hervorbricht (Bilder b, c).
1935 Brüche und Mahl [55]. Magnet. Aufn. Vergr.: 24 fach.

Kathodenforschung: Thoriertes Wolfram.



Emissionszentren.

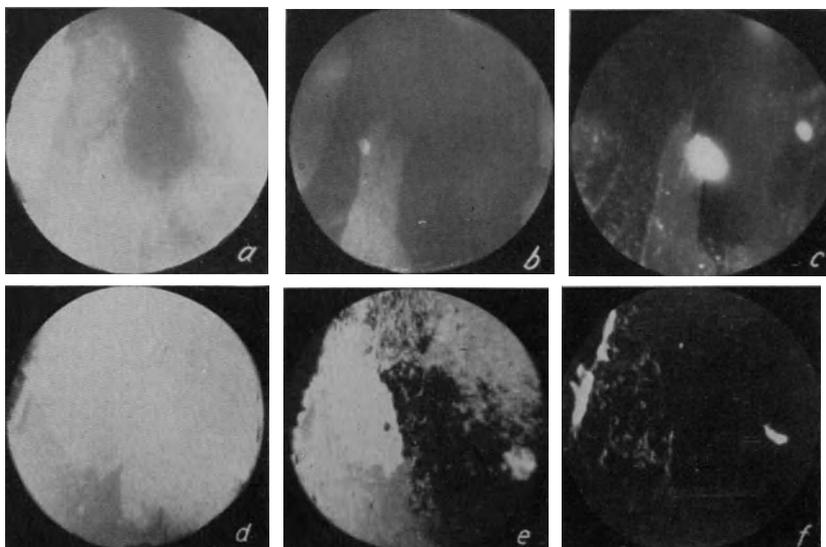
Die Aufnahme zeigt die Emissionszentren in mehr als 200 mal so hoher Vergrößerung als die Bilder der Gegenseite. Auch diese Aufnahme, die viele Emissionszentren weit unter $\frac{1}{1000}$ mm Durchmesser aufweist, bestätigt den Befund bei geringer Vergrößerung (siehe Gegenseite), daß auch bei äußerst fein kristallinem Gefüge der Austritt des Thoriums auf den Kristallflächen ebenso häufig wie an den Korngrenzen erfolgt.

1942 Kinder.

Magnet. Aufn.

Vergr.: 5000 fach.

Kathodenforschung: Thoriertes Wolfram.



Zerstörung der aktiven Schicht bei thoriertem Wolfram.

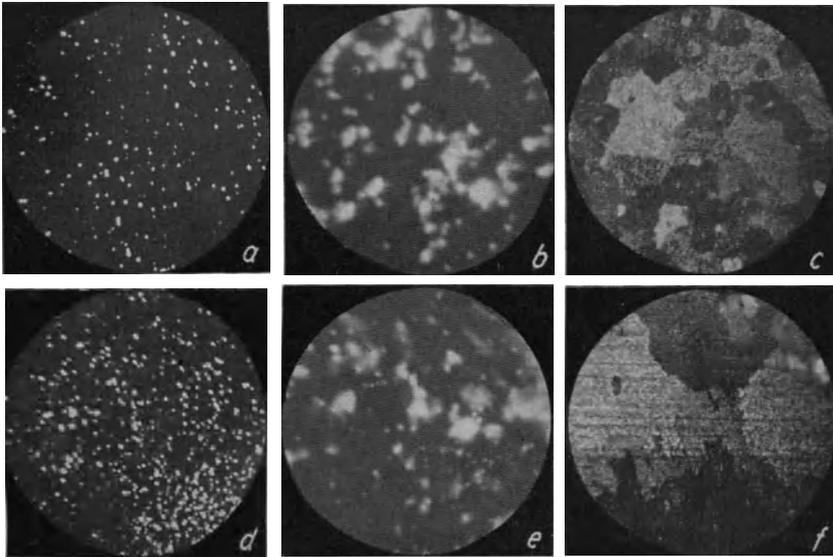
Die beiden Bildreihen zeigen zwei Beispiele für die Entaktivierung einer aktivierten Thorium-Wolfram-Kathode (vgl. Gegenseite, insbesondere Bild f). Bei der oberen Reihe wurde die Kathode sehr stark geheizt, so daß die Zerstörung der Emissionsschicht durch Abdampfen des Thoriums stattfand. Bei der unteren Bildreihe wurde etwas Sauerstoff in das Versuchsrohr eingelassen, der sich an das Thorium anlagerte und auf diese Weise die Emission der Kathode herabsetzte. Bei beiden Versuchsreihen zeigt sich, daß der Entaktivierungsvorgang, d. h. das Abdampfen bzw. die Sauerstoffadsorption, von der Schnittrichtung der Kristallite abhängig ist.

1936 Mahl [73].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 25 fach.

Kathodenforschung: Thoriertes Wolfram.



Nach der Reduktion

Beginnende Thorausbreitung

Strukturbild

Thoriertes Wolfram und thoriertes Molybdän.

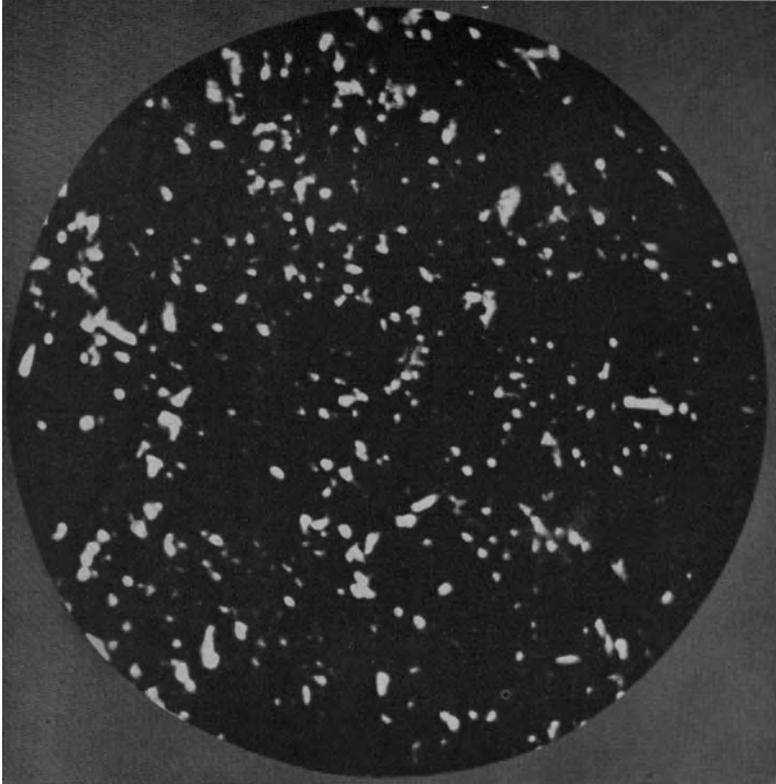
Es ist eine auch technisch interessante Frage, ob die Emissionsbilder von thoriertem Wolfram und thoriertem Molybdän wesentliche Unterschiede aufweisen. Nach der Stellung von Wolfram und Molybdän in der gleichen Gruppe des periodischen Systems und nach dem allgemeinen physikalischen Verhalten liegt es nahe, gleichartige Emissionsbilder in entsprechenden Temperaturbereichen anzunehmen. Das Elektronenmikroskop bestätigt eindeutig diese Vermutung, wie es die obigen Bilder zeigen, deren obere thoriertes Molybdän, deren untere thoriertes Wolfram in entsprechenden Aktivierungsphasen zeigen.

1936 Brüche und Mahl [67].

Magnet. Aufn.

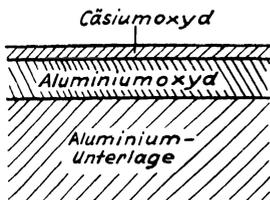
Vergr.: 25 fach.

Kathodenforschung: Malter-Kathode.



Emissionsverteilung bei einer Malterschicht.

1936 wurde von Malter eine eigenartige Emissionserscheinung gefunden: Bestrahlt man eine oxydierte Aluminiumfläche, die mit Cäsiumoxyd bedeckt ist, mit Elektronen, so kann die Kathode bis zu 1000mal mehr Elektronen aussenden, als auf sie auftreffen. Dieser schließlich sehr starke Strom klingt nach Aufhören der Bestrahlung langsam ab. Zur Erklärung dieser Erscheinung nimmt Malter an, daß sich die Cäsiumoxydfläche, die vom Aluminium durch eine schlecht leitende Oxydschicht getrennt ist, bei Elektronenbestrahlung zunächst durch Aussenden von Sekundärelektronen positiv aufladet. Wegen der geringen Dicke der Oxydschicht entsteht ein hohes Feld zwischen der Cäsiumoxydoberfläche und der Aluminiumunterlage, das zu einem Ausbruch von Elektronen aus dem Aluminium führen kann. Das Elektronenmikroskop zeigt,



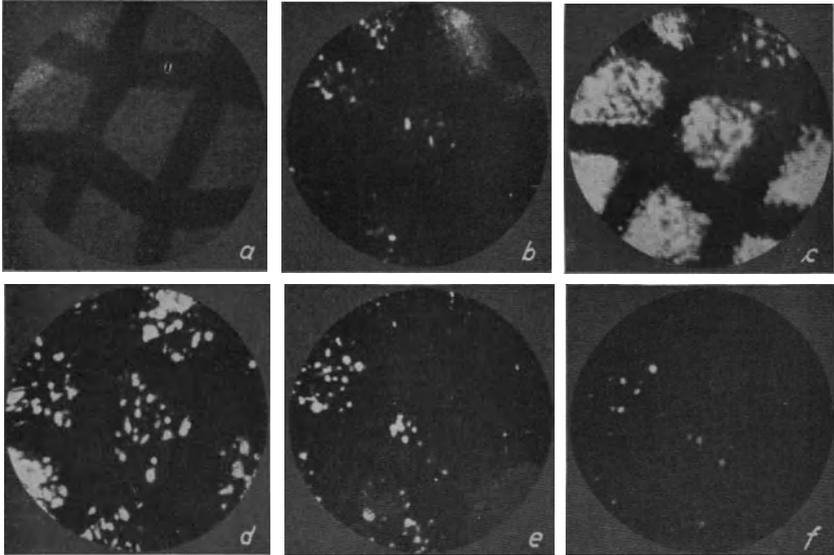
daß diese Ausbrüche von Feldelektronen aus vielen über die Kathode verteilten Emissionszentren erfolgen. Diese Zentren flackern auf und erlöschen wieder, um dann an einer anderen Kathodenstelle wieder aufzutauhen.

1937 Mahl [82].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 18 fach.

Kathodenforschung: Malter-Kathode.



Auf- und Abbau der Emission beim Maltereffekt.

Obere Reihe Aufbau: 0, 10 u. 60 Sekunden nach Beginn der Elektronenbestrahlung.

Untere Reihe Abbau: 10, 60 u. 180 Sekunden nach Aufhören der Elektronenbestrahlung.

Das Elektronenmikroskop läßt den Aufbau (obere Reihe) und den Abbau des Maltereffektes (untere Reihe) verfolgen. Das erste Bild zeigt die anfänglich schwache gleichmäßige Sekundäremission, die mit der Elektronenbestrahlung beginnt. Zehn Sekunden nach Beginn der Elektronenbestrahlung sind die ersten Elektronenausbrüche aus der Malterkathode deutlich erkennbar. Nach 60 Sekunden sind die Ausbrüche so zahlreich, daß die bestrahlten Flächenbezirke fast gleichmäßig emittieren. Entsprechend klingt nach Aufhören der primären Elektronenstrahlung die Feldemission langsam wieder ab.

1937 Mahl [86].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 6 fach.

Kathodenforschung: Fotokathode.

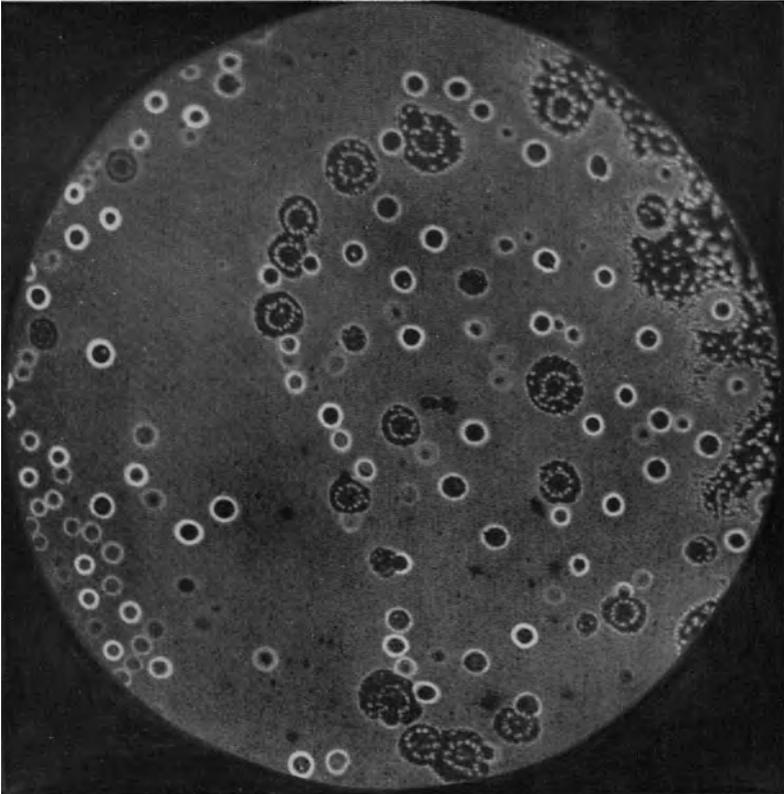


Bild einer fehlerhaften lichtelektrischen Schicht.

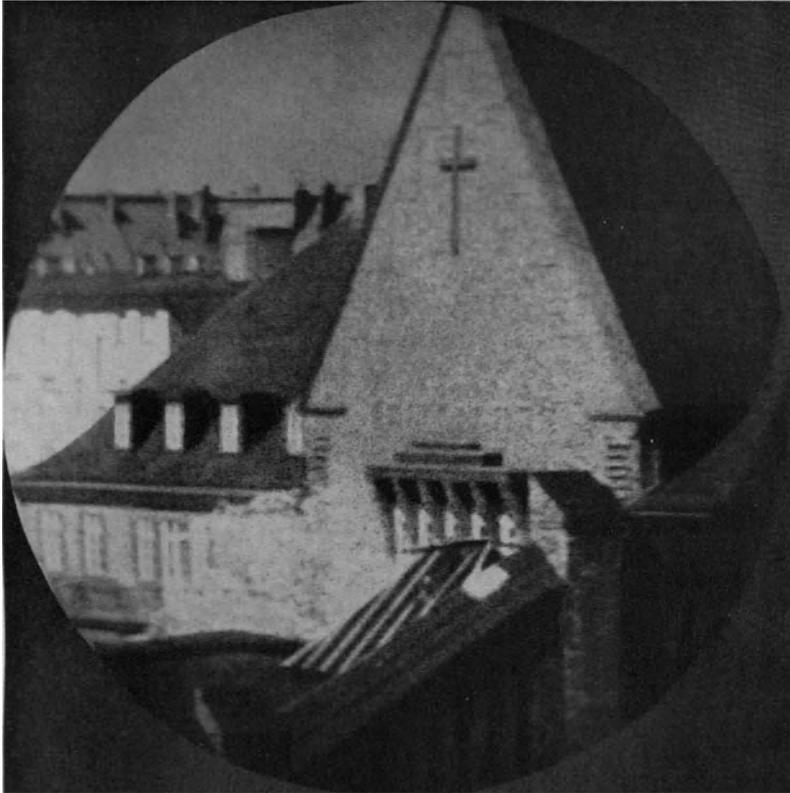
Lichtelektrische Schichten, wie sie z. B. bei Fotozellen verwendet werden, sollen überall möglichst viele Elektronen bei einer geringen auftreffenden Lichtmenge abgeben. Sie sollen daher auch strukturlos sein. Die Schicht, von der das oben wiedergegebene Elektronenbild erhalten wurde, erfüllt diese Bedingung nicht, denn es haben sich verschiedene Störungsbezirke ausgebildet. Die Kathode ist daher insbesondere für alle Anwendungen (s. Gegenseite) unbrauchbar, bei denen Strukturlosigkeit der Schicht Voraussetzung ist.

1935 Schaffernicht [136].

Elektr. Aufn.

Vergr.: etwa 3 fach.

Kathodenforschung: Fotokathode.



Infrarotbild eines Hauses.

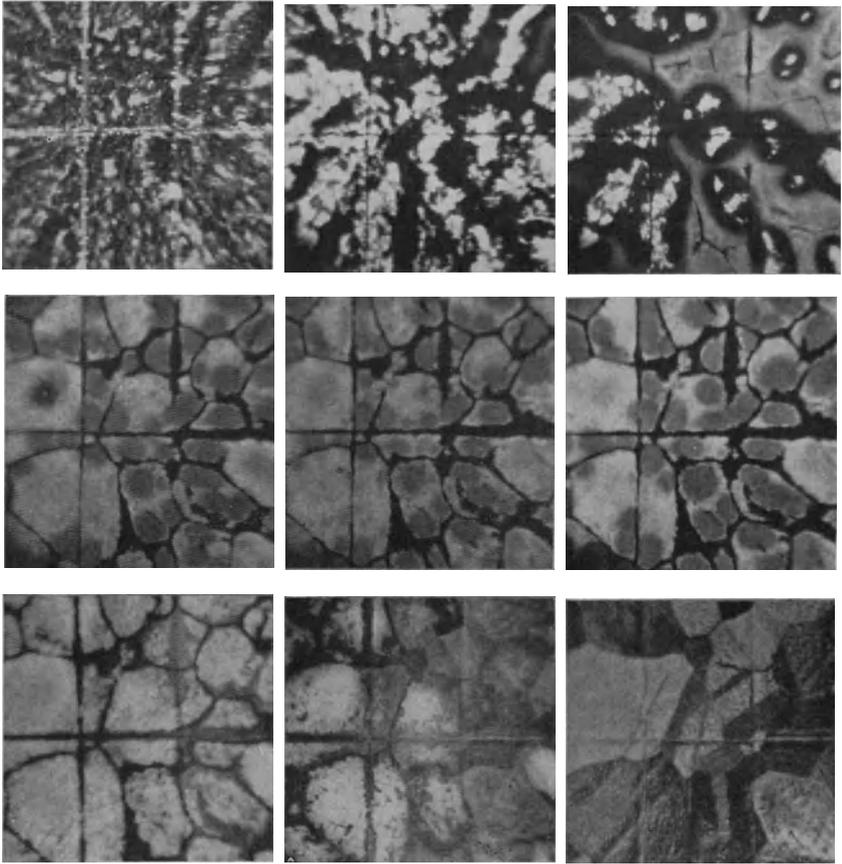
Bei dieser Aufnahme wurde das Bild des Hauses direkt auf eine strukturlose Photokathode projiziert und in ein Elektronenbild umgewandelt. Dieses Verfahren gibt die Möglichkeit, ein unsichtbares Ultrarotbild sichtbar zu machen, indem man dem Elektronenstrahlengang durch Beschleunigung der Elektronen Energie zuführt. Auch obiges Bild ist ein umgewandeltes Ultrarotbild, was man an dem „schneeigen“ Baum im Vordergrund erkennt.

1935 Katz und Schaffernicht [92].

Elektr. Aufn.

Vergr.: etwa 3 fach.

Metallurgie: Entstehen des Strukturbildes.



Entwicklung des Strukturbildes bei der Bariumoxyd-Kathode.

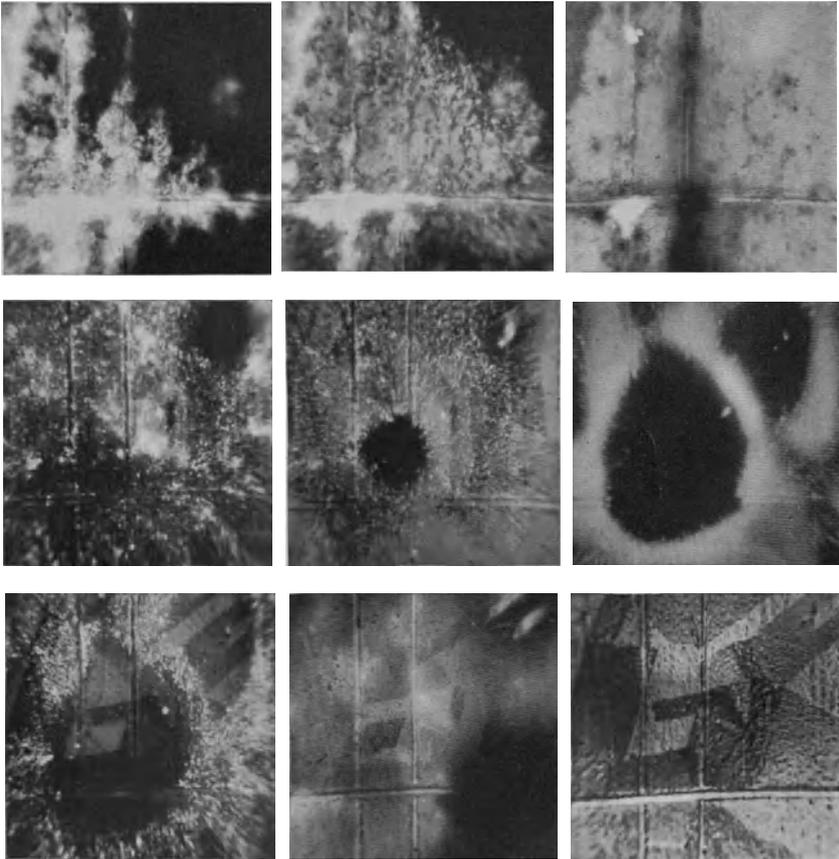
Beim Glühen der Oxyd-Kathode verschwinden die Oxydbrocken, das Bariumoxyd wird reduziert. Allmählich bildet sich durch Überdampfen eine zunächst dichte emittierende Schicht auf der Kathode aus, die nur an den Korngrenzen unterbrochen erscheint. Beim weiteren Glühprozeß verdampft das überschüssige Barium. Dieser Abbau scheint schichtenweise zu erfolgen, bis schließlich das elektronenoptische Strukturbild hervortritt.

1934 Knecht [24].

Elektr./Magnet. Aufn.

Vergr.: 32 fach.

Metallurgie: Entstehen des Strukturbildes.



Entwicklung des Strukturbildes bei der Bariumazid-Kathode.

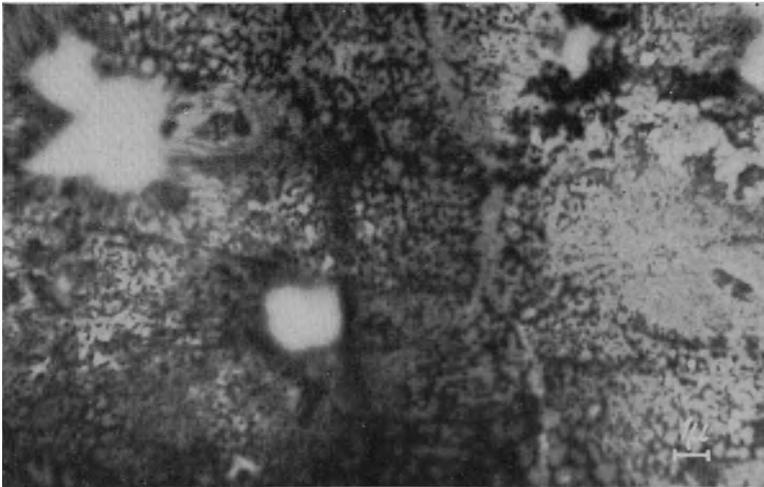
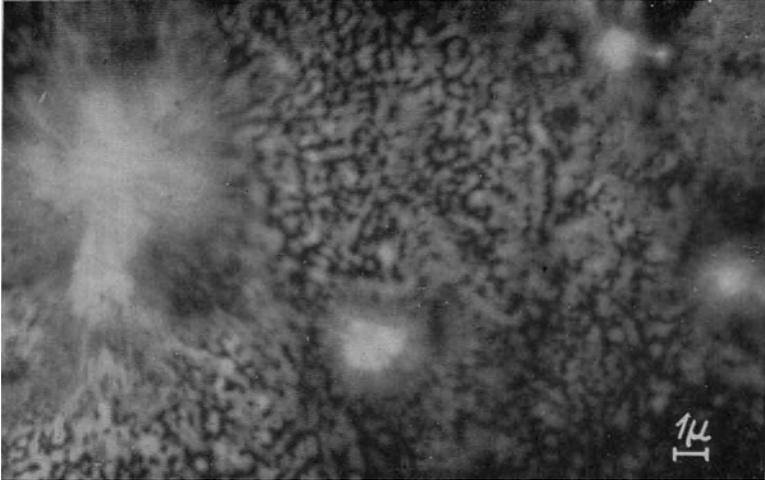
Bei der Bariumazid-Kathode spielt sich die Entwicklung zum Strukturbild ähnlich wie bei der auf der Gegenseite gezeigten Bariumoxyd-Kathode ab. Nur erfolgt hier nicht der Abbau der Schichten; die Struktur erscheint vielmehr stets körnig. Auch treten die Korngrenzen der Kristallite hier nicht so hervor wie bei der Oxydkathode auf der Gegenseite. An der gezeigten Azid-Kathode wurde die Entwicklung des Strukturbildes 1933 erstmalig beobachtet.

1933 Johansson [21].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 37 fach.

Metallurgie: Entstehen des Strukturbildes.



Entwicklung des Strukturbildes im Übermikroskop.

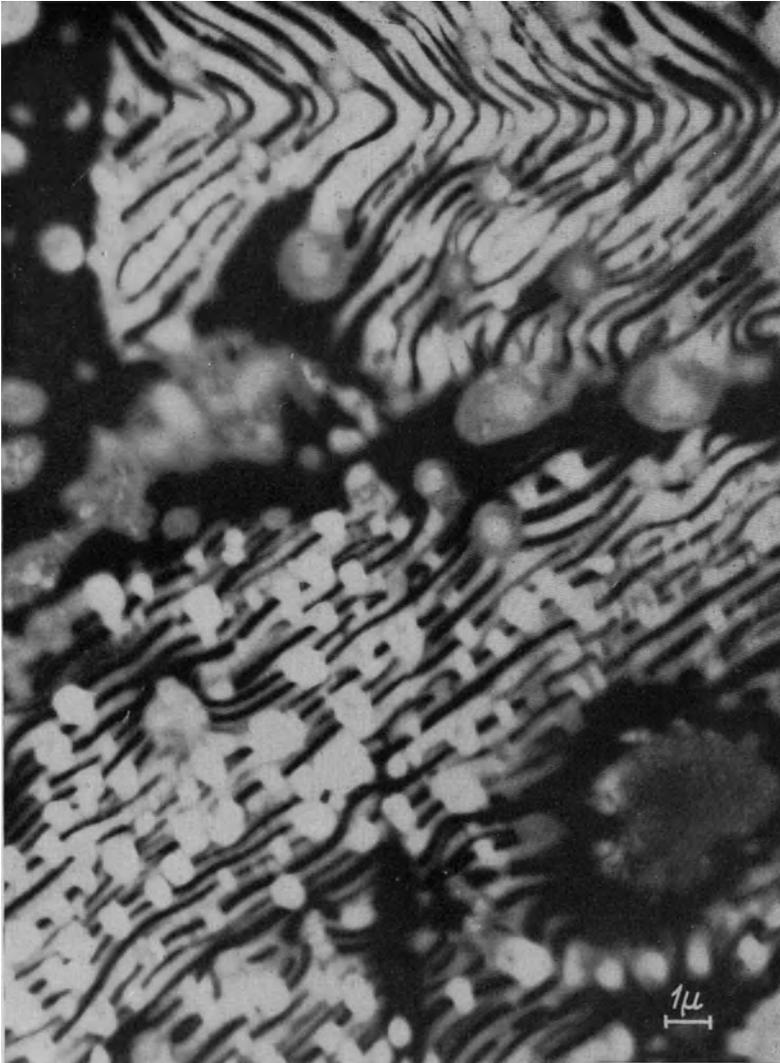
Vergleicht man die Entwicklung eines Strukturbildes bei einer Oxydkathode im Emissions-Übermikroskop mit den Beobachtungen bei geringer Vergrößerung (vgl. S. 54, 55), so ergeben sich Beobachtungen, die mit den Erfahrungen bei geringen Vergrößerungen im Einklang stehen. Auch jetzt tritt wieder die Überdampfung von den reduzierten, relativ großen Barium-Oxydkörnchen auf. Dem Kleinerwerden der Emissionszentren entspricht ein Zunehmen gleichmäßiger Emission, wobei Oberflächenrisse (Korngrenzen) eine bevorzugte Rolle spielen.

1942 Medlenburg.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 4000 fach.

Metallurgie: Entstehen des Strukturbildes.



Nickelglitlinien im Übermikroskop.

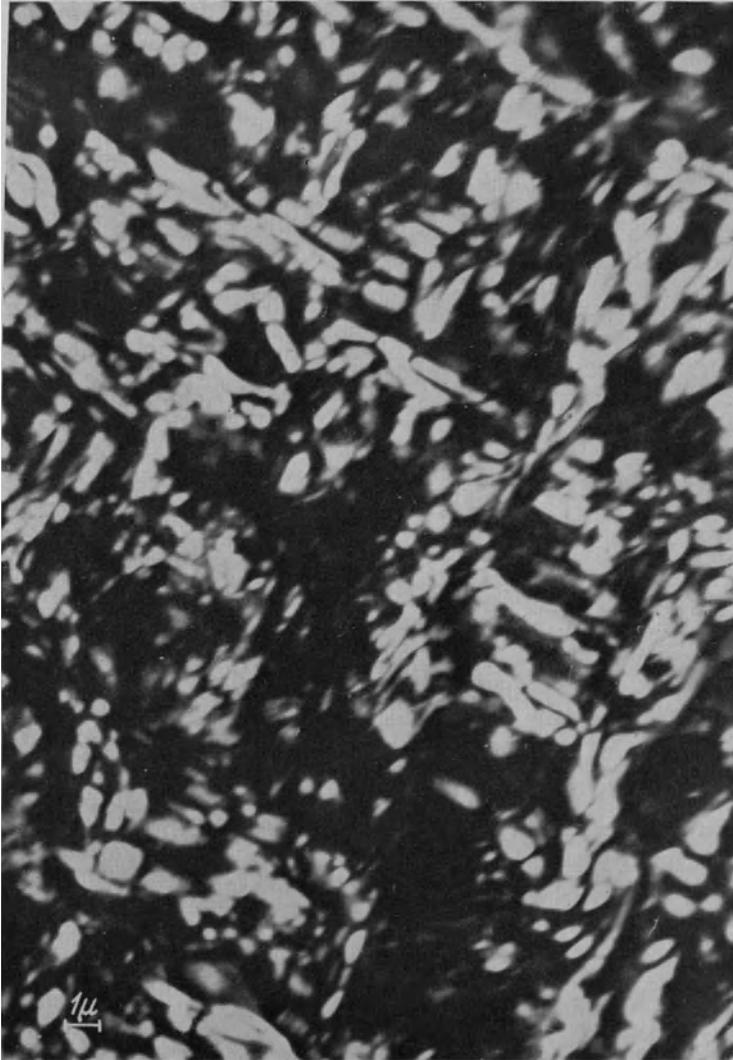
Bei Fortsetzung der Entwicklung des Strukturbildes einer Nickelfläche (siehe Gegenseite) bildeten sich zunächst sehr kräftig emittierende Bariumzentren (unter $1/1000$ mm Durchmesser). Dann breitete sich das Barium auf der Kathodenfläche aus, wobei Streifensysteme auftraten, die nach der Kristallstruktur orientiert zu sein scheinen.

1942 Mecklenburg [163].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 6500 fach.

Metallurgie: Entstehen des Strukturbildes.



Entwicklung des Strukturbildes im Übermikroskop.

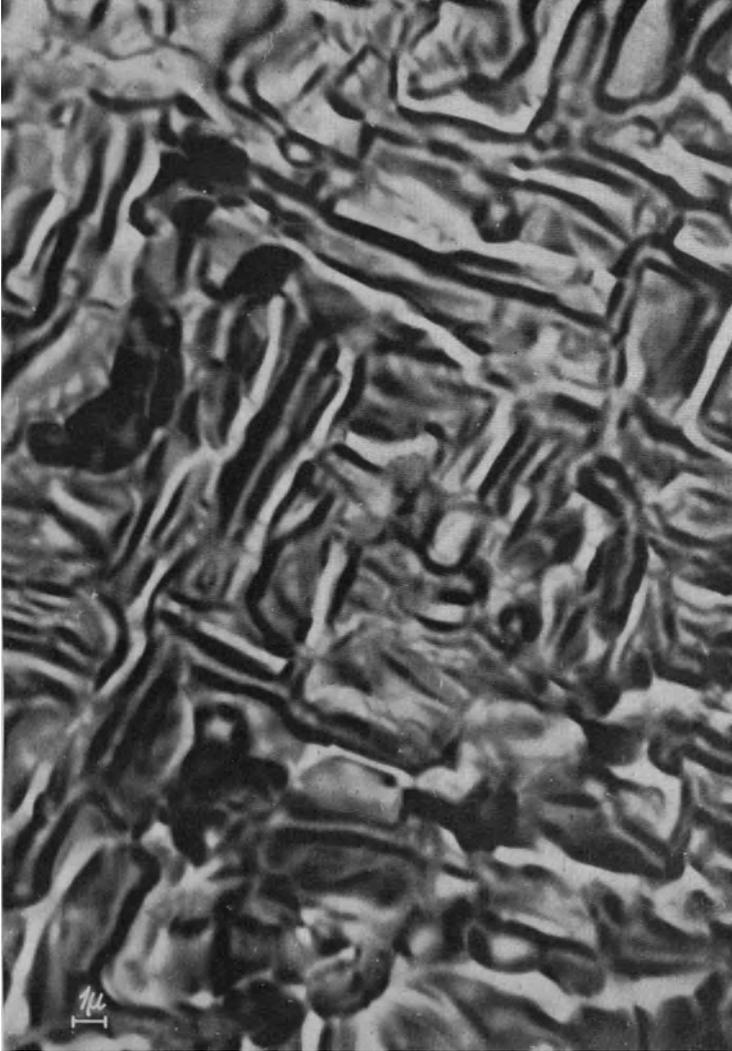
Auf den vorhergehenden Seiten wurde das Hervorgehen des Strukturbildes bei Nickel, das mit einer Oxydpaste versehen war, verfolgt. Bei den Aufnahmen dieser und der Gegenseite handelte es sich um Molybdän, aus dessen Innern Thorium hervortrat (vgl. auch S. 47). Bereits beim Auftreten der Emissionszentren ist eine Orientierung nach bevorzugten Richtungen erkennbar, die mit der Struktur des kubisch-flächenzentrierten Molybdängitters in Zusammenhang stehen wird.

1942 Kinder [160].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 5000 fach.

Metallurgie: Entstehen des Strukturbildes.



Hervortreten rechtwinkliger Strukturen im Übermikroskop.

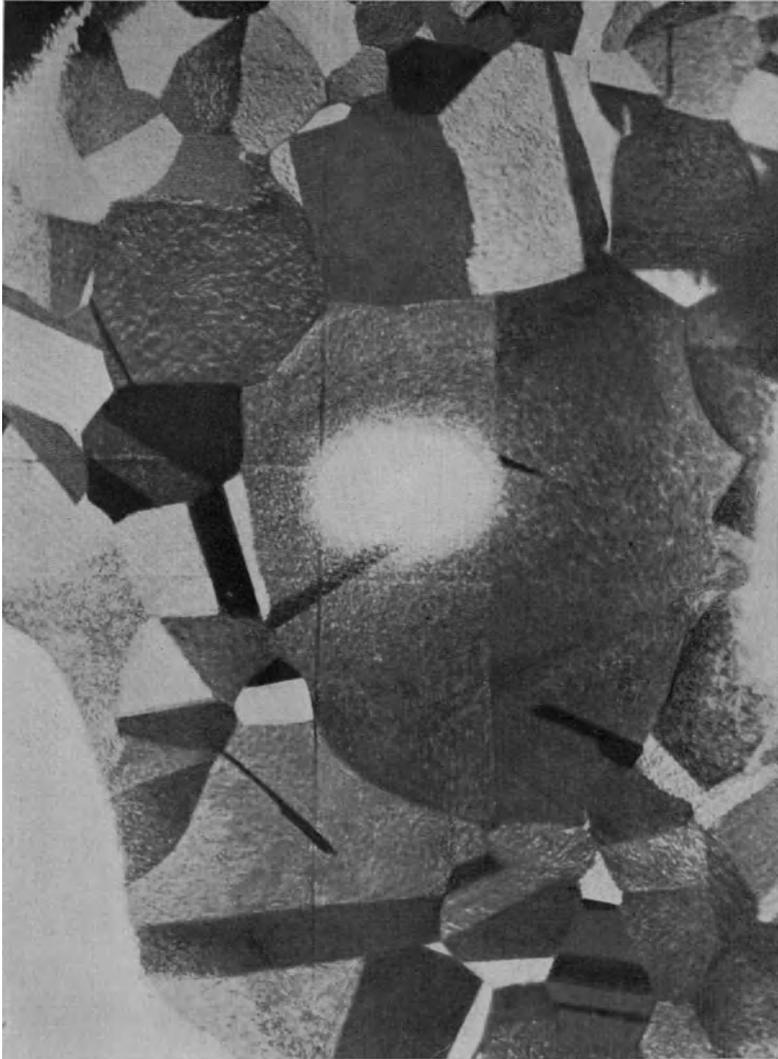
Nach längerem Erhitzen der bereits auf der Gegenseite gezeigten Kathode aus thoriertem Molybdän vereinigen sich die Emissionszentren im Sinne der schon vorher angedeuteten rechtwinkligen Struktur. So entstehen stark und schwach emittierende Bänder, wie sie auch auf den schwächer vergrößerten Bildern S. 70 erkennbar sind.

1942 Kinder [160].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 5000 fach.

Metallurgie: Nickel-Strukturbild.



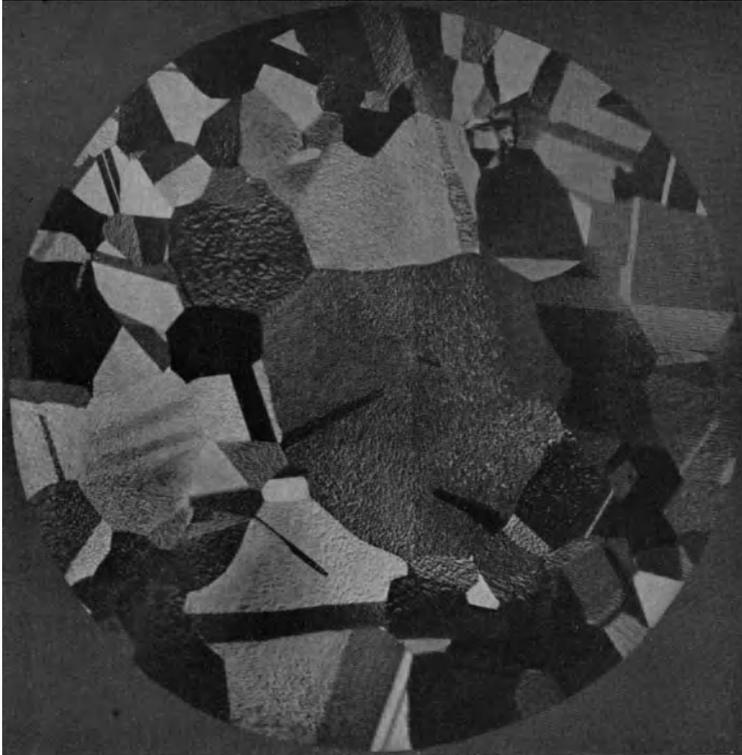
Nickel-Strukturbild mit stark emittierenden Inseln.

1934 Knecht [24, 26].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 50 fach.

Metallurgie: Nickel-Strukturbild.



Strukturbild einer Nickelkathode.

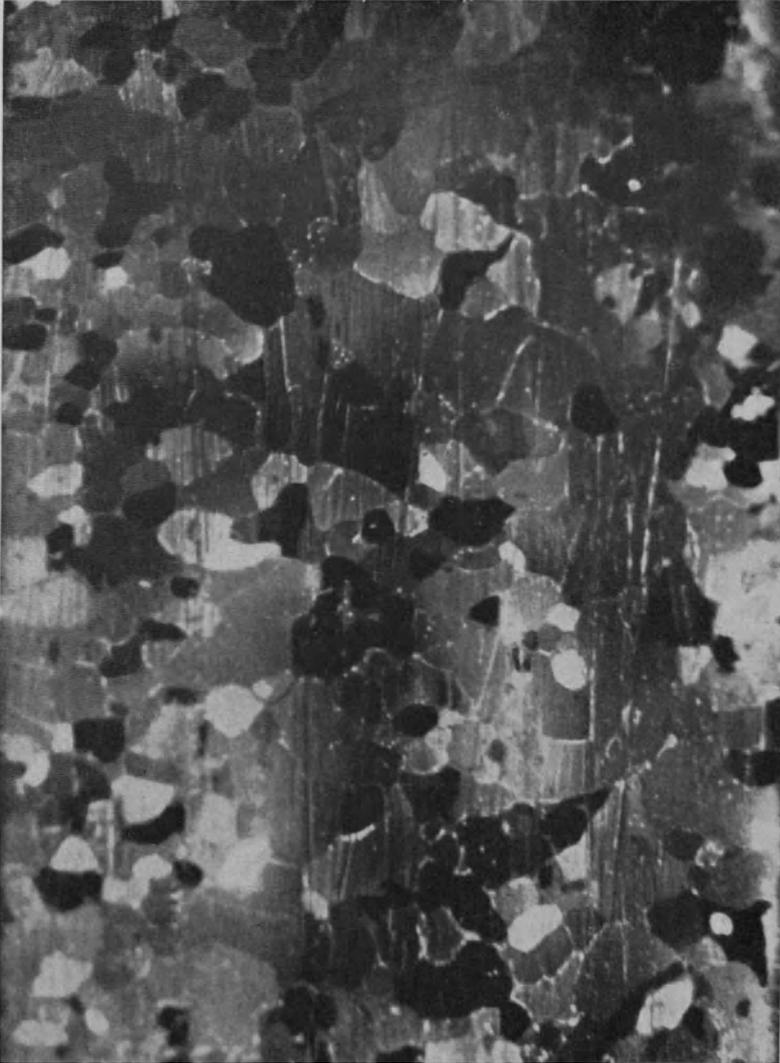
Die beiden Bilder auf dieser und der vorhergehenden Seite zeigen das Strukturbild am Anfang und Ende eines längeren Glühprozesses. Man beachte, daß die Oxydinseln in der Mitte und links unten im Verlauf des Glühens verschwunden und daß Änderungen in der Emissionsverteilung erfolgt sind. Man beachte auch, daß einzelne Kristallite bzw. Kristallit-teile ihre Emission gegenüber der Gesamtheit von Grund aus geändert haben. So erscheint beispielsweise der Kristallit über der Bildmitte auf beiden Bildern in ganz anderer Emission. Die Bilder sind aus mehreren Aufnahmen zusammengesetzt. Der Durchmesser der runden Kathode auf obenstehendem Bild betrug 3,3 mm.

1934 Knecht [24, 26].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 30 fach.

Metallurgie: Strukturbild bei Platin.



Struktur eines Platinbandes.

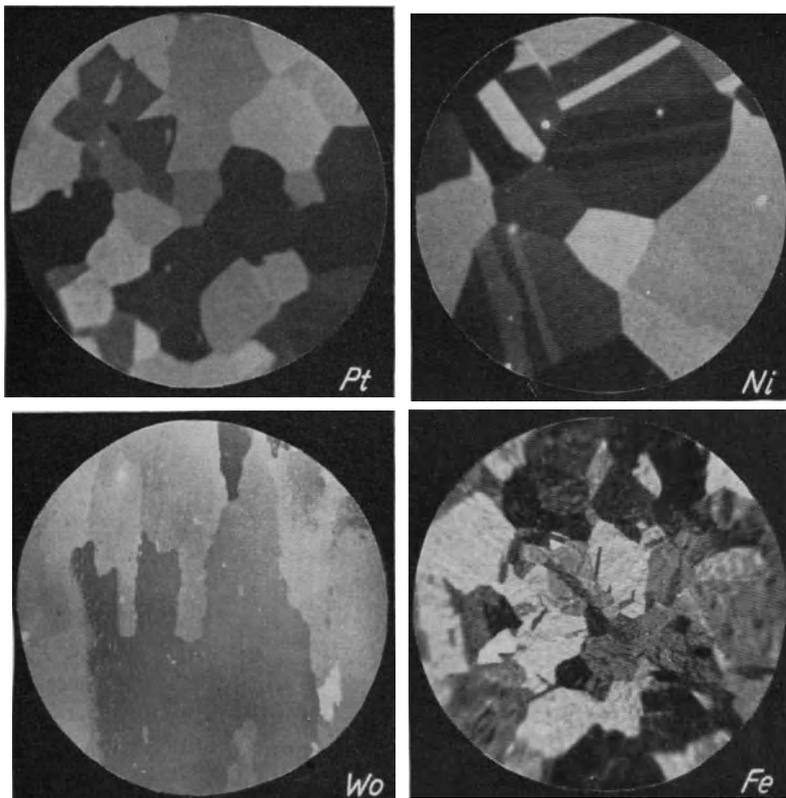
Die Aufnahme zeigt die sehr erheblichen Unterschiede in der Emission der verschieden geschnittenen Kristallite. Platin läßt sich so hoch heizen, daß die Aufbringung einer besonderen aktiven Schicht nicht erforderlich ist.

1934 Pohl [34].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 60 fach.

Metallurgie: Strukturbild bei Pt, Ni, Wo, Fe.



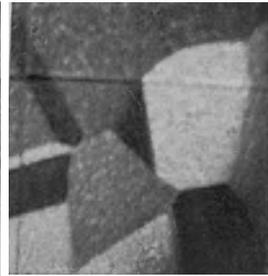
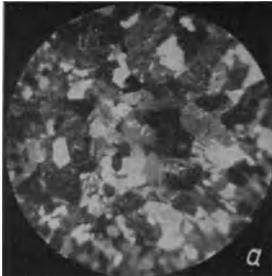
Strukturbilder verschiedener Metalle.

Alle bisher im Emissionsmikroskop untersuchten Metalle wie Platin, Platin-Rhodium, Wolfram, Molybdän, Nickel und Eisen zeigten im Glühzustande das elektronenoptische Strukturbild. Teils war es möglich, die Metalle wie Platin, Platin-Rhodium, Wolfram und Molybdän so hoch zu erhitzen, daß die zur Erzielung genügender Emission erforderlichen Glühtemperaturen erreicht wurden, ohne daß Schmelzen eintrat. Teils mußte durch Aufdampfen einer aktiven Schicht die Emission so verstärkt werden, daß auch unterhalb des Schmelzpunktes schon helle Elektronenbilder erhalten wurden.

1933/36 Johansson, Knedt, Schenk [136]. Elektr./Magnet. Aufn.

Vergr.: 30–70 fach.

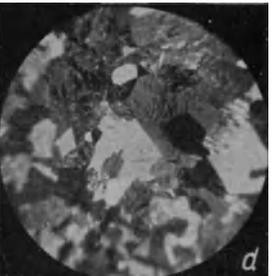
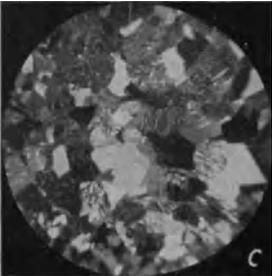
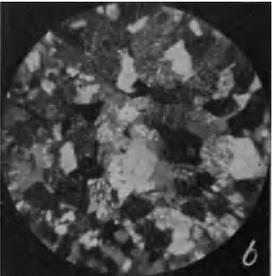
Metallurgie: Sammelkristallisation.



Wachsen eines Nickelkristallits.

1934 Knecht [24].

Vergr.: 55 fach.



Kristallwachstum.

Das Elektronenmikroskop erlaubt das Wachsen von Metallkristalliten (Sammelkristallisation) während des Glühens zu beobachten. Die Vertikalreihe zeigt das Zusammenwachsen von feinen Eisenkristallen zu einem größeren Gefüge. Die Horizontalreihe läßt den viel seltener beobachtbaren Fall des Wachstums einzelner Kristalle bei Nickel erkennen.

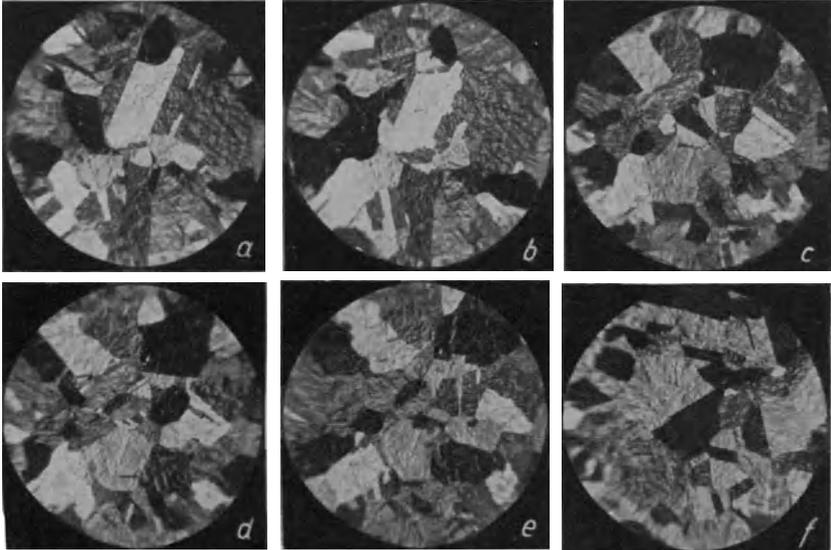
Sammelkristallisieren von Eisen.

1934 Brüche und Knecht [32].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 60 fach.

Metallurgie: Eisenumwandlung.



Eisenumwandlung bei 900° C.

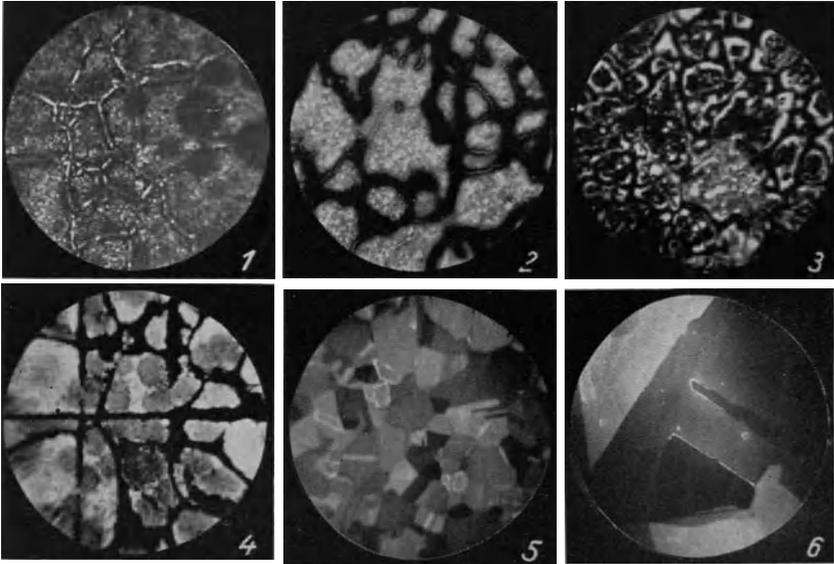
Wird Eisen erhitzt, so geht es bei 906° C vom α -Zustand in den γ -Zustand über. Das Elektronenmikroskop zeigt, daß diese innere Umwandlung mit einer Umkristallisation des Gefüges verbunden ist. Ist etwa die linke Seite der Kathode stets etwas wärmer als die rechte, so sieht man bei steigender Temperatur schließlich vom linken Rande ein neues Gefüge hervorwachsen, das sich in einer scharfen Grenze mehr und mehr nach rechts schiebt. Unsere Bilder stammen aus der ersten Untersuchung dieser Art, bei der die ganze Kathode einer Temperaturschwankung unterzogen wurde, wonach man dann feststellte, ob eine Veränderung zu bemerken war. So ist zwischen den Bildern a und b keine wesentliche Änderung im Gefüge bemerkbar, während sich die Bilder b und c von Grund aus unterscheiden usf.

1935 Brüche und Knecht [32].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 55 fach.

Metallurgie: Gleitebenen und Korngrenzen.



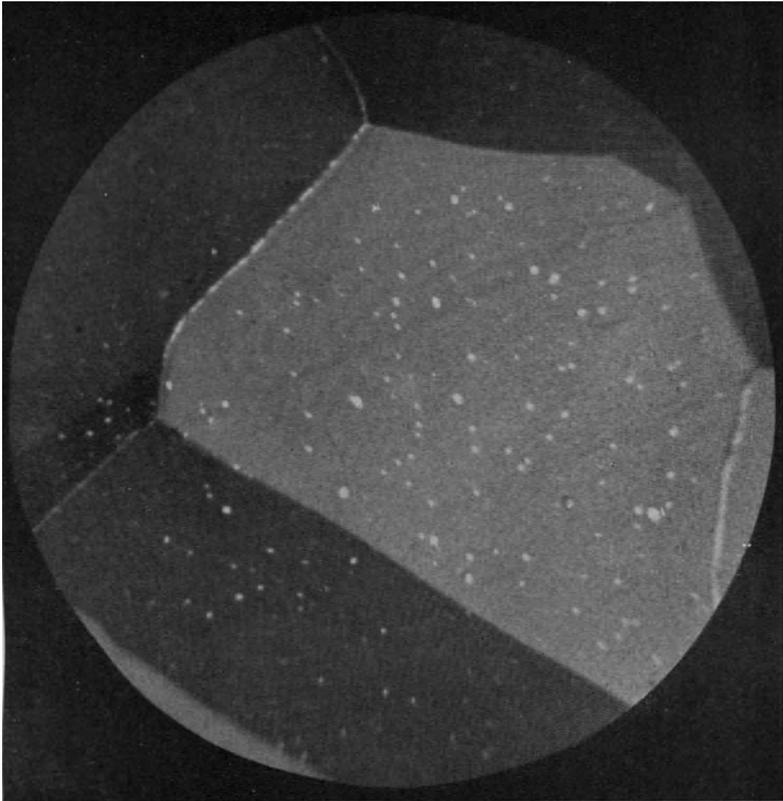
Bedeutung der Korngrenzen.

Die Bilder lassen erkennen, daß die Korngrenzen bei der Elektronenemission eine besondere Rolle spielen. Eine der Deutungen dieser Beobachtung folgt aus der verschieden kräftigen Emission verschieden geschnittener Kristallite (Strukturbilder). Diese Emissionsverschiedenartigkeit ist durch verschiedene Austrittsarbeit der Elektronen bedingt. Verschiedene Austrittsarbeit bedeutet aber verschiedenes Oberflächenpotential, was wiederum zur Folge hat, daß die Korngrenzen Gebiete hoher elektrischer Felder zwischen den Kristalliten sind.

1933/34 Johansson und Knecht [136]. Elektr. Aufn.

Vergr.: 50 fach.

Metallurgie: Gleitlinien und Korngrenzen.



Bedeutung der Korngrenzen.

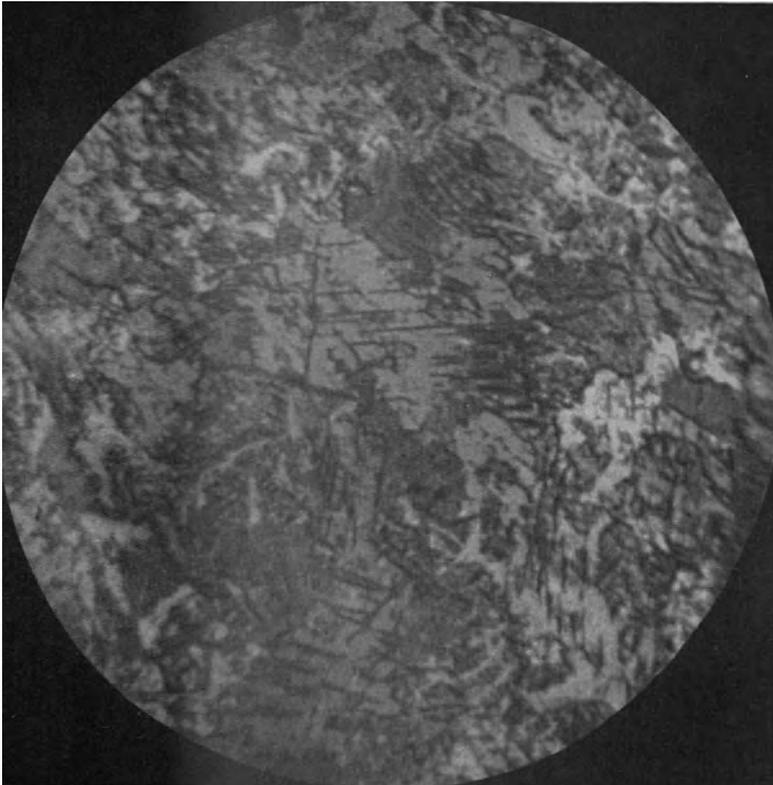
An Korngrenzen sind hohe elektrische Felder zu erwarten. Mit dieser Erwartung steht im Einklang, daß die Aufnahme an den Korngrenzen nicht so scharf zu sein scheint, wie auf den Kristallflächen. — Mit der vorliegenden Aufnahme kamen im Jahre 1934 die Versuche, hohe Auflösungen beim Emissionsmikroskop zu erhalten und nachzuweisen, zu einem vorläufigen Abschluß. Aus dem Mittelpunktsabstand engstbenachbarter, als Einzelteilchen noch deutlich erkennbarer Tröpfchen konnte damals auf eine „Auflösung“ von 0,003 mm geschlossen werden. Über die inzwischen erzielten Fortschritte, durch die die Auflösungs-grenze des Lichtmikroskops überschritten wurde, vgl. S. 47, 56—59, 70.

1934 Brüche und Knecht [36].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 250 fach.

Metallurgie: Gleitlinien und Korngrenzen.



Gleitlinien bei Wolfram.

Wie die vorhergehenden Bilder zeigten, läßt das Elektronenmikroskop die Kristallite des Gefüges durch ihre verschieden starke Emission erkennen. Doch auch innerhalb der den einzelnen Einkristallkörnern entsprechenden Flächen ist eine Struktur vorhanden. Gelegentlich zeigen sich wie auf unserem Bild und den folgenden Aufnahmen, deutlich Streifungen, die als Spuren von Gleitebenen in den Kristalliten gedeutet werden.

1936 Mahl und Schenk [64].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 50 fach.

Metallurgie: Gleitlinien und Korngrenzen.



Korngrenzen und Gleitlinien von thoriertem Molybdän.

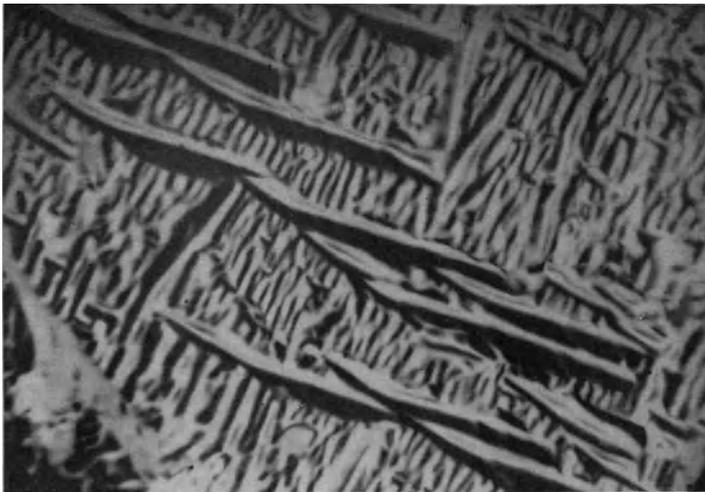
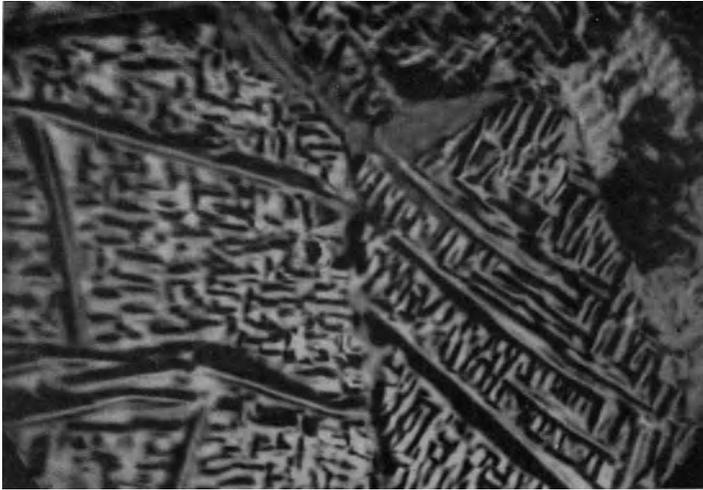
Die Aufnahme eines Bandes aus thoriertem Molybdän, auf dem vertikal zwei Striche eingekratzt sind, zeigt ein Metall im Gegensatz zu den bisher wiedergegebenen Strukturbildern von Metallen (vgl. vorhergehende Seiten) in relativ hoher Vergrößerung. Auf dem Bild sind die einzelnen Kristallite und in ihnen Streifensysteme verschiedener Art erkennbar. Auch hier handelt es sich offenbar um Gleitlinien.

Mahl [149].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 230 fach.

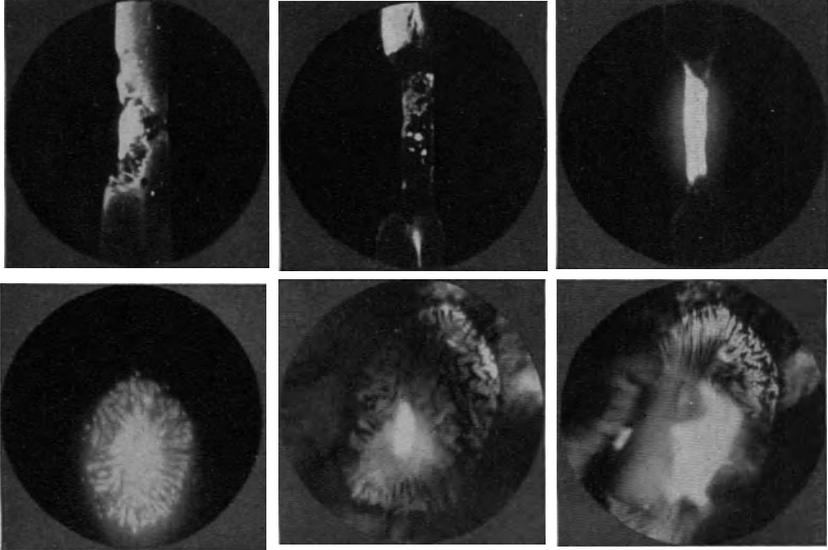
Metallurgie: Gleitlinien und Korngrenzen.



Gefügeeinheiten von thoriertem Molybdän.

Die beiden Bilder stellen vergrößerte Ausschnitte aus dem Bild der Gegenseite dar. Die nahezu übermikroskopischen Aufnahmen zeigen die stark zerklüftete Oberfläche, die beim Glühen teilweise abgetragen wurde. Man glaubt besonders auf dem unteren Bild hochstehende Bänder, die diagonal von links oben nach rechts unten verlaufen, aus der tieferliegenden Oberfläche herausstehen zu sehen oder wird an einen etagenförmigen Aufbau, bei dem die Oberfläche von links unten nach rechts oben stufenförmig ansteigt, denken.
1942 Mahl [149]. Elektr. Aufn. Vergr.: 2000 fach.

Physik: Schmelzvorgänge.



Schmelzvorgänge.

Wenn der Schmelzpunkt eines Metalles oder eines anderen leitenden Stoffes hoch genug liegt, ist es möglich, mittels der ausgesandten Glühelektronen den Schmelzvorgang zu verfolgen. So zeigt die obere Bildreihe den Schmelzvorgang eines Steatitröhrchens, in dessen Innern ein Wolframdraht glüht. Das überheizte Röhrchen schmilzt weg, bis schließlich der Wolframdraht selbst erscheint. — Liegt die Schmelztemperatur nicht so hoch, daß genügend glühelektrische Elektronen austreten, so vermag man doch den Vorgang durch andersartig ausgelöste Elektronen zu verfolgen. So läßt die untere Bildreihe das Schmelzen einer Goldfolie erkennen, die von hinten durch einen intensiven Elektronenstrom zum Schmelzen gebracht wurde. Die Abbildung erfolgte hier durch Sekundärelektronen.

1936 Mahl [93].
1936 Behne [63].

Elektr. Aufn.
Elektr. Aufn.

Vergr.: 20 fach.
Vergr.: 60 fach.

Physik: Oberflächenschichten.



Nachweis von Fettschichten.

In der Emissionsmikroskopie spielt die Elektronenauslösung durch Licht neben der Auslösung durch Glühen eine wichtige Rolle, können die Objekte doch auf diese Weise bei jeder Temperatur, also auch bei Zimmertemperatur, abgebildet werden. Bei obiger Aufnahme wurden die zur Abbildung erforderlichen Elektronen mit Ultraviolettlicht aus der geschabten Aluminiumplatte ausgelöst. Die geringe, auf das Aluminium durch einen Fingerabdruck gebrachte Verunreinigung, die mit dem Auge nicht zu erkennen war, verwehrt den Elektronen den Austritt, so daß diese Stellen im Elektronenbild dunkel erscheinen. Hier zeigt sich abermals ein neues Anwendungsgebiet für das Elektronenmikroskop, nämlich die Nachweismöglichkeit dünnster Schichten von Fremdstoffen auf Metallen.

1934 Pohl [34].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 60 fach.

Physik: Oberflächenschichten.



Nachweis von Oberflächenschichten.

Zeigt das mit lichtelektrischen Elektronen bei Zimmertemperatur erzielte Bild auf der Gegenseite die Verringerung der Emission durch dünnste Verunreinigungen, die auf eine Metallplatte aufgetragen waren, so läßt das obige Bild im Gegensatz dazu die Erhöhung der Emission durch Abtragung der obersten Schicht einer Metallfläche erkennen. Bei dieser Abtragung, die mit einem Stichel im Vakuum vorgenommen wurde, ergab sich eine erhöhte Emission des geschabten Metalls. Die Erscheinung ist wahrscheinlich dadurch bedingt, daß Metalloberflächen sich an Luft mit Gasen bzw. einer Oxydschicht bedecken, wodurch die Emission herabgesetzt wird.

1934 Pohl [49].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 15 fach.

Physik: Oberflächenschichten.



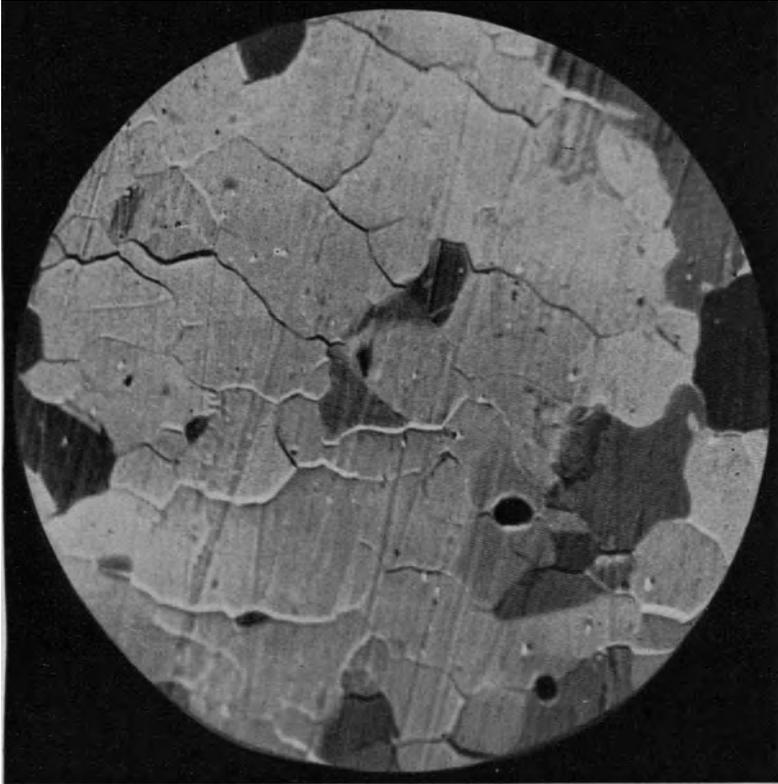
Lichtelektrisches Strukturbild von Nickel.

Nachdem in früheren Bildern die Anwendung des Elektronenmikroskops zur Strukturuntersuchung bei Glühelctronen gezeigt war, seien nun Beispiele aus dem Gebiet der Lichtelektrizität betrachtet. Unser Bild gibt ein lichtelektrisches Strukturbild wieder. Strukturbilder, insbesondere von polierten Metallen, waren bei lichtelektrischer Elektronenlösung zunächst nur gelegentlich zu erhalten. Erst als man die zu untersuchenden Metalle vorgeglüht hatte, entwickelten sie sich in voller Deutlichkeit. Zur Deutung dieser Beobachtungen wird man annehmen, daß vor dem Glühen keine kristalline Oberflächenschicht vorhanden war, sondern eine „verschmierte“ Schicht, die erst durch das Glühen aus dem Vollmaterial heraus rekristallisierte.

1937 Groß (als Gast) [Z. Phys. 105, 734]. Magnet. Aufn.

Vergr.: 75 fach.

Physik: Oberflächenschichten.



Lichtelektrisches Strukturbild von Platin.

Während das Bild auf der Gegenseite das Strukturbild einer weitgehend planen Oberfläche zeigt, gibt obiges Bild eine Platinoberfläche wieder, deren einzelne Kristallite durch starkes Glühen etwas in der Höhe gegeneinander verschoben sind. So treten neben der verschieden kräftigen Emission der Kristallite die Korngrenzen deutlich hervor. Nehmen wir an, daß das Licht, das die Elektronen auslöst, schräg von oben auf die dem Bild entsprechende Kathode trifft, so werden wir schließen, daß die Kristallite mit einem hellen oberen Rand aus der Fläche herausgetreten, die Kristalle mit einem dunklen oberen Rand aber in die Fläche versenkt sind.

1934 Pohl [34].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 70 fach.

V. Durchstrahlungs-Mikroskopie.

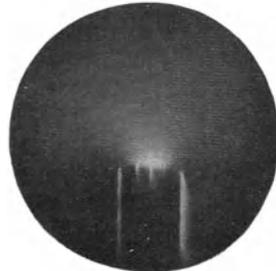
Dem Emissionsmikroskop steht das Durchstrahlungsmikroskop als wichtigste der übrigen Formen des Elektronenmikroskops zur Seite. Es entspricht dem üblichen Lichtmikroskop für durchstrahlte Objekte und erlaubt wie dieses Dunkelfeld- oder Stereoaufnahmen. Schon bei geringen Vergrößerungen gibt das Durchstrahlungs-Elektronenmikroskop Aussagen, die über die des Lichtmikroskops hinausgehen, wie es folgende Beispiele von Dunkelfeldbildern zeigen:



Goldfolie,

bei der die Kriställchen einer bestimmten Lage an ihrer starken Helligkeit erkennbar werden.

1936 Boersch [68].

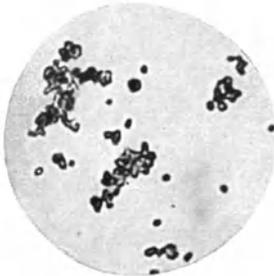


Dampfstrahl

sehr geringer Dichte tritt aus einer Düse in einen Hochvakuumraum aus. Dampfstrahl und Rand der Düse sind erkennbar.

1937 Boersch [84].

Das Hauptanwendungsgebiet des Durchstrahlungs-Elektronenmikroskops liegt bei hohen Vergrößerungen, wo sich die Vorzüge der kurzwelligigen Elektronenstrahlung zu zeigen vermögen. Infolge der um Zehnerpotenzen kürzeren Wellenlänge der im Elektronenmikroskop verwendeten Elektronenstrahlen vermag das Elektronenmikroskop auch unterhalb der Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops (0,0002 mm) die Objekte noch getreu abzubilden:



Lichtmikroskopisches Bild

an der Auflösungsgrenze. Es vermag die sehr kleinen Teilchen nicht getreu zu zeigen.

Aufn. Zeiss-Jena.

Vergr.: 2100 fach.



Elektronenmikroskopisches Bild.

Es zeigt trotz sechsmal so hoher Vergrößerung die genaue Form sehr kleiner Teilchen.

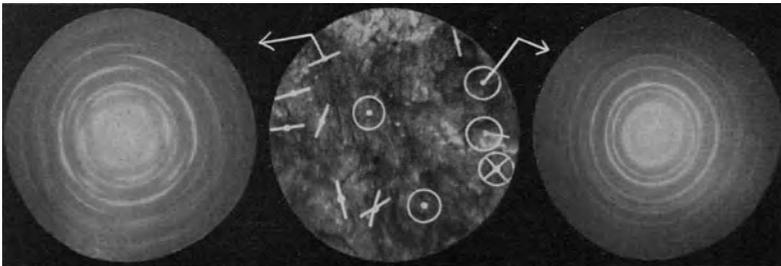
1939 Mahl [102].

Vergr.: 13000 fach.

Übermikroskopie und Beugung.

Im Lichtmikroskop entsteht nach Abbe außer dem eigentlichen Bild des Gegenstandes auch ein Beugungsbild. Dieses Beugungsbild ist für die Bildentstehung von größter Wichtigkeit. Deckt man das Beugungsbild teilweise ab, so entsteht ein gefälschtes Bild des Gegenstandes. Das geschieht auch durch die Begrenzung des Objektivs dann, wenn bei der Abbildung kleinster Teilchen die abgebeugten Strahlen stark gegen die optische Achse geneigt sind. Gelangt nämlich dieses Licht, das dem ersten Beugungsmaximum entspricht, nicht mehr ins Objektiv, so wird der betreffende Gegenstand nicht mehr abgebildet, die Auflösungsgrenze ist erreicht.

Im Elektronenmikroskop liegen die Verhältnisse ebenso. Auch hier ist ein Beugungsbild vorhanden und zu beobachten. Auch hier ist das Studium der Beugungserscheinungen und die Untersuchung des Beugungsbildes notwendig, um Klarheit über den Vorgang der Bildentstehung im Elektronenmikroskop, insbesondere im Durchstrahlungs-Übermikroskop, zu erhalten (1936, Boersch [65, 68]).

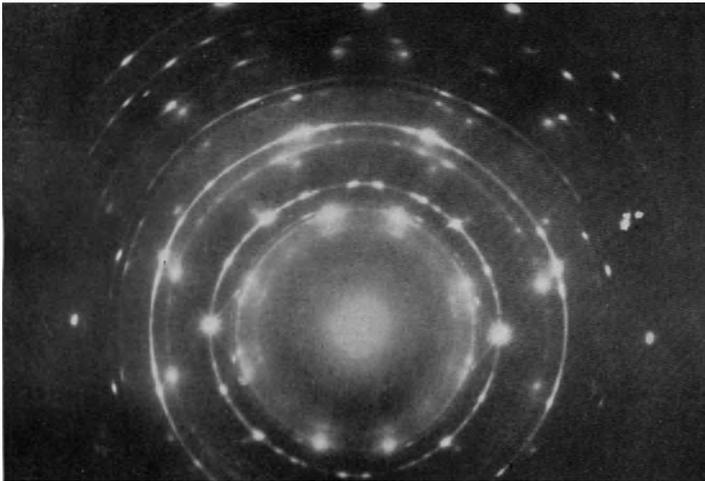
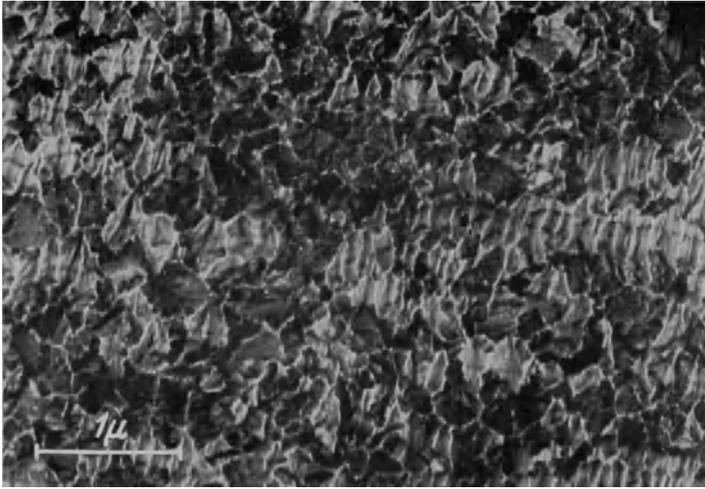


Elektronenbild und Beugungsbild.

In der Mitte ist das Elektronenbild einer durchstrahlten Goldfolie wiedergegeben. An den Seiten stehen die zu den angegebenen Bezirken der Folie gehörigen Beugungsbilder. Durch Ausblenden im Bild erhält man Aufschlüsse über den Aufbau der Folie von Punkt zu Punkt. Man kann aber auch durch Ausblenden im Beugungsbild Aufschlüsse über Kristalle bestimmter Lagerung in der Folie erhalten.

1936 Boersch [68].

Vergr.: 80 fach.



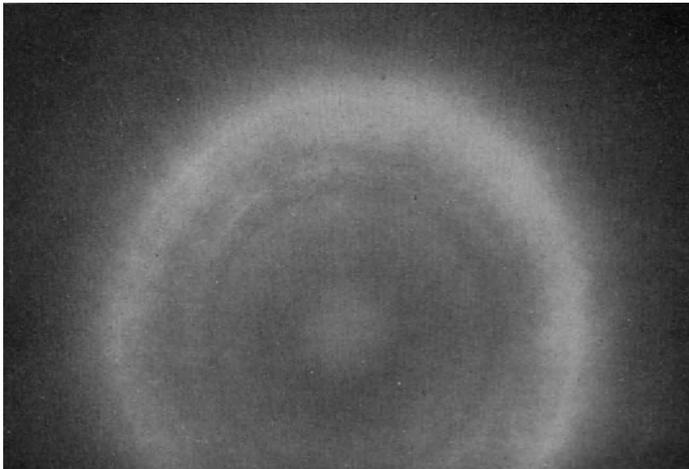
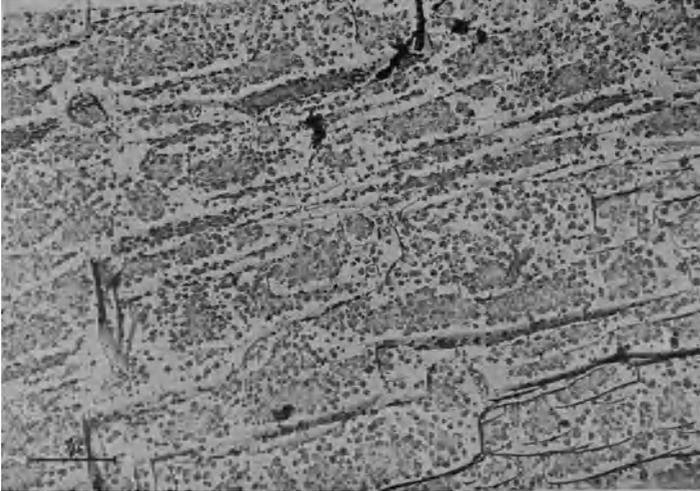
Oxydfilm von geglühtem Aluminium.

Der hier wiedergegebene Oxydfilm stammt von einer mit Natronlauge geätzten Oberfläche und war nachträglich stark geglüht worden. Es hatten sich dabei, wie es das Beugungsbild an den scharfen Beugungspunkten erkennen läßt, Oxydkristallite gebildet, die in bestimmten Oberflächenbereichen in Vorzugsrichtungen angeordnet sind.

Mahl.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 20 000 fach.



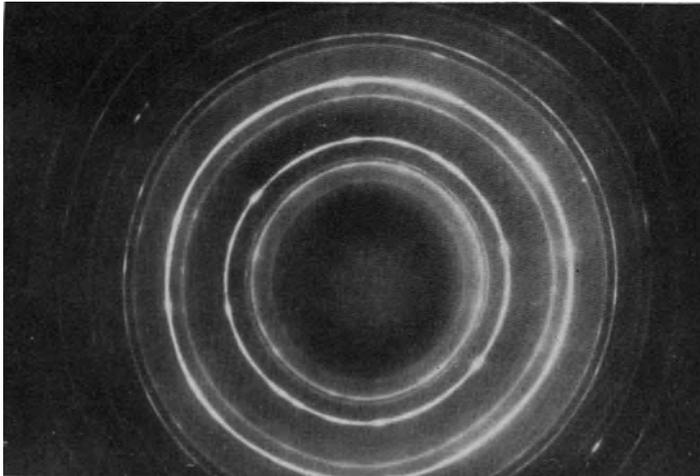
Wachstum des Oxydfilms beim Glühen 1.

Wird Aluminium kurzzeitig bei 500° C geglüht, so bildet sich ein „amorpher“ Oxydfilm, in den einzelne kleine Kristallite eingestreut sind (oberes Bild). Das Beugungsbild eines solchen Films (unteres Bild) zeigt einige, allerdings noch nicht sehr scharfe Ringe, die aus dem diffusen, von der „amorphen“ Schicht herrührenden Untergrund hervortreten.

Mahl [159].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 12 000 fach.



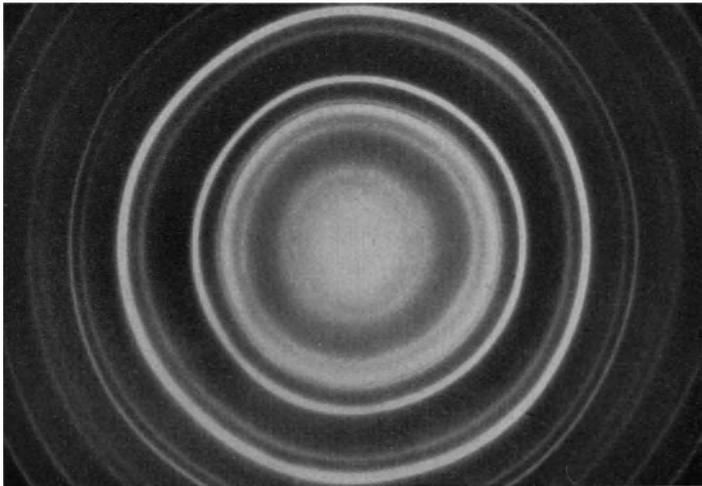
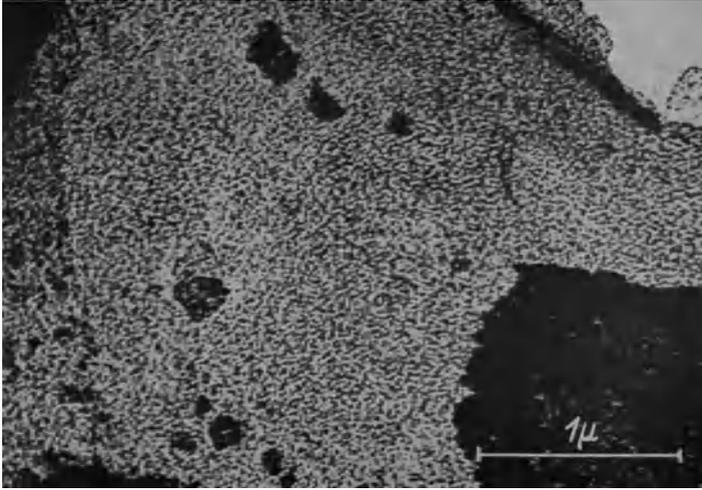
Wachstum des Oxydfilms beim Glühen 2.

Bei längerem Glühen werden alle Teile des Oxydfilms in Kristalle von Aluminiumoxyd umgewandelt. Das macht sich am Beugungsbild in dem Verschwinden des Untergrundes und der Verschärfung der Ringe bemerkbar. Die erkennbare Intensitätsunsymmetrie weist auf eine Bevorzugung bestimmter Orientierungen der Kristalle hin.

Mahl [159].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 6000 fach.



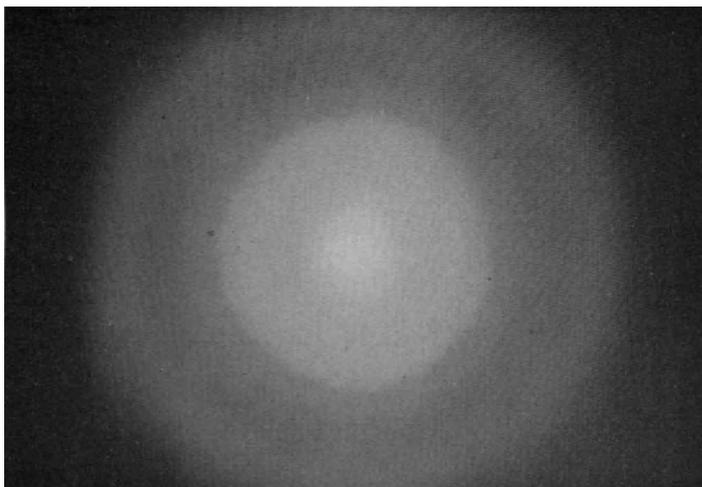
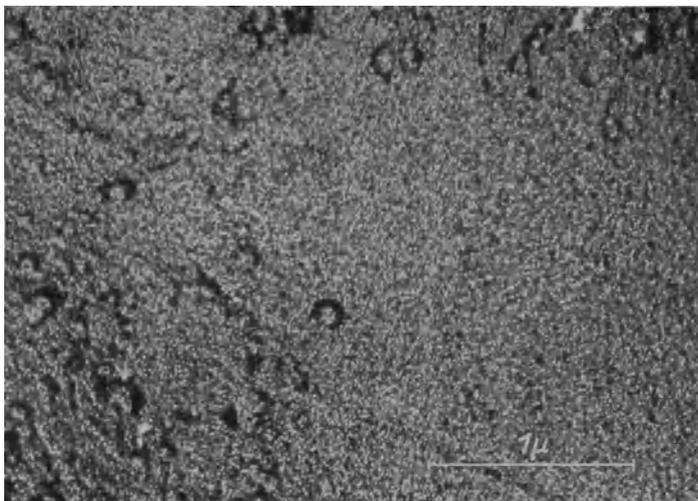
Thermisch erzeugter Aluminiumoxydfilm.

Bei einem Oxydfilm, der durch Hineinhalten in eine Gasflamme erzeugt wurde, zeigt das Obermikroskop eine sehr feinkörnige Struktur, ohne daß erkennbar wird, ob diese Körnigkeit auf kleine Kristallite oder auf Dickenunterschiede (Poren) zurückzuführen ist. Hier ermöglicht die Elektronenbeugungsaufnahme sogleich eine Entscheidung. Sie zeigt durch die scharfen Ringe, daß diese Schicht aus feinen Kristallen aufgebaut ist.

Mahl [133].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 27 000 fach.



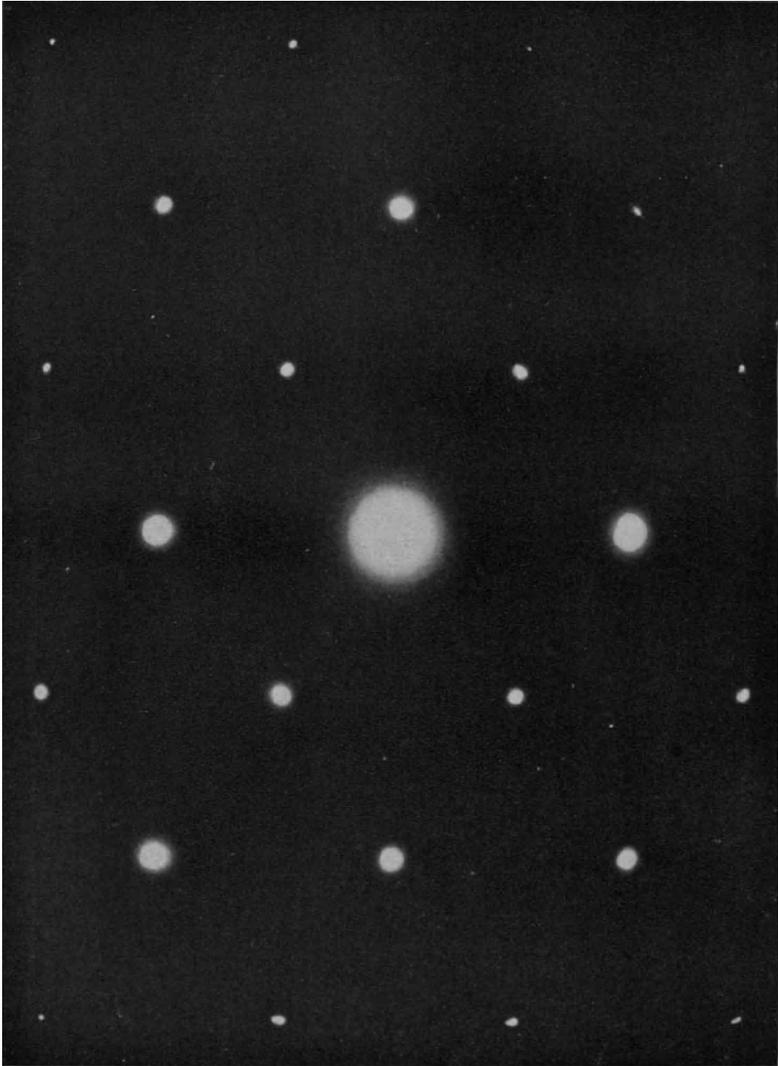
Elektrolytisch erzeugter Aluminiumoxydfilm.

Fast den gleichen Eindruck wie der thermisch erzeugte Film auf der vorhergehenden Seite macht der elektrolytisch erzeugte Aluminiumoxydfilm, dessen Bild oben wiedergegeben ist. Die Elektronenbeugungsaufnahme beweist aber durch die verwaschenen Ringe, daß dieser Eloxalfilm eine „amorphe“ bzw. „äußerst feinkristalline“ Struktur hat und daß die getrennt erscheinenden Teilchen keine Kristallkörner, sondern nur Poren in der Schicht sind.

Mahl [133].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 27 000 fach.



Elektronenbeugungsbild.

Diese Aufnahme wurde beim Durchtritt eines feinen Elektronenstrahls durch einen Kochsalz-Kristall erzielt. Da solche Bilder nur bei der Wechselwirkung von Wellenstrahlung mit den Gitterstrukturen der Kristalle auftreten, gelten sie als Beweis des Wellencharakters der Elektronenstrahlung, die sich dann auch durch Beugung der Elektronenstrahlung an einer Kante unmittelbar zeigen ließ [127]. Vgl. auch S. 7.

Boersch [136].

Von der Idee*) des Elektronen-Übermikroskops.

1876 spricht Abbe, der große Optiker des vorigen Jahrhunderts, der die prinzipielle Grenze des Lichtmikroskops erkannte, seinen Glauben dahin aus, daß einst das Vordringen zu kleinsten Dimensionen über die Grenze des Lichtmikroskops hinaus möglich sein würde:

„Nach allem, was im Gesichtskreis unserer heutigen Wissenschaft liegt, ist der Tragweite unseres Sehorgans durch die Natur des Lichtes selbst eine Grenze gesetzt, die mit dem Rüstzeug unserer dormaligen Naturkenntnis nicht zu überschreiten ist. Es bleibt natürlich der Trost, daß zwischen Himmel und Erde noch so manches ist, von dem sich unser Unverstand nichts träumen läßt. Vielleicht, daß es in der Zukunft dem menschlichen Geist gelingt, sich noch Prozesse und Kräfte dienstbar zu machen, welche auf ganz anderen Wegen die Schranken überschreiten lassen, welche uns jetzt als unübersteiglich erscheinen müssen. Das ist auch mein Gedanke. Nur glaube ich, daß diejenigen Werkzeuge, welche dereinst vielleicht unsere Sinne in der Erforschung der letzten Elemente der Körperwelt wirksamer als die heutigen Mikroskope unterstützen, mit diesen kaum etwas anderes als den Namen gemeinsam haben werden“.

1929 beschreibt Stintzing (DRP 485 155, angemeldet am 13. 5. 27, ausgegeben 28. 12. 1929), nachdem man schon die Anwendung der kurzwelligen Röntgenstrahlung zur Überschreitung der Auflösungsgrenze diskutiert hat, eine mikroskopische Einrichtung mit Korpuskularstrahlen, die wir heute „Rastermikroskop“ nennen. Der Erfinder, der dabei die bereits bekannte Eigenschaft rotationssymmetrischer Felder, wie Linsen zu wirken, nicht ausnutzt, faßt die Elektronen als Korpuskularstrahlung auf. Er behandelt die von Abbe gestellte Aufgabe auf korpuskularer Basis und löst sie ohne Verwendung elektronenoptischer Abbildung durch Abrasterung des Objekts mit einem submikroskopisch feinen Korpuskelstrahl.

1931/32 entsteht, nachdem durch Busch die Elektronenlinsen gefunden und durch de Broglie die Wellennatur des Elektrons postuliert worden ist, das eigentliche Elektronenmikroskop in analogem Aufbau zum Lichtmikroskop. Seine Möglichkeit hinsichtlich der Auflösungserhöhung wird vom Standpunkte der Wellenvorstellung des Elektrons explizit zuerst von Knoll, Houtermans und Schulze erwähnt, während man zuvor nur von Elektronenmikroskopen „sehr hoher Vergrößerung“ als einem Ziel der Entwicklung gesprochen hatte [2].

1933 erhalten die neuen Mikroskope, die über die Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops hinausgehen, ihren Namen. Brüche [13] schlägt für sie die Bezeichnung „Ü b e r m i k r o s k o p“ vor:

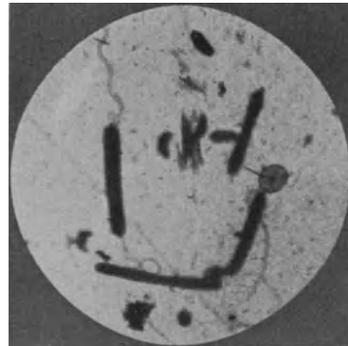
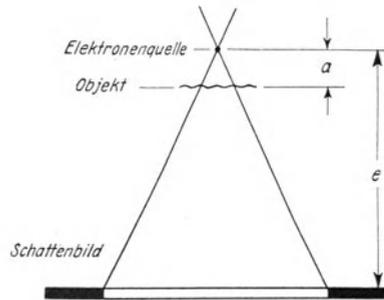
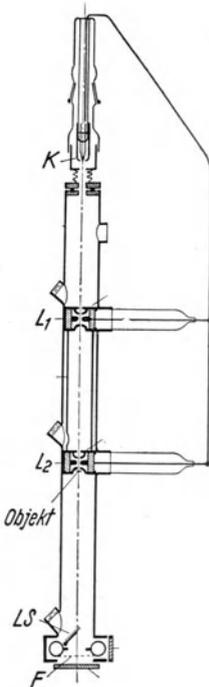
„Bei der Weiterentwicklung der Abbildungssysteme geht die Arbeit dem fernen Ziel des „Übermikroskops“ entgegen, d. h. eines Mikroskops, das infolge der Kleinheit der Elektronenwellenlänge auch dann noch aufzulösen vermag, wenn das Lichtmikroskop längst seine prinzipielle Grenze erreicht hat“.

So ist aus Abbes Glauben an „diejenigen Werkzeuge, welche dereinst vielleicht unsere Sinne in der Erforschung der letzten Elemente der Körperwelt wirksamer als die heutigen Mikroskope unterstützen“ werden, eine Aufgabestellung der Elektronenoptik geworden. An die Stelle der Glaslinse tritt die Elektronenlinse. Aus dem Mikroskop wird das Übermikroskop.

*) Über die experimentelle Entwicklung vgl. S. 126.

Schatten-Übermikroskop.

Das Schattenmikroskop nach Boersch [99] ist das in grundsätzlicher Beziehung einfachste Durchstrahlungs-Übermikroskop. Es besteht aus einem elektronenoptischen Verkleinerungssystem, das von der Kathode K (oder von einer engen mit Elektronen bestrahlten Blende) durch die Linsen L_1 und L_2 (s. Bild unten links) in zwei Stufen einen sehr kleinen Elektronenfleck dicht vor dem Objekt erzeugt. Von diesem „Überkreuzungspunkt“ der Elektronenstrahlen aus wird nun das Objekt durchstrahlt und als vergrößertes Schattenbild auf den Leuchtschirm LS oder die Fotoplatte F projiziert. Die Vergrößerung des Schattenmikroskops ergibt sich, wenn man die Überschneidungsstelle der Strahlen als punktförmige Elektronenquelle ansieht, zu $V=e/a$ (s. Bild rechts).

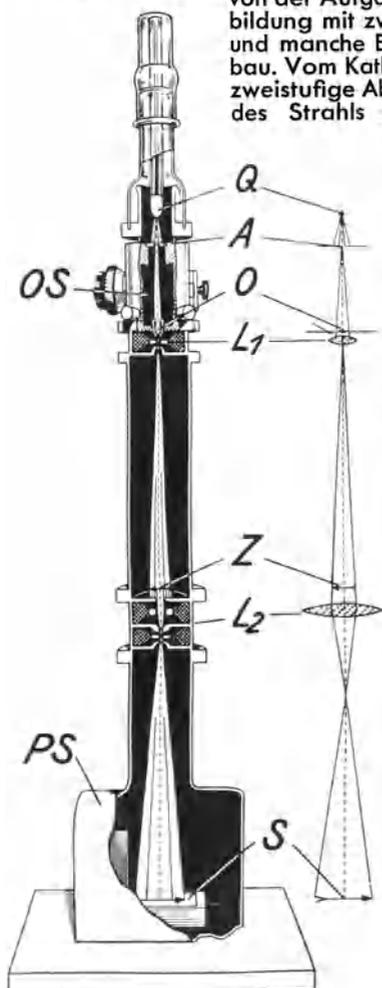


Schnitt durch das Schatten-Übermikroskop mit elektrostativen Linsen, deren Mittelelektroden auf Kathodenpotential liegen.

Schema der Bilderzeugung beim Schattenmikroskop und Schattenbild von Bakterien verschiedener Art.

Abbildungs-Übermikroskop.

Die heutigen Abbildungs-Übermikroskope sind unter dem Vorbild des Projektions-Lichtmikroskops und des Kalt-Kathoden-Oszillographen entwickelt worden. Vom Lichtmikroskop übernahm das Übermikroskop — abgesehen von der Aufgabe — das Durchstrahlungsprinzip, die Abbildung mit zwei Linsen in zwei Stufen, den Kondensator und manche Einzelheit, wie z. B. den senkrechten Aufbau. Vom Kathoden-Oszillographen, der ebenfalls eine zweistufige Abbildung benutzt, stammt die Verwendung des Strahls schneller Elektronen und damit Glühkathode, Beschleunigungseinrichtung, Vorkonzentration und Plattenschleuse.



Unterschiedlich ist gegenüber dem Oszillographen die neu hinzugefügte Objektschleuse mit der Objektverschiebungs-Einrichtung und die Kurzbrennweitigkeit der Linsen.

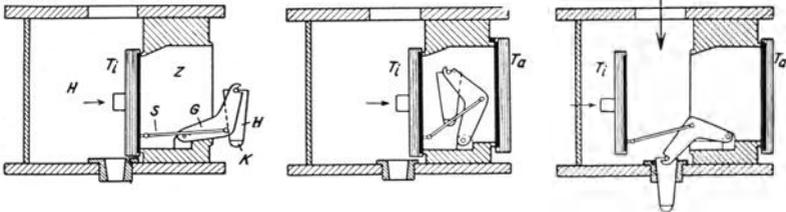
Nebenstehende Abbildung zeigt den grundsätzlichen Aufbau des Elektronen-Übermikroskops im Vergleich zum lichtoptischen Strahlengang am Beispiel des elektrostatischen Übermikroskops nach Mahl. Von der Quelle Q, einer Glühkathode, werden die Elektronen zur Anodenblende A durch einige zehntausend Volt beschleunigt. Sie durchdringen nun die Objektschleuse OS und das Objekt O. Die erste Linse L_1 entwirft das Zwischenbild Z des Objektes dicht vor der zweiten Linse L_2 . Diese Projektionslinse, die in der Abbildung als Doppellinse ausgebildet ist, zeichnet das endgültige Bild auf dem Leuchtschirm S der Plattenschleuse PS. Rechnet man beispielsweise für jede Linse 100fache Vergrößerung, so erhält man also ein 10 000fach vergrößertes Bild auf dem Leuchtschirm oder der photographischen Platte.

Je nachdem, ob man für die Linsen magnetische oder elektrische Felder verwendet, spricht man vom magnetischen oder elektrischen Elektronenmikroskop. Im AEG Forschungs-Institut wurden beide Typen entwickelt; die erstere als Laboratoriumsgerät zur Erzielung von Aufnahmen mit sehr hohen Elektronenenergien, die letztere, deren Entwicklung infolge des Fehlens jeglicher Erfahrung vom Kathoden-Oszillographen her schwieriger war, um ein einfaches Gebrauchsgerät — eine „rationelle Konstruktion“ im Sinne von Abbe — zu erhalten. So entstanden das

Jochlinsen-Übermikroskop und das elektrostatische Übermikroskop.

Elektrostatisches Übermikroskop.

Die elektrische Linse (vgl. S. 16, 20—22) erlaubt den Bau relativ einfacher Elektronengeräte, weswegen sie im AEG Forschungs-Institut stets besonders gepflegt worden ist. Für das Übermikroskop wirkt sich der Einsatz der elektrischen Linse unter anderem darin aus, daß die Glättung der Hoch-

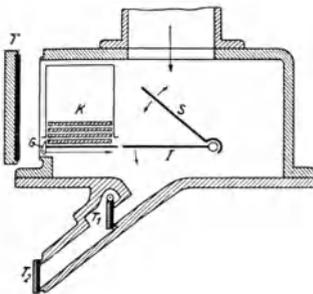


spannung um etwa den Faktor 100 kleiner sein kann als bei der magnetischen Linse, daß die Akkumulatorenbatterie zu dem Betrieb der letzteren fortfällt und daß die ohne Energieverzerung arbeitende elektrische Linse keiner besonderen Kühlung bedarf.

Der Aufbau des Abbildungs-Übermikroskops wurde auf der vorhergehenden Seite am Beispiel des elektrostatischen Übermikroskops (vgl. S. 28) erläutert. Es genügt daher, hier einige Einzelheiten über die Schleusen dieses Gerätes nachzutragen, an dessen technischer Gestaltung sich E. Gözl und H. Schliebe in besonderem Maße Verdienste erwerben.

Die Objektschleuse ist in ihrem Aufbau an die Gasschleuse des Luftschutzes angelehnt. In einer Schleusenkammer Z mit gummigedichteten Türen an beiden Seiten ist ein Greifer G drehbar angeordnet, wie es das obenstehende Bild zeigt. Bei geschlossener Innentür T_i wird der Objektträger in den Greifer eingehängt, der nach Schließen der Außentür T_a durch Öffnen von T_i selbständig in den Objektstisch gesenkt wird, mit dem er seitwärts hin und her bewegt werden kann. Selbständig anlaufende Pumpen sorgen dafür, daß bei dieser Einschleusung die Luft aus der Schleusenkammer Z nicht in das Mikroskop gelangt. Einzelheiten über den Objektträger und die Einschleusung zeigen die Bilder auf S. 93.

Die Plattenschleuse hat ihr Vorbild in den Streichholzautomaten. Aus einem großen Vorrat K — bei dem Mikroskop aus 24 Platten bestehend — kann Platte auf Platte einzeln durch einen Greifer G hervorgezogen und auf den Tisch I gebracht werden. Nach Belichtung wird die Platte aus dem Innern des Übermikroskops in üblicher Weise über eine Schleusenkammer herausgeschleust werden. Es geschieht das dadurch, daß die belichtete Platte einen schräg liegenden Schacht hinunterrutscht. Dieser Schacht ist durch gummigedichtete Türen unterteilt, so daß die notwendige Schleusenkammer wie bei der Objektschleuse entsteht. Die Schleuse wird durch einen einzigen Hebel bedient, der eine Welle dreht, von der aus alle erforderlichen Vorgänge gesteuert werden.

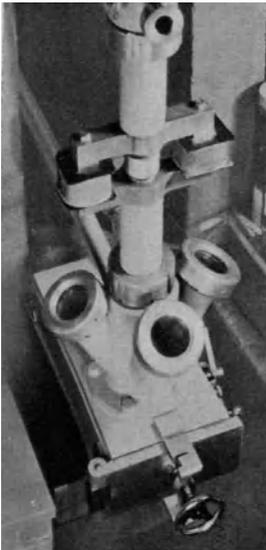


Magnetisches Jochlinsen-Übermikroskop.

Der Strahlengang des magnetischen Übermikroskops gleicht wie der des elektrostatischen Übermikroskops dem des Licht-Projektionsmikroskops. An die Stelle der Glaslinsen bzw. der elektrischen Linsenfelder sind jetzt magnetische Linsenfelder getreten. Dadurch sind die bekannten, S. 17 behandelten Eigenarten der Bild Drehung bedingt.

Als Elektronenlinsen verwendet man starke rotationssymmetrische magnetische Felder, die zwischen durchbohrten Eisenpolschuhen entstehen. Der magnetische Kraftfluß für die rotationssymmetrischen Polschuhe wird entweder durch eine Spule, die um den Strahlengang gelegt ist, oder durch eine oder mehrere Spulen seitwärts vom Strahlengang erzeugt. Im ersten Fall erhält man die von E. Ruska ausgebildete Form des magnetischen Übermikroskops, das durch v. Borries und Ruska bei den Siemens-Werken zu hoher Vollendung entwickelt wurde und das auch v. Ardenne in konstruktiver Abwandlung benutzt. Im zweiten Falle entsteht das Jochlinsen-Übermikroskop nach Kinder, Pendzich und Steudel [112]. Hier werden zwei symmetrisch zum Strahl sitzende Spulen zur Erregung des magnetischen Feldes verwendet.

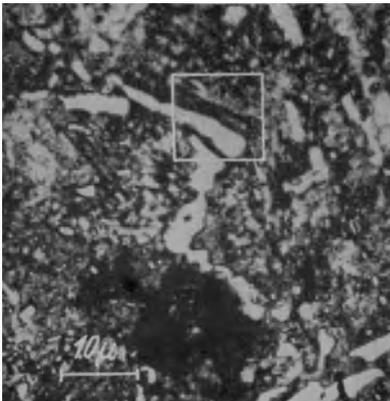
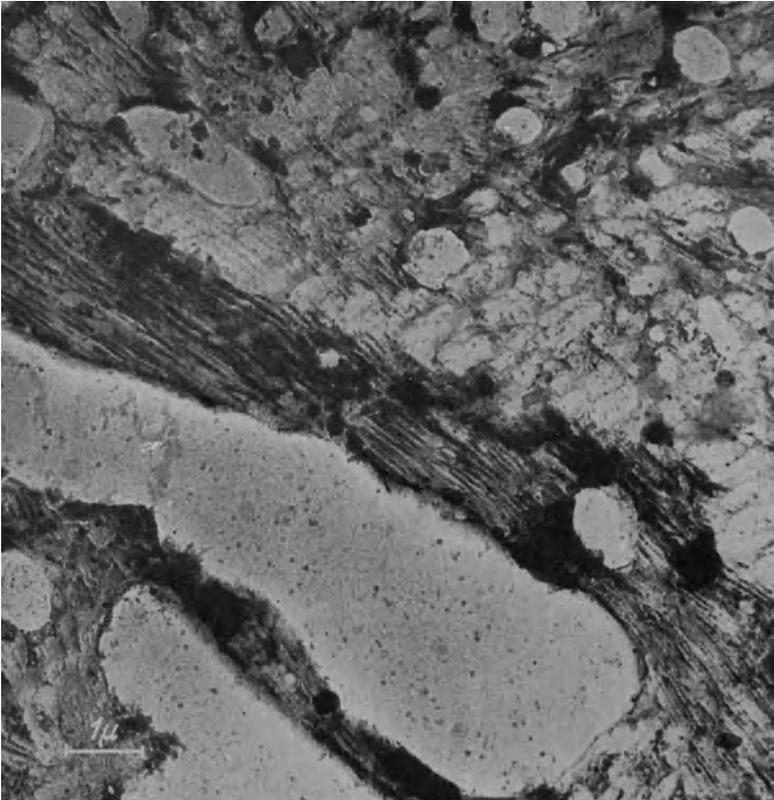
Die Jochlinse hat gegenüber der rotationssymmetrischen Form den Vorteil, daß das Objekt nicht von der Magnetspule umschlossen wird. Daher ist es leicht von außen erreichbar, was für den Objektwechsel von Bedeutung ist, und wird nicht durch die Spule unnötig erhitzt, d. h. die Kühlungsfrage ist leichter lösbar. Die sonstigen Eigenarten hat auch das Jochlinsen-Mikroskop mit anderen magnetischen Mikroskopen gemeinsam. Hier wie dort sind hohe Spannungs Konstanz, besondere Stromquelle für die Linsenspulen (Akkumulatorenbatterie) und Spulenkühlung erforderlich.



Nebenstehende Abbildung zeigt den unteren Teil des Jochlinsenmikroskops, das als Ganzes S. 28 abgebildet ist. Auf dem hier wiedergegebenen Ausschnitt ist die Projektions-Doppeljochlinse mit ihren beiden seitwärts angeordneten Spulen und die Plattenschleuse zu erkennen. Bei letzterer wird jeweils eine einzelne Platte in einer Kassette ein- und ausgeschleust im Gegensatz zu der bei dem elektrischen Mikroskop getroffenen Einrichtung mit größerem Vorrat (s. Gegenseite).

Für die folgenden magnetischen Aufnahmen wurde das Jochlinsen-Mikroskop vorwiegend mit Spannungen unter 100 kV benutzt; es sind in Einzelfällen Spannungen von 135 kV angewandt worden. Die Strahlung zeigt dann stärkere Durchdringungsfähigkeit, so daß auch in dichteren Objektteilen noch Einzelheiten erkennbar sind, während feine Einzelheiten in dünnen Partien entsprechend verschwinden (vgl. S. 114).

Vergleich: Lichtbild — Elektronenbild.



Härtegefüge von Stahl.

Das nebenstehende lichtoptische Mikrobild zeigt das Härtegefüge eines Stahls in 1000 facher Vergrößerung, während das obenstehende Bild ein 10 fach so hoch vergrößertes übermikroskopisches Abdruckbild von der auf dem Mikrobild umrandeten Stelle wiedergibt. Der Vergleich der Bilder läßt besonders an der Wiedergabe der sehr feinen Streifenstruktur in der Umgebung des hellen Balkens die erhebliche Überlegenheit der übermikroskopischen Abbildung erkennen.

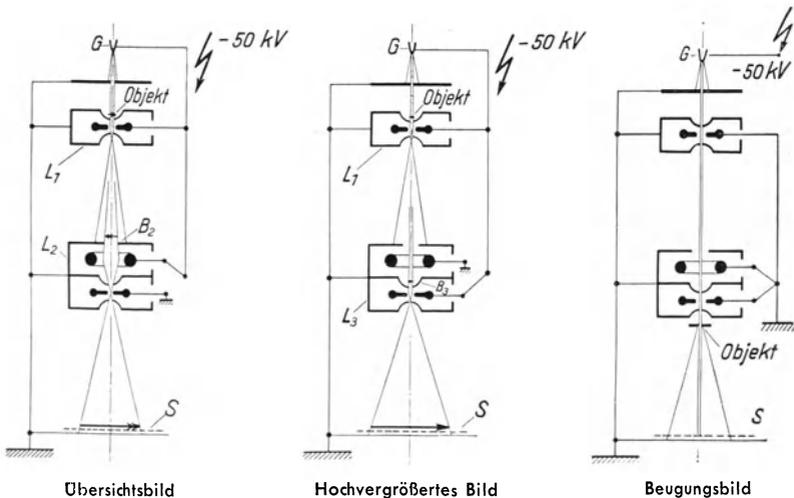
Mahl. Elektr. Aufn. (Lackabdruck).
Vergr.: 10 000 fach.

VI. Technik der Durchstrahlungs-Übermikroskopie.

Elektronenstrahlen unterscheiden sich in den Eigenschaften, die für die Bild-erzeugung maßgebend sind, wesentlich von den Lichtstrahlen. Da es etwas Entsprechendes wie das für Licht durchlässige Glas nicht gibt, gibt es auch keinen Objektträger im optischen Sinne. In der Übermikroskopie werden die Objekte entweder freitragend auf einem sehr feinen Netz oder über eine Blende von z. B. 0,1 mm Durchmesser aufgespannt (Rauchpartikeln, Fasern) oder auf einen interferenzlos dünnen Lack- oder Oxydfilm aufgestäubt bzw. aufgetrocknet (s. die folgenden Seiten).

Die geringe Durchdringungsfähigkeit der Elektronenstrahlen erfordert bei kompakten Objekten besondere Präparationsverfahren, die auf die Herstellung feinsten Zerteilungen bzw. durchstrahlbarer Folien abzielen. So lassen sich z. B. Zellulosefasern durch Zermahlen oder Zerquetschen in eine für die Untersuchung geeignete feine Form bringen (vgl. S. 102). Oberflächen von kompakten Materialien können auf dem Umweg über einen dünnen Abdruckfilm, der nach dem Ablösen die Oberflächenform beibehält, mit dem Durchstrahlungsmikroskop abgebildet werden.

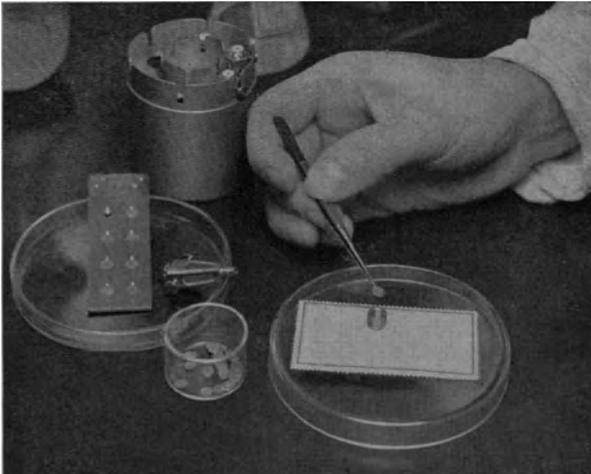
Trotz des hohen Auflösungsvermögens des Übermikroskops wird nicht in allen Fällen eine vollständige Analysierung der Objekte gelingen, selbst wenn sie in einer für die Abbildung günstigen Form vorliegen. Dies gilt besonders für ihren Gitteraufbau, dessen Analysierung nach wie vor der Elektronen- oder Röntgenbeugung vorbehalten bleibt. Um derartige Ergänzungsbildungen an demselben Objekt durchzuführen, kann das elektrostatische Übermikroskop mit einer Elektronenbeugungseinrichtung versehen werden. Zur Durchführung der Beugungsaufnahmen (Boersch) wird das Objekt bei abgeschalteten Linsen unterhalb der Projektionsoptik in den Strahlengang geschleust (vgl. S. 79—83).



Vorbereitung eines Objektes.

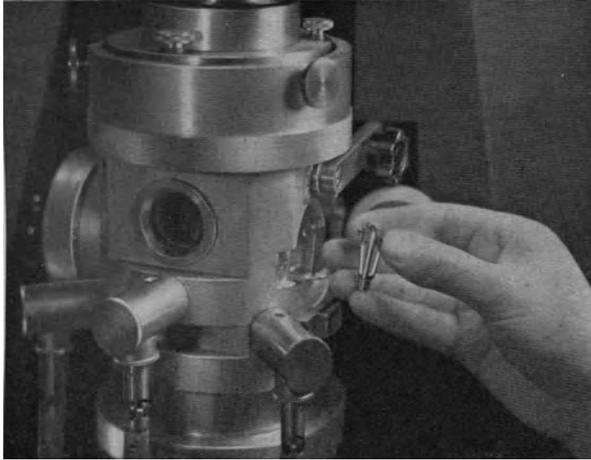


Ein Tropfen von Zaponlack ist auf Wasser getropft worden und hat sich zu einer sehr feinen Haut verteilt. Gerade soll der Objektträger unter die Zaponhaut geschoben werden, so daß beim Herausheben der Trägerplatte alle 8 Plättchen, die in der Mitte eine feine Öffnung tragen, mit dem Häutchen überzogen sind.

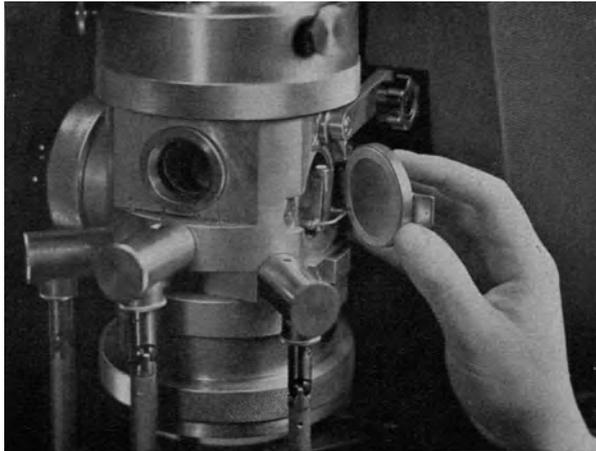


Auf ein Trägerplättchen mit dem über die zentrale Öffnung gespannten Häutchen ist das Objekt (z. B. Bakterien in Wasser) gebracht worden. Das Plättchen wird nun in die abgeschraubte Kappe des Objekthalters eingelegt.

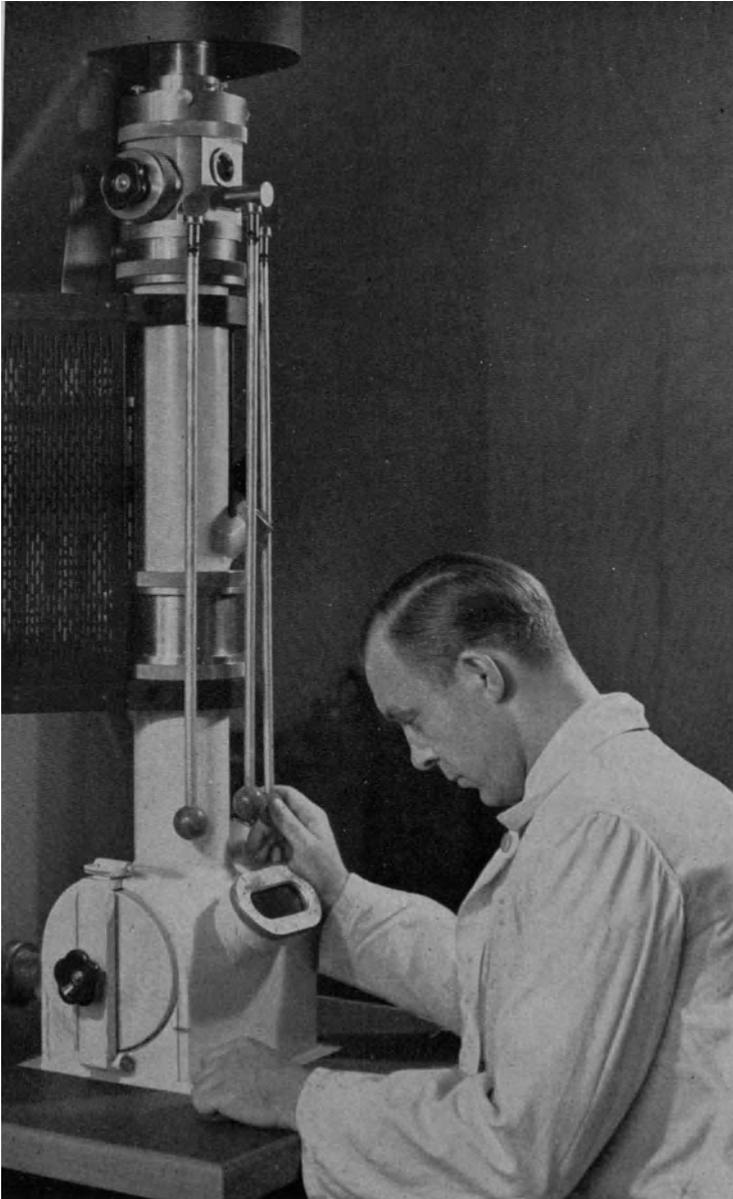
Einschleusen des Objektes.



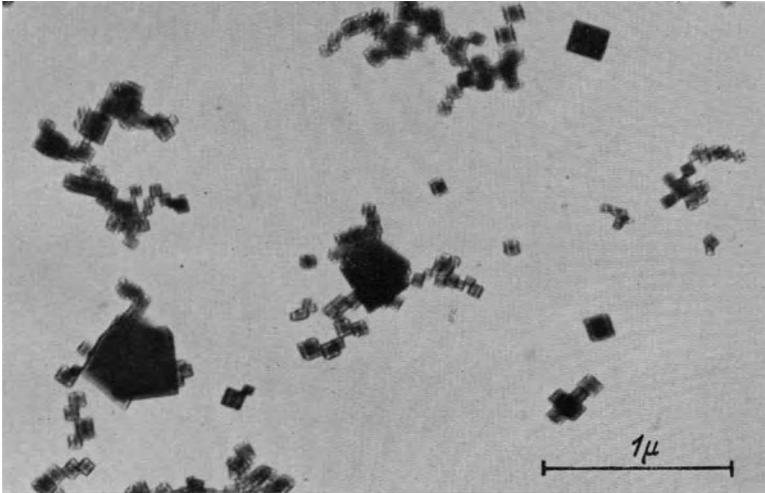
Die Tür der Objektschleuse ist geöffnet worden, so daß eine Gabel zum Vorschein kommt. In diese Gabel wird nun der Objekthalter mit dem am unteren Ende befindlichen Objekt eingehängt.



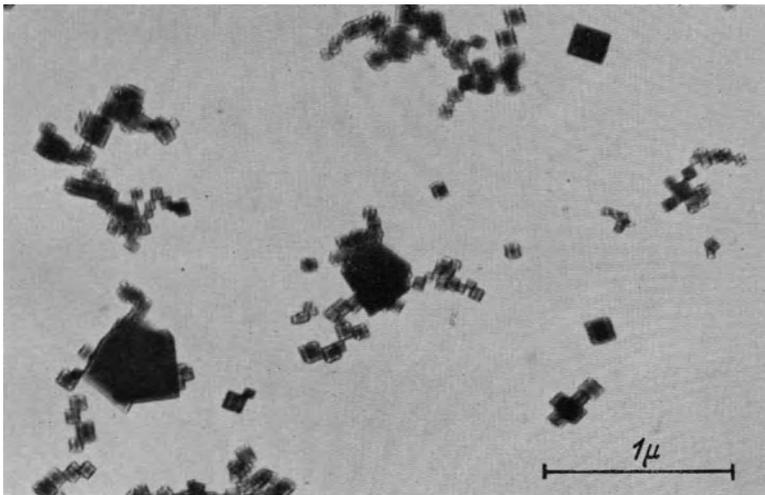
Nach Schließen der Schleusentür wird der Objekthalter durch einen Drehknopf an der linken Schleusenwand in den Kreuztisch gesenkt, so daß das Objekt nun dicht vor dem Elektronenobjektiv liegt.



Scharfstellung des Elektronenbildes.

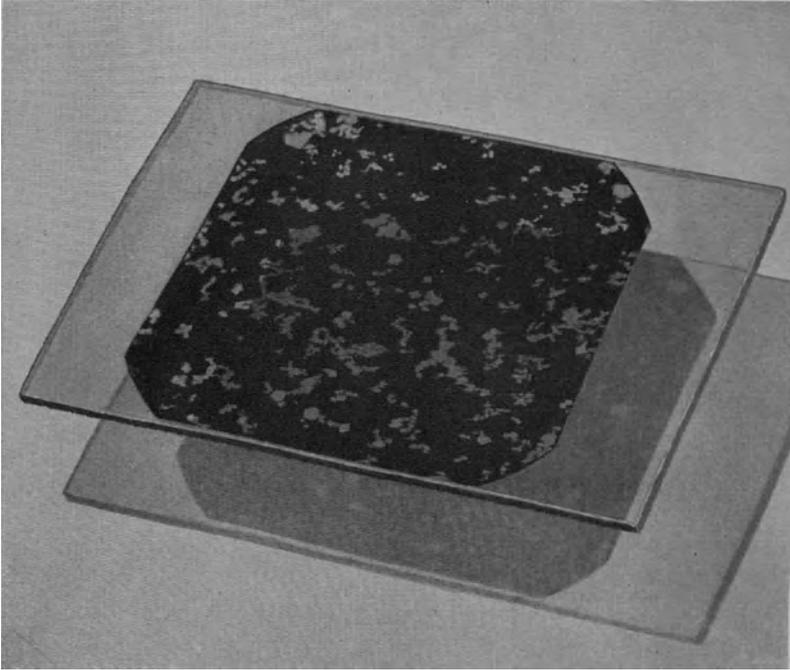


Von den drei auf nebenstehendem Bild zu erkennenden, hängenden Stäben, die die Objekteinstellung vermitteln, dienen die beiden äußeren zur Seitenverschiebung (Bildfeldeinstellung), der mittlere zur Höhenverstellung (Scharfeinstellung). Ist das Objekt nicht in richtiger Höhenlage gegenüber dem darunterliegenden Objektiv, so zeigen die Umrisse der Objekte im Bild doppelte Konturen.



Ist das Objekt in richtige Stellung zur Elektronenlinse gebracht, so sind die doppelten Konturen verschwunden.

Aufnahme des Elektronenbildes.



Negativ einer übermikroskopischen Aufnahme.

Unter dem Leuchtschirm, auf dem das Elektronenbild beobachtet wird (vgl. S. 87—89, 94), liegt die Fotoplatte. Zur Aufnahme des Bildes wird der Leuchtschirm kurzzeitig fortgedreht, so daß die Elektronen einige Sekunden auf die fotografische Schicht fallen. Die Platte wird nun aus dem Übermikroskop entfernt und wie üblich entwickelt.

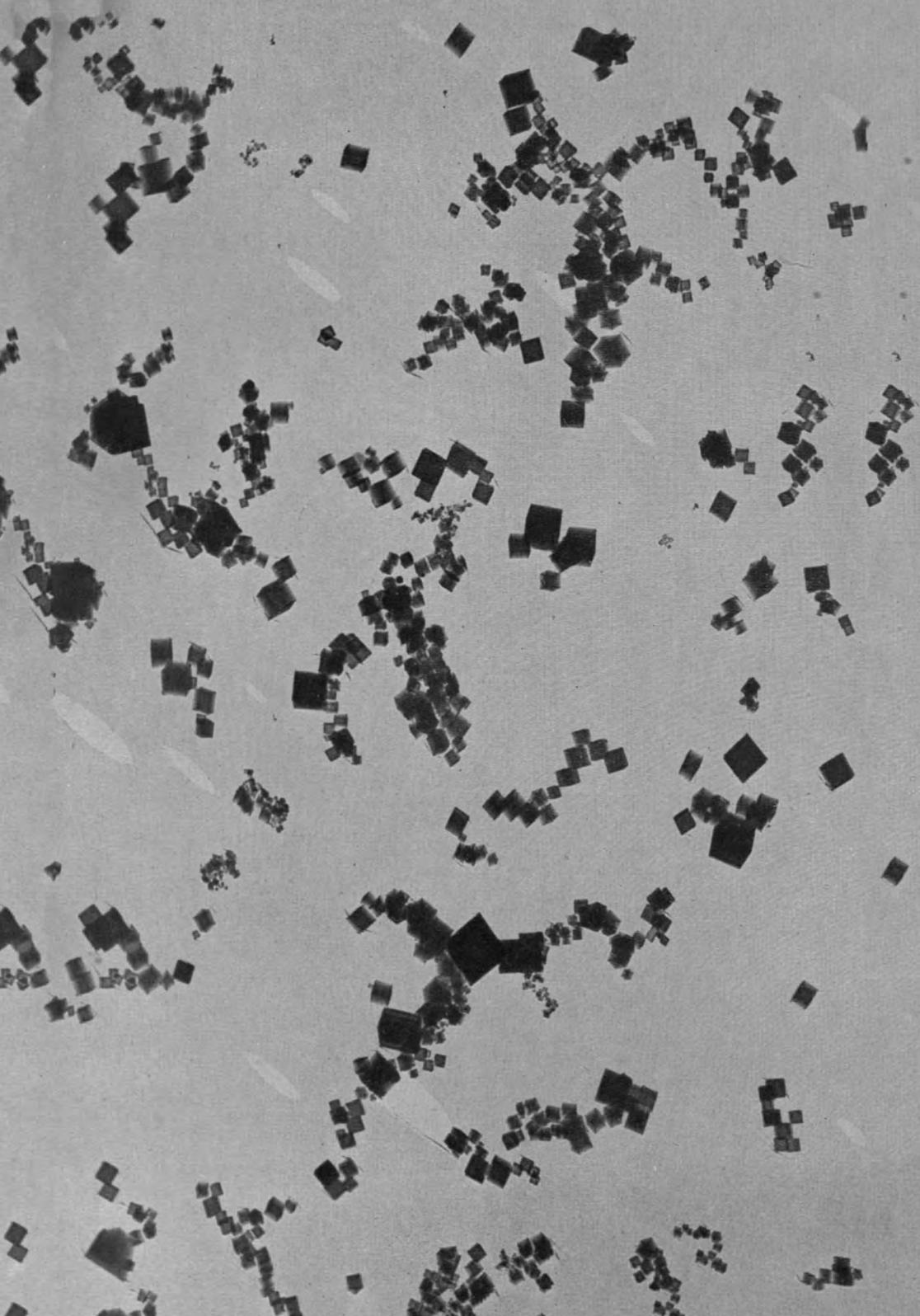
Zum schnellen Plattenwechsel dient die Plattenschleuse. Bei dem elektrostatischen Mikroskop wird nach Herunterklappen des auf dem Bild S. 94 links zu erkennenden Deckels eine Kassette mit 24 Platten in das Gerät eingeschoben. Die Entnahme der einzelnen Platten aus der Kassette und die Ausschleusung aus dem Hochvakuum erfolgt — ohne daß die mikroskopische Beobachtung unterbrochen wird — durch einen Mechanismus, den der Beobachter durch Heben und Senken des Bedienungshebels betätigt (s. S. 29). Bei jedem Herausziehen des Hebels erfolgt eine der notwendigen Maßnahmen. Nach sechsmaliger Betätigung ist die Platte ausgeschleust und eine neue Platte unter den Leuchtschirm gebracht. So können Aufnahmen in Abständen von weniger als einer Minute aufeinander folgen (vgl. auch S. 88).

Die Aufnahme des Elektronenbildes wird bei dem elektrostatischen Übermikroskop entweder in 1000-, 3000- oder 10 000 facher Vergrößerung vorgenommen, bei dem Jochlinsen-Übermikroskop kann auch höhere Vergrößerung zur Anwendung kommen. Die sehr scharfen Bilder können dann auf die förderliche Vergrößerung lichtoptisch nachvergrößert werden, wobei man Bilder großen Gesichtsfeldes erhält (vgl. auch die Seiten 36 und 37).

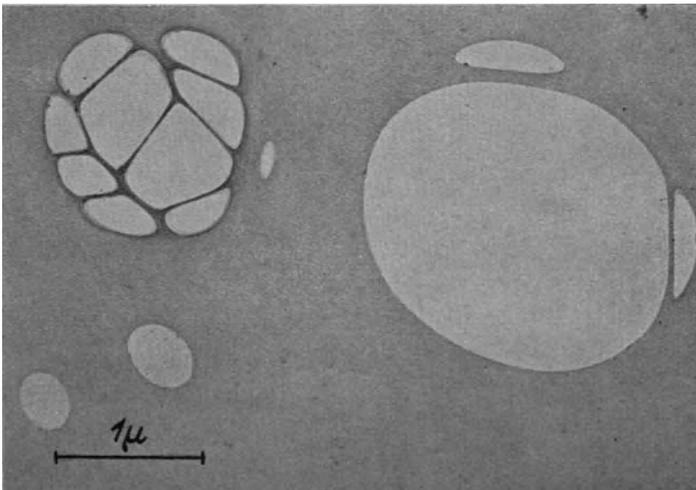
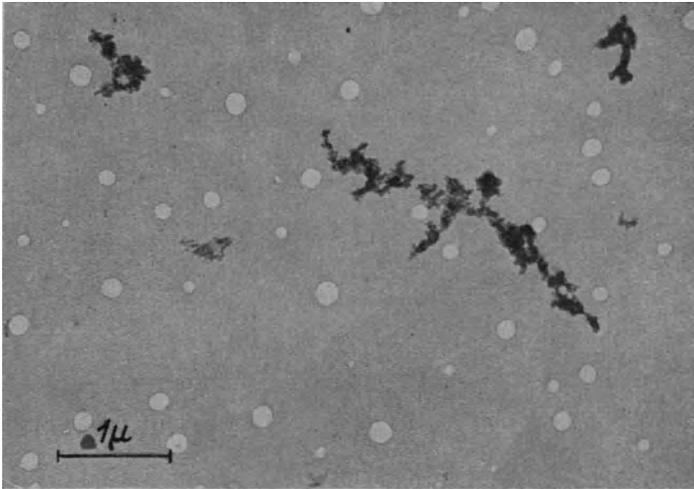
(Bild rechts)

Magnesiumoxyd-Kristalle.

Nachvergrößerter Ausschnitt aus der oben abgebildeten Platte.
Vergr.: 25 000 fach.



Präparation: Objektträgerfolie.



Zaponfolie mit Löchern.

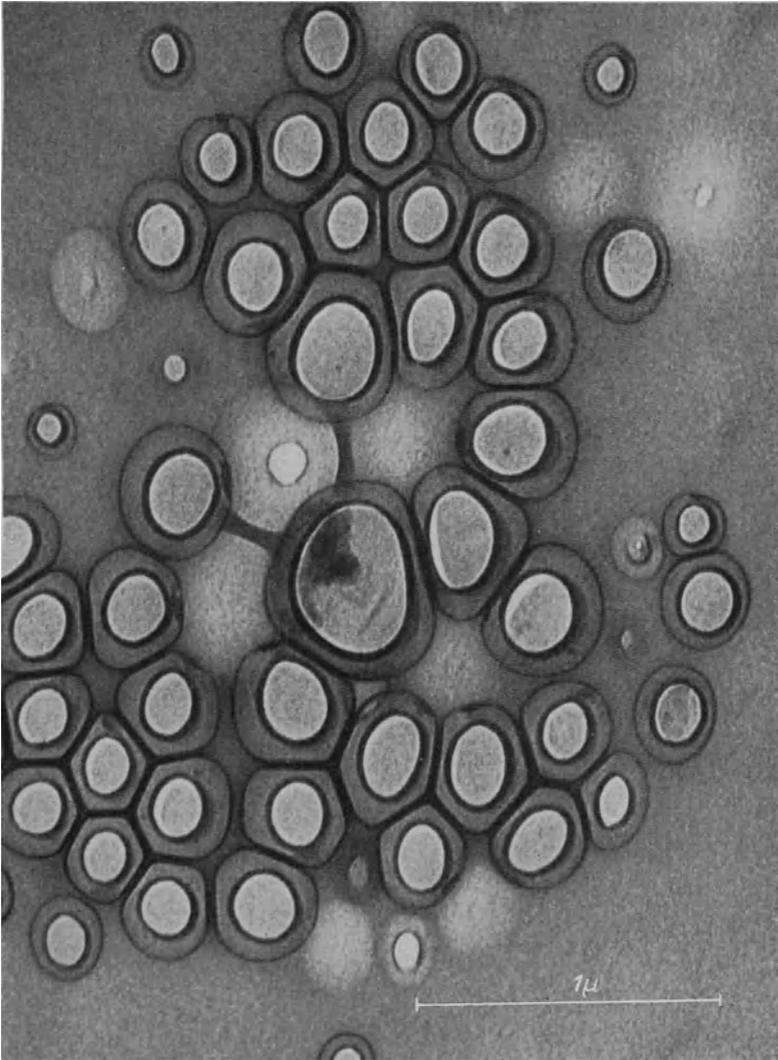
Die häufigste Fehlerscheinung bei Zapon-Trägerfolien sind Löcher. Es kommen Löcher ganz verschiedener Größe vor, die sich oft während der Bestrahlung bilden oder vergrößern. Dabei entstehen gelegentlich größere Öffnungen mit Zwischenstegen, wie sie das untere Bild erkennen läßt.

Gözl [148].
Kinder [148].

Elektr. Aufn.
Magnet. Aufn.

Vergr.: 14 000 fach.
Vergr.: 19 000 fach.

Präparation: Objektträgerfolie.



Zaponfolie mit Blasen.

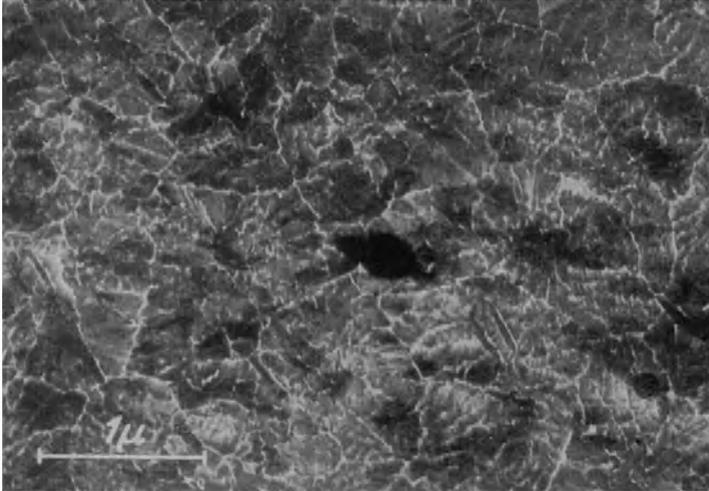
Außer Rissen, Falten und Löchern, wie sie z. T. auch die Bilder der Gegenseite zeigen, sind gelegentlich Blasen zu beobachten. Einen solchen Fall läßt unser Bild erkennen, wobei die Mehrzahl der Blasen außerdem einseitig aufgerissen zu sein scheint. Die feine Struktur gehört nicht der Folie selbst an, sondern rührt von einem aufgedampften Metallniederschlag her (vgl. S. 144/145).

Kinder [136].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 40 000 fach.

Untersuchungstechnik: Dicke Objekte.



Sehr dicke Folie.

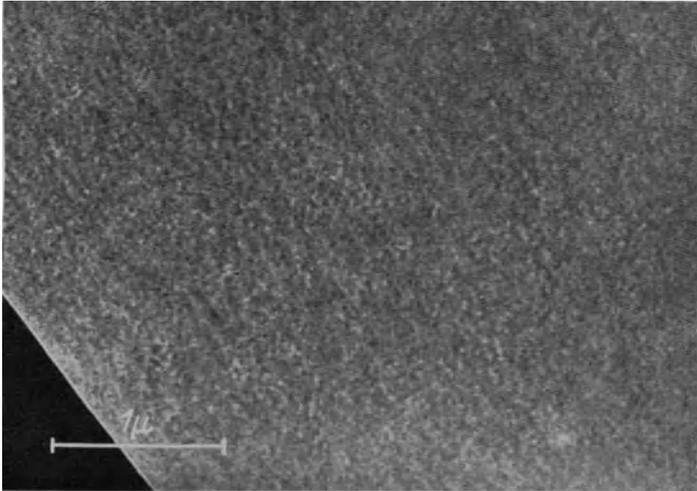
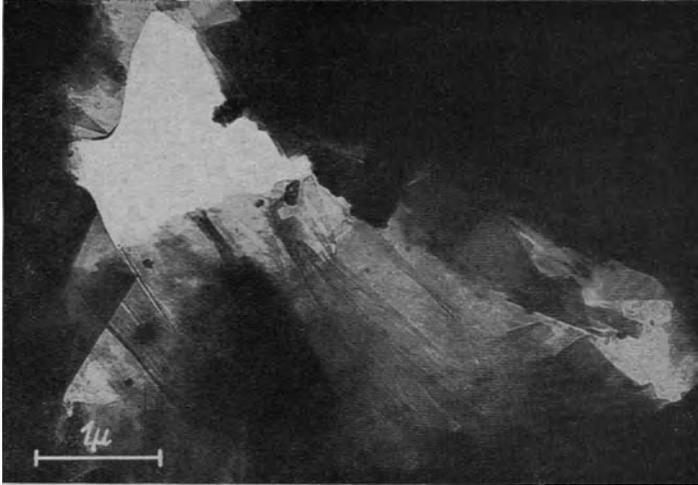
Schichten über 0,0001 mm Dicke sind nicht ohne weiteres im Durchstrahlungs-Mikroskop abbildbar. Häufig sind jedoch in solchen Schichten dünnere Stellen oder Risse vorhanden wie auf den beiden Bildern, von denen das obere Bild einen Aluminium-Oxydfilm, das untere einen Nickel-Oxydfilm wiedergibt (vgl. S. 115).

Mahl.
Kinder.

Elektr. Aufn.
Magnet. Aufn.

Vergr.: 21 000 fach.
Vergr.: 5000 fach.

Untersuchungstechnik: Dicke Objekte.



Präparation von Graphit und Kunststoffen.

Bei festen Körpern wird man zunächst versuchen, durch Zerteilungsmethoden genügend dünne Objektbruchstücke zu erhalten. So ergibt z. B. Graphit (oberes Bild) beim Zerstoßen im Mörser dünne durchstrahlbare Plättchen. Eine andere Möglichkeit ist das Aufblähen einer geschmolzenen Substanz zu sehr feinen Häuten, wie es bei manchen hochpolymeren Kunststoffen, z. B. Lupamid (unteres Bild), gelingt.

Mahl [148].

Elektr. Aufn.

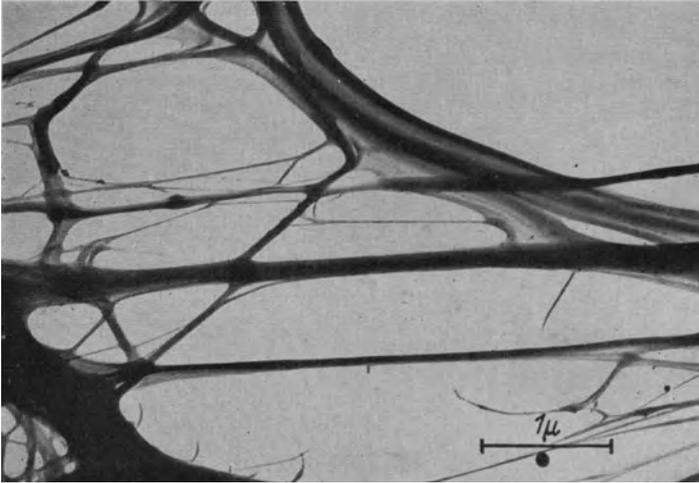
Vergr.: 18 000 fach.

Mahl v. Nümann [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 23 000 fach.

Untersuchungstechnik: Dicke Objekte.



Präparation von Zellulosefasern.

Für die übermikroskopische Abbildung von undurchstrahlbaren Objekten muß das Objekt in geeigneter Weise präpariert werden. Bei der Untersuchung von Zellulosefasern hat sich sowohl eine Zermahlung im Mörser oder in der Kugelmühle (oberes Bild) als auch eine Quellung mit nachfolgender Quetschung bewährt (unteres Bild).

Mahl [136].

Elektr. Aufn.

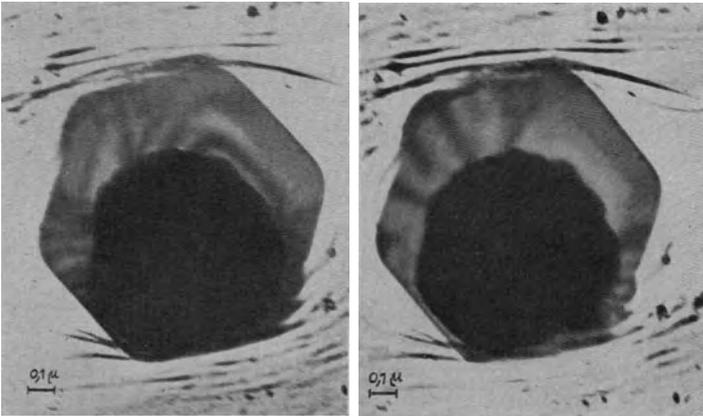
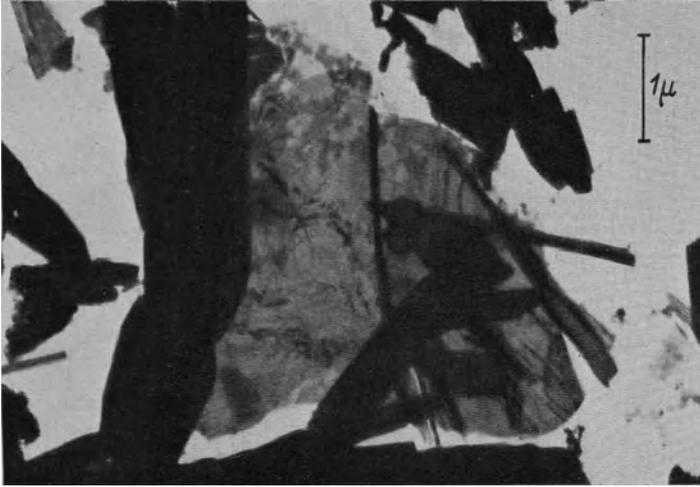
Vergr.: 19 000 fach.

Kinder u. Kuhn [148].

Magn. Aufn.

Vergr.: 12 000 fach.

Untersuchungstechnik: Vorgetäuschte Strukturen.



Strukturen bei Kristalllamellen.

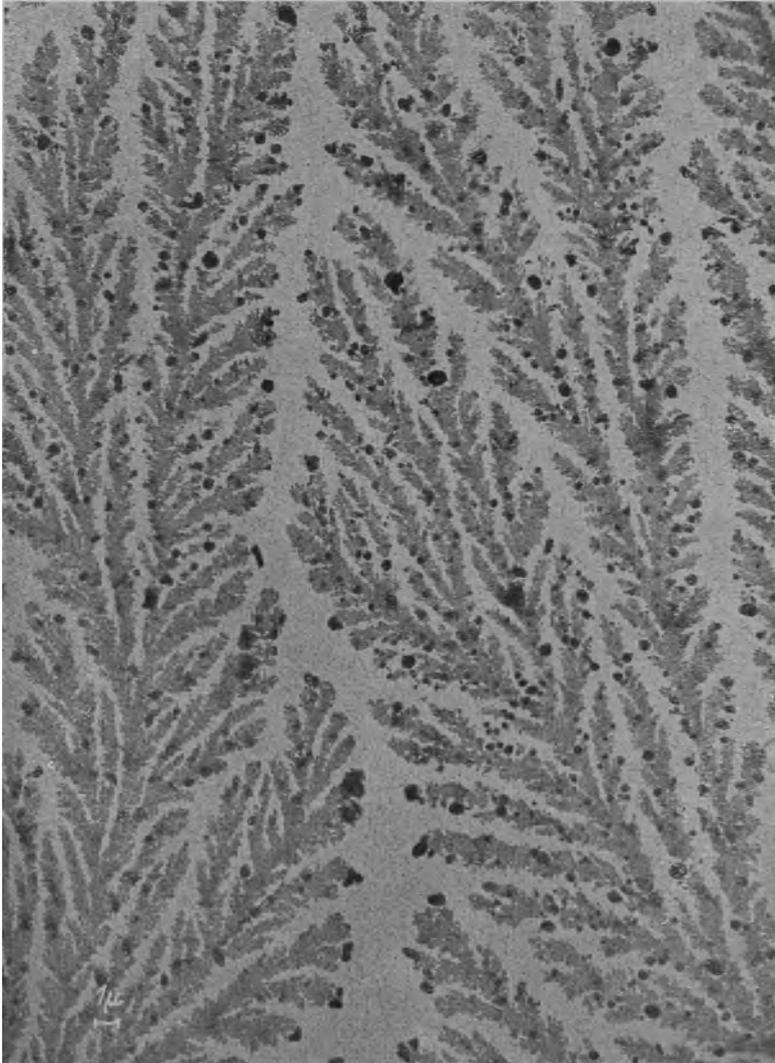
An kristallinen Lamellen zeigen sich gelegentlich streifige Strukturen. Die Streifen verschieben sich, wenn sich — wie bei der Stereoaufnahme des unteren Bildes — die Lage der Lamelle zur Durchstrahlungsrichtung ändert. Die Erscheinung wurde durch Boersch in Zusammenhang gebracht mit der von ihm nachgewiesenen Mehrdeutigkeit der Schwärzungsstruktur bei kristallinen Objekten [65, 68]. Die dunklen Streifen entstehen danach durch Schwächung des Primärstrahls infolge Reflexion an Kristallgitterflächen, die zufällig in Reflexionslage stehen. Infolge der Verbiegung des Kristallplättchens treten mehrere Streifen auf, die je nach der Lage des Kristallplättchens zum Strahl anders liegen.

Kinder [141].
Gözl.

Magnet. Aufn.
Elektr. Aufn.

Vergr.: 14 000 fach,
Vergr.: 40 000 fach.

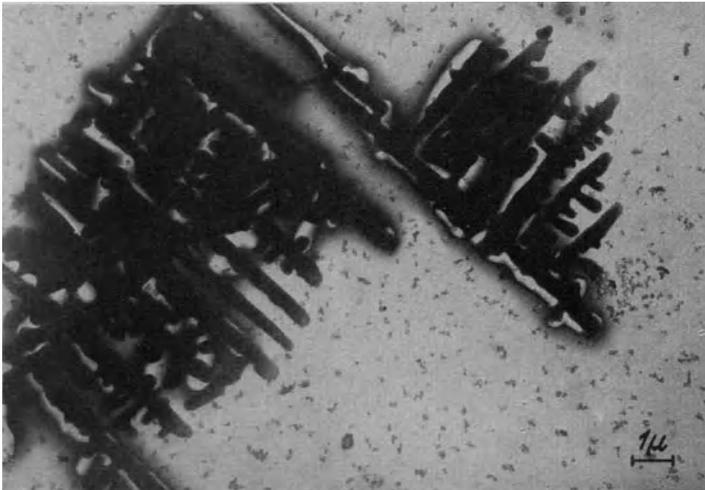
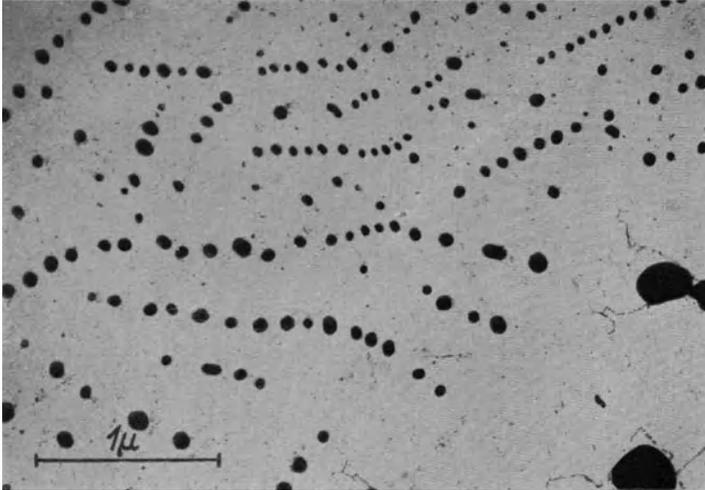
Untersuchungstechnik: Verunreinigung.



Unreines Präparat.

Da man beim Übermikroskop heute noch in weitgehend unbekanntem Gebieten arbeitet, ist bei der Deutung der Aufnahmen größte Vorsicht geboten. Unser Bild zeigt ein Beispiel dafür, wie Verunreinigungen den eigentlichen Effekt fast vollständig zu überdecken vermögen. Das Präparat war von einer Viruskultur auf der Haut eines Hühneris gewonnen. Beim Eintrocknen des Eiweißes ergaben sich die farnkrautähnlichen Verästelungen, wie sie das Bild zeigt. Götz u. Volmer [148]. Elektr. Aufn. Vergr.: 4000 fach.

Untersuchungstechnik: Verunreinigungen.



Unreines biologisches Präparat und Metallfläche.

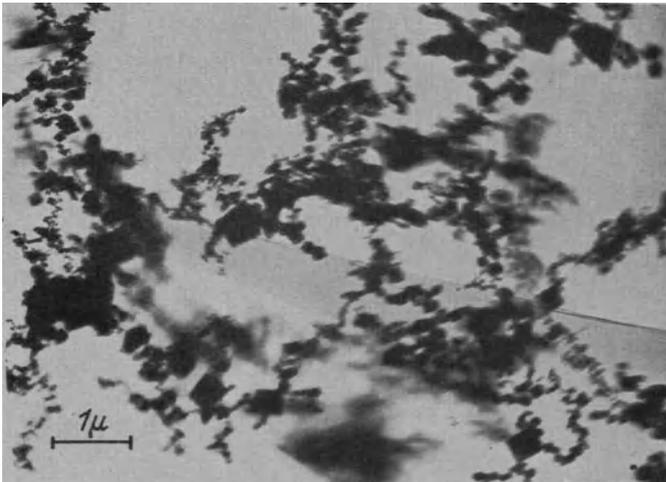
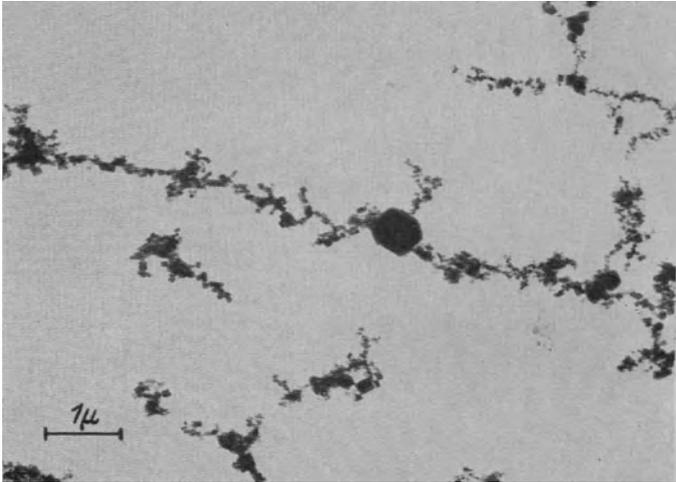
Nicht nur bei biologischen Präparaten (oberes Bild), bei denen Flüssigkeiten in Tropfenfolgen eintrocknen können, werden Strukturen vorgetäuscht, sondern auch bei Oberflächenabbildungen von Metallen (unteres Bild) treten gelegentlich Erscheinungen auf, die mit größter Vorsicht gedeutet werden müssen.

Götz u. Volmer [148]
Mahl.

Elektr. Aufn.
Elektr. Aufn.

Vergr.: 24 000 fach,
Vergr.: 6 000 fach.

Untersuchungstechnik: Aufladungserscheinungen.



Magnesiumoxyd-Rauch im elektrischen Feld.

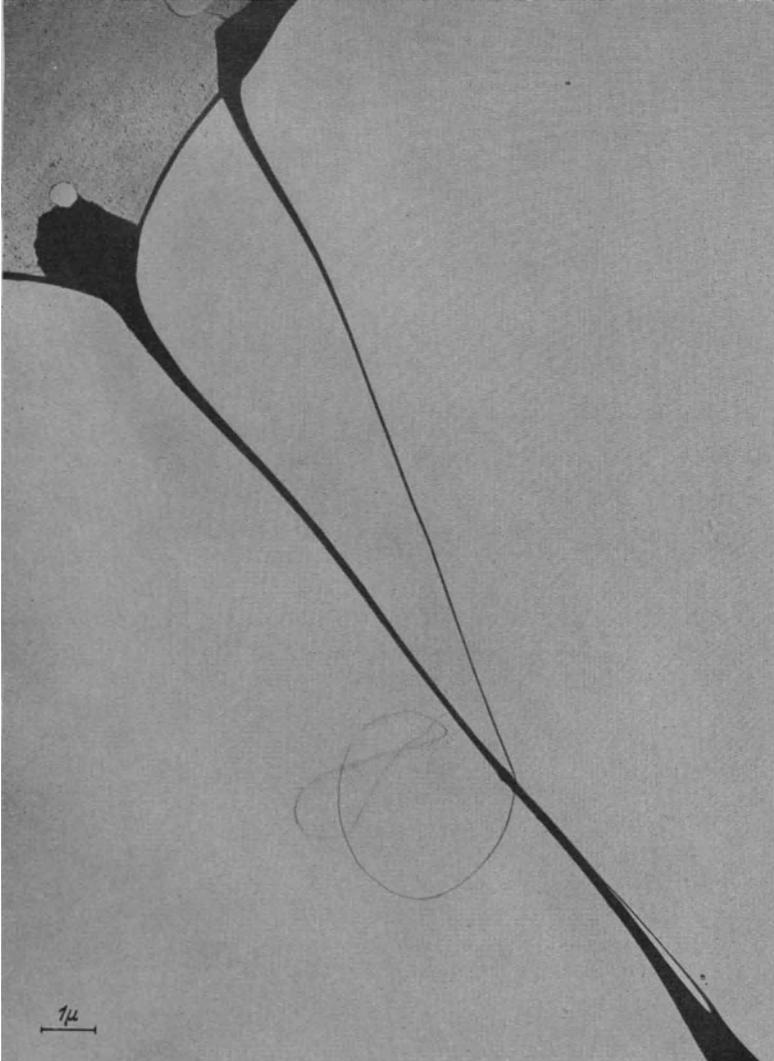
Die Feldwirkungen bei den beiden Bildern von Magnesiumoxyd-Rauch, der sich aus verbrennendem Magnesium auf dem Zaponträger niederschlug, sind ganz verschiedenartig: Bei der oberen Aufnahme war der Träger auf mehrere tausend Volt gegenüber der Flamme aufgeladen, so daß die Kriställchen im elektrischen Feld polarisiert wurden und sich in Ketten in Richtung der Kraftlinien niederschlugen. Die untere Aufnahme zeigt eine Flocke, die sich auf dem Träger ungestört aus dem Luftraum abgesetzt hatte. Das lockere Gebilde beginnt bei stärkeren Strahlströmen unter der Wirkung der Aufladung an freischwebenden Bezirken zu schwingen, was zu örtlichen Unschärfen führt.

Kinder [148].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 10 000 fach.

Untersuchungstechnik: Elektronenschäden.



Zellstoff-Fäden.

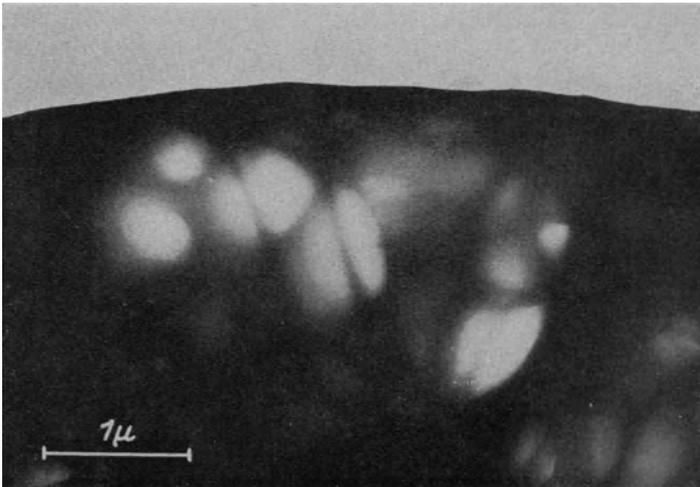
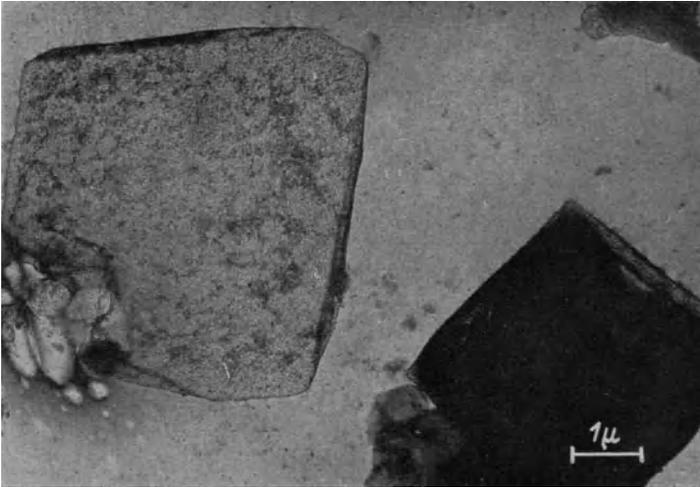
Bei sehr starker Bestrahlung riß die Trägerfolie und der plastisch gewordene Zellstoff zog sich in dünnen Fäden auseinander. Das Ende des zerrissenen Fadens in der Mitte des Bildes schwingt, wie es an den scharfen Knoten und den unscharfen Schwingungsbäuchen erkennbar ist. (Das Bild ist aus mehreren Einzelaufnahmen zusammengesetzt.)

Gözl.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 7500 fach.

Untersuchungstechnik: Elektronenschäden.



Strukturveränderung bei Salz und Zellulose.

Die Bilder zeigen zwei Beispiele für die Schädigung empfindlicher Objekte durch zu starke Elektronenbestrahlung. Das obere Bild läßt links einen durchscheinenden Kochsalzkristall erkennen, der bei Beginn der Beobachtung wie der Kristall rechts undurchlässig war, dann aber allmählich durchsichtig wurde. Das untere Bild zeigt ein Hohlraumsystem in einer Kunstseidefaser, das man als Struktureigentümlichkeit zu deuten geneigt ist, das aber in Wirklichkeit (s. Gegenseite) auf Elektronenschädigung zurückzuführen ist.

Kinder [141].

Magnet. Aufn.

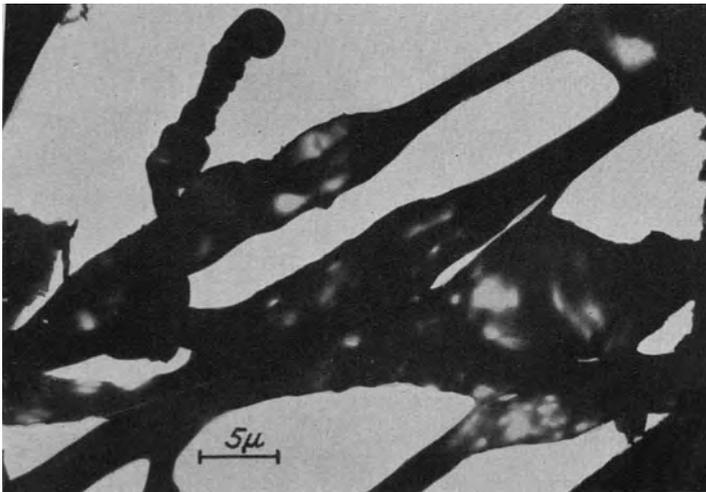
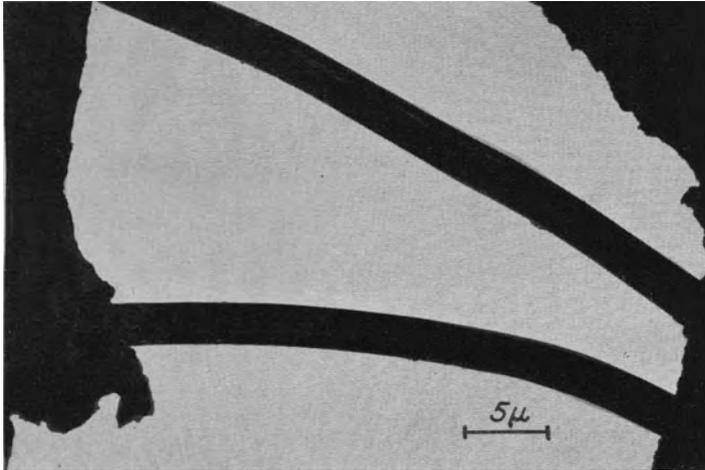
Vergr.: 10 000 fach.

Mahl [142].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 19 000 fach.

Untersuchungstechnik: Elektronenschäden.



Aufblähungen von Zellulosefasern.

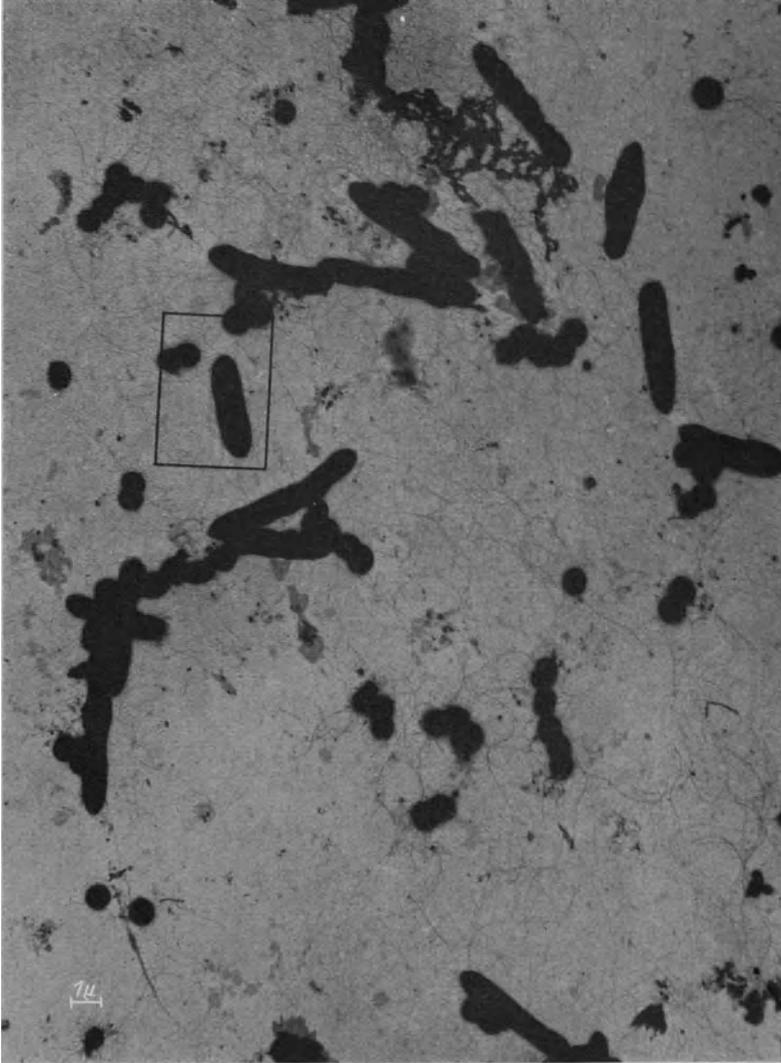
Beobachtet man Kunstseidefasern im Übermikroskop bei kleiner Bestrahlungsintensität, so erhält man das Konturenbild der Fasern (oberes Bild). Bei stärkerer Bestrahlung beobachtet man dann die Aufblähung und das Verschmelzen der Fasern (unteres Bild). — Diese Beobachtungen lassen sehr deutlich erkennen, mit welcher Vorsicht übermikroskopische Beobachtungen vorgenommen werden müssen und wie leicht beim Übersehen von Elektronenschädigungen falsche morphologische Schlüsse gezogen werden können.

Mahl [142].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 2000 fach.

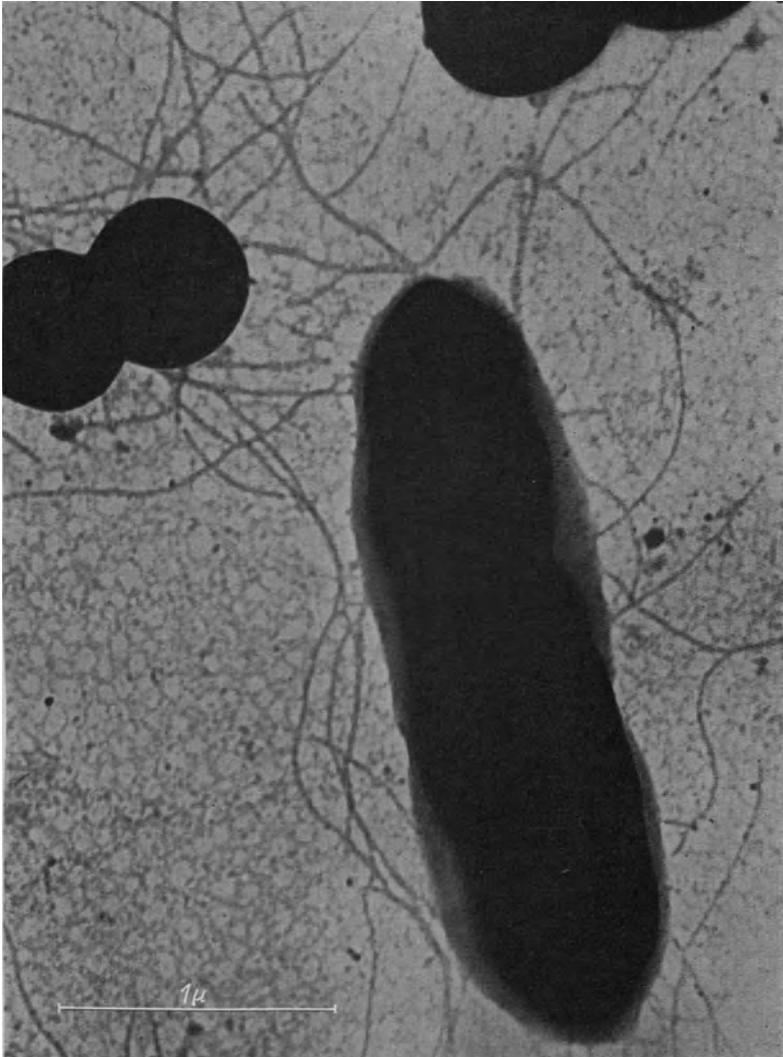
Methodik: Vergrößerungswahl.



Übersichtsaufnahme von Bakterien.

Das Bild ist in 1000 facher Vergrößerung mit dem elektrostatischen Übermikroskop aufgenommen und $4\frac{1}{2}$ mal lichtoptisch nachvergrößert. Es zeigt Tetanomorphus-Bakterien (die stäbchenförmigen Gebilde mit Geißeln) und Eiterkokken (Staphylokokken).
Jakob und Mahl [119]. Elektr. Aufn. Vergr.: 4500 fach.

Methodik: Vergrößerungswahl.



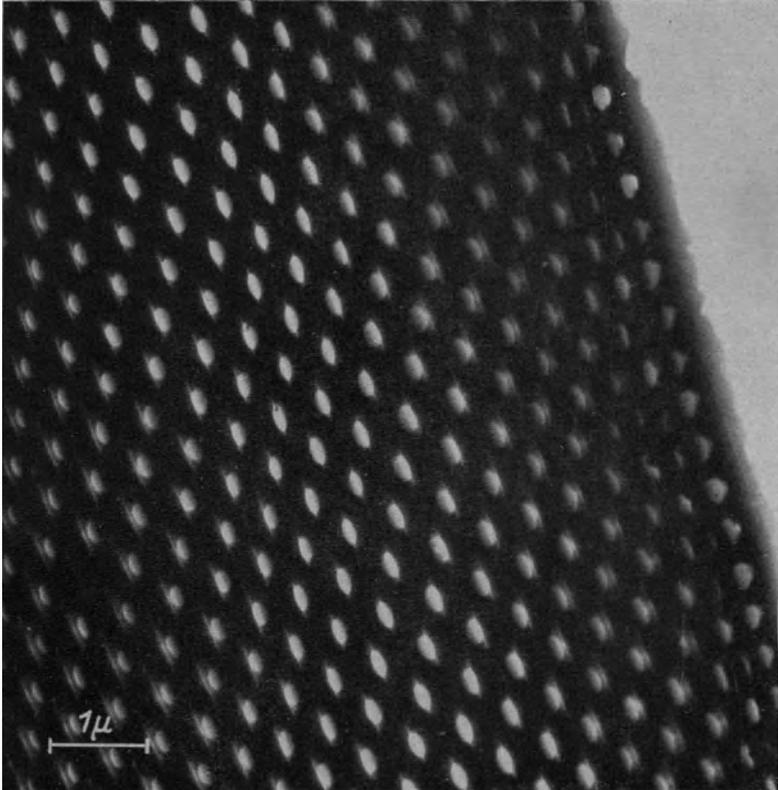
Einzelbakterien in hoher Vergrößerung.

Der umrandete Bezirk des Übersichtsbildes auf der Gegenseite ist hier durch Einschalten der hohen Vergrößerungsstufe des elektrostatischen Übermikroskops rund 10 fach weitervergrößert. Jetzt erkennt man z. B., daß die Eiterkokken von weniger als einen Tausendstel Millimeter Durchmesser eine sehr regelmäßige Kugelform mit sehr scharfer Umgrenzung haben. Auch dieses Bild ist mehrfach lichtoptisch nachvergrößert.

Jakob und Mahl [119].

Vergr.: 37 000 fach.

Methodik: Dunkelfeld.

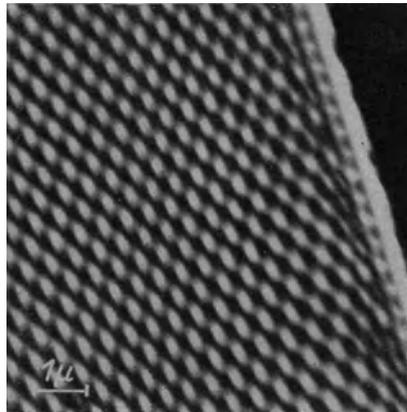


Hell- und Dunkelfeldbild einer Diatomee.

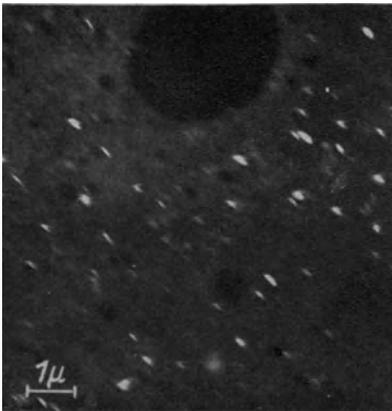
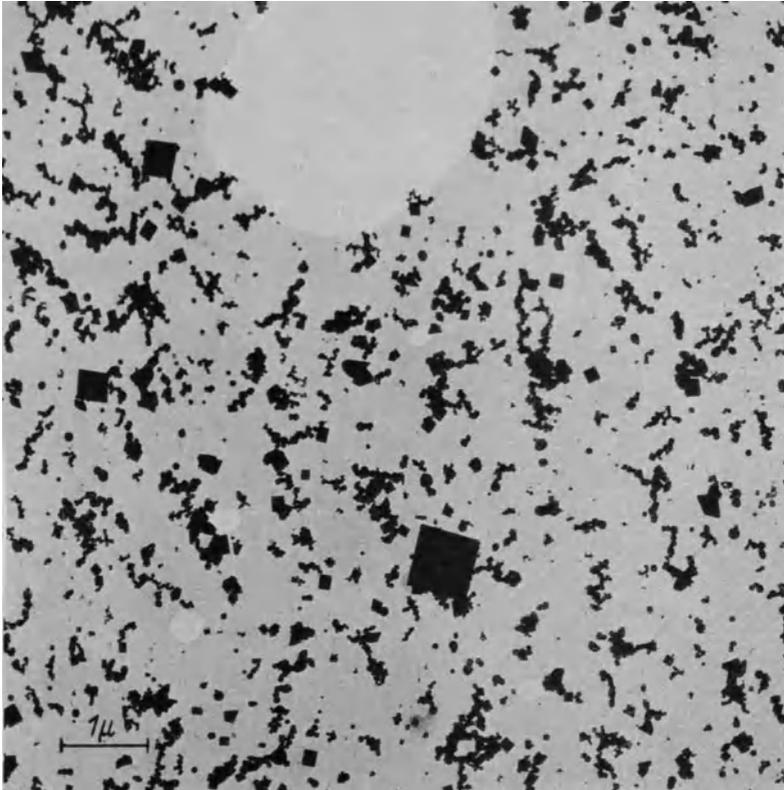
Wie beim Lichtmikroskop sind beim Elektronenmikroskop neben den üblichen Hellfeld-Aufnahmen auch Dunkelfeld-Aufnahmen durch Ausblendung des Hauptstrahles zu erzielen. Die Bilder dieser Seite zeigen eine Diatomee mit ihrer regelmäßigen Struktur, das Testobjekt des Lichtmikroskopikers. Die Aufnahmen lassen die größere Schärfe des Hellfeldbildes deutlich erkennen.

Kinder [136].

Magnet. Aufn.
Vergr.: 12 000-, 6000 fach.



Methodik: Dunkelfeld.



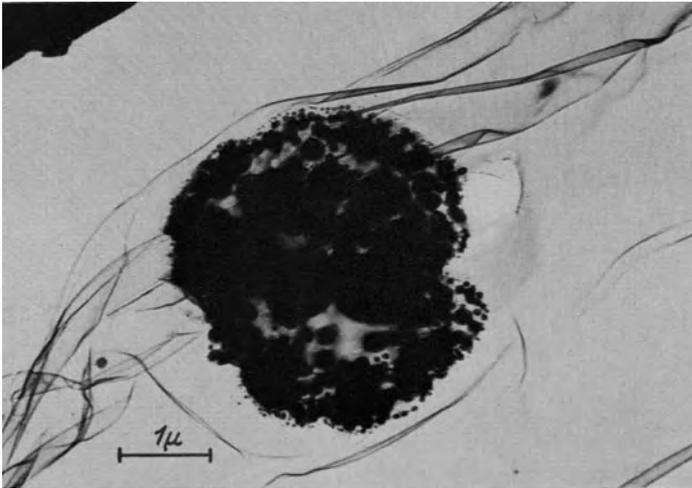
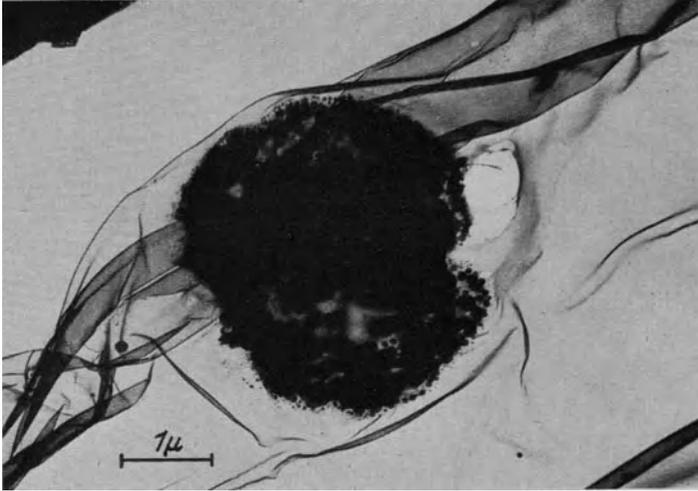
Hell- und Dunkelfeldbild von
Wolfram aus dem Lichtbogen.

Zwischen Wolframelektroden wurde ein Lichtbogen erzeugt. Der entstehende Rauch wurde auf einer Zaponfolie niedergeschlagen. Man erkennt auf dem Hell- und Dunkelfeldbild sich entsprechende Einzelheiten, so die größeren Würfel und das große Loch oben in der Zaponfolie. Interessant sind im Dunkelfeldbild die vereinzelt kräftigen Reflexe, die von einzelnen Kriställchen in günstiger Lage zum Strahl herrühren. Die Auflösung des Dunkelfeldbildes liegt unter 50 mμ.

Kinder [136].

Magnet. Aufn.
Vergr.: 12 000-, 6000 fach.

Methodik: Verschiedene Durchstrahlungsenergie.



Luftkeim mit verschieden schnellen Elektronen abgebildet.

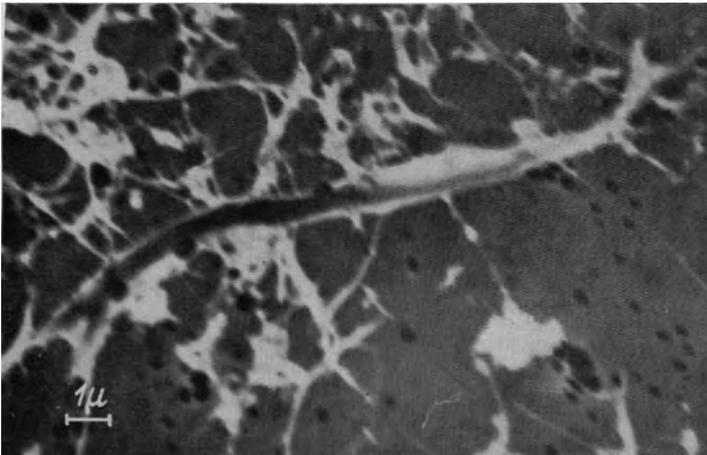
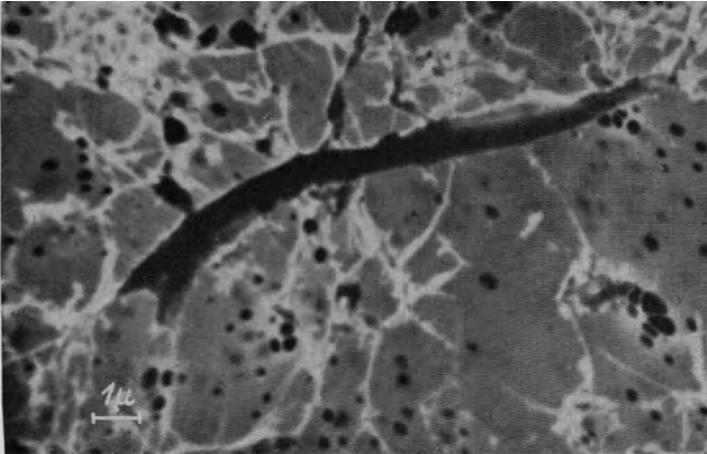
Gelegentlich erweisen sich die Objekte als so dick, daß die Anwendung höherer Durchstrahlungsenergien als die meist üblichen von 50 000...70 000 eVolt, zweckmäßig ist. So zeigen die beiden Bilder, bei deren oberem 50 000 Volt, bei deren unterem 105 000 Volt benutzt wurden, daß im Innern des Keimes im zweiten Bild mehr Einzelheiten erkennbar sind. Über ein mit 135-kV-Elektronen erhaltenes Bild vgl. S. 209.

Kinder [148].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 12 000 fach.

Methodik: Verschiedene Durchstrahlungsenergie.



Papierfasern mit verschieden schnellen Elektronen im Dunkelfeld abgebildet.

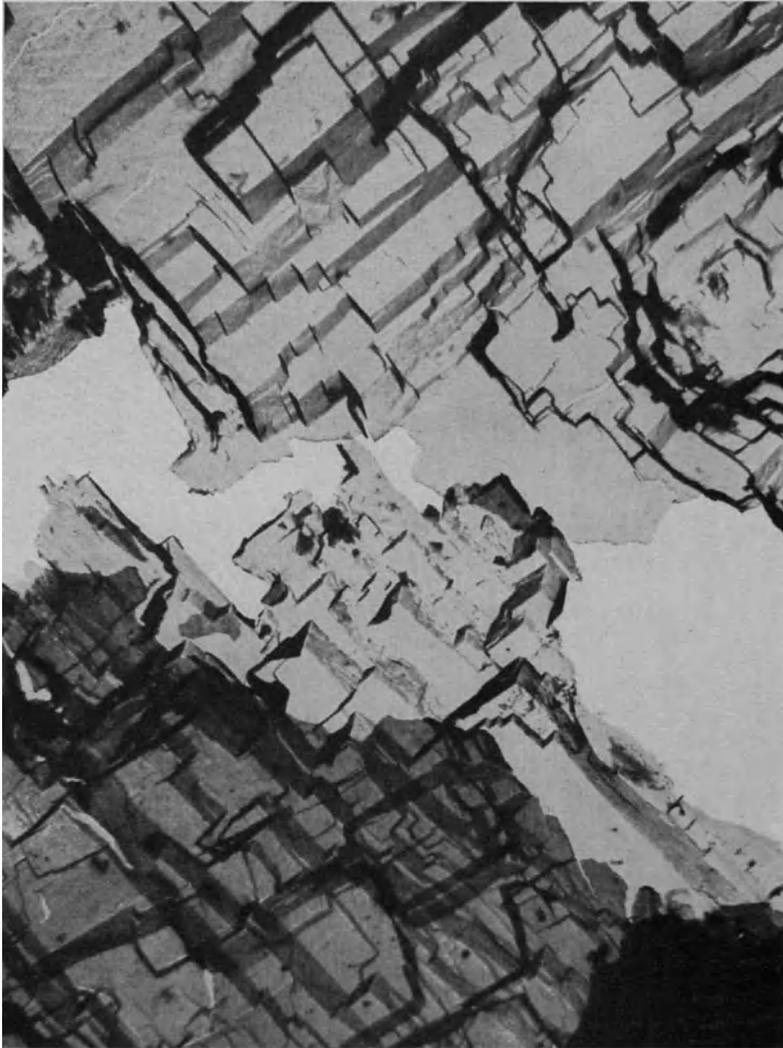
Bei Dunkelfeldaufnahmen (vgl. S. 112/113) werden lediglich die am Objekt gestreuten Elektronen zur Abbildung benutzt. Mit steigender Elektronengeschwindigkeit nimmt die Streuung an den dünnen Objektteilen ab, wodurch diese im Bilde dunkler werden. Gleichzeitig werden dicke Objektschichten leichter durchdrungen, so daß auch die hier abgestreuten Elektronen mehr und mehr zur Bilderzeugung beitragen. Unsere Bilder, die bei 60 000 Volt und 114 000 Volt aufgenommen sind, bestätigen diese Vorstellung: Bei dem unteren, mit den schnelleren Elektronen aufgenommenen Bild ist die Trägerfolie dunkler, die dicke Faser aber heller als bei dem oberen Bild.

Kinder [141].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 6000 fach.

Sonderverfahren: Oberflächenabdruck.



Zerrissener Aluminiumoxyd-Film.

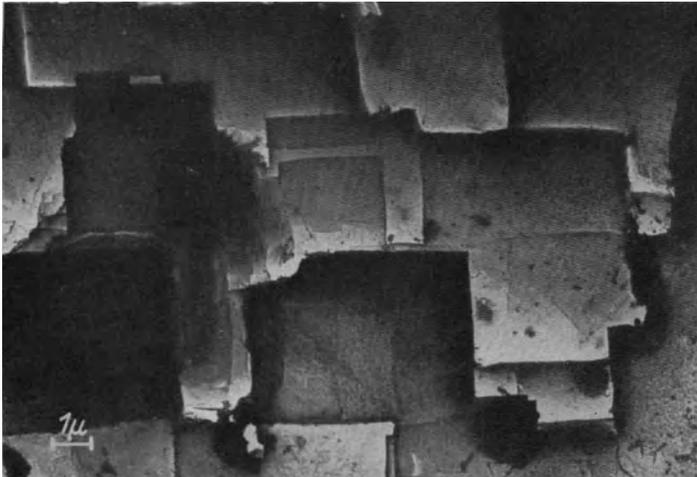
Die sehr dünnen Oxydfilme (Eloxalfilme) auf einer geätzten Aluminiumoberfläche, die sich leicht von der Oberfläche abheben lassen, zeigen im Durchstrahlungsmikroskop ein genaues Bild der Oberflächenstruktur des Metalls. Unser Bild gibt eins der ersten von Mahl erhaltenen Abdruckbilder wieder. Der Film ist zerrissen und liegt teilweise doppelt. Welche Fortschritte bei der Weiterentwicklung in der Technik des Abdruckverfahrens erzielt werden konnten, zeigt besonders instruktiv der Vergleich mit dem Bild S. 37.

Mahl [136].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 4000 fach.

Sonderverfahren: Oberflächenabdruck.



Oxyd- und Lack-Abdruckfilm von geätztem Aluminium.

Oberflächenabdrücke lassen sich nicht nur mit natürlich aufgewachsenen Oxydfilmen herstellen, sie können auch durch künstlich aufgebraute andersartige, z. B. Lackfilme, erzeugt werden. Dabei ergeben sich je nach der Art der verwendeten Abdruckfilme charakteristische Unterschiede in den Kontrastverhältnissen. Bei dem an allen Stellen gleichmäßig dicken Aluminiumoxydfilm ist die Bildhelligkeit nur von der Neigung der Fläche zum Elektronenstrahl abhängig. Es treten darum nur Helligkeitsunterschiede zwischen verschiedenen geneigten Flächen auf (oberes Bild). Beim Lackabdruck (unteres Bild) erscheinen dagegen ebene Ätzflächen gegen einspringende Kanten zu dunkel, da hier infolge von Kapillarkräften die Lackdicke größer ist.

Mahl [150].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 6000 fach.

Sonderverfahren: Oberflächenabdruck.



Kontraststeigerung durch Schrägebeobachtung.

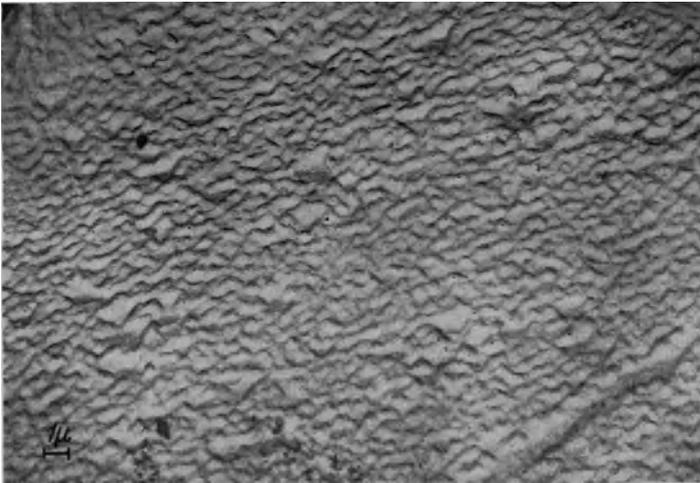
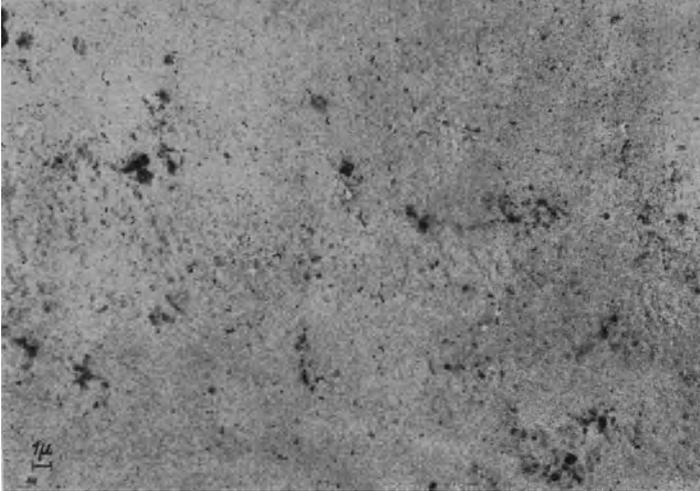
Oberflächen, die im Oberflächenrelief nur geringe Neigungsunterschiede aufweisen, werden bei dem Abdruckverfahren mit dem gleichmäßig dicken Abdruckfilm kontrastlos abgebildet. Das zeigt das obere Bild, bei dem der Oberflächenabdruck von Aluminium, das durch Natronlauge angeätzt war, wiedergegeben ist. Neigt man die Folie jedoch für die Aufnahme, so daß sie mit der Strahlrichtung z. B. 45° bildet, so läßt sich eine beträchtliche Kontraststeigerung erzielen.

Mahl.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 2500 fach.

Sonderverfahren: Oberflächenabdruck.



Kontraststeigerung durch Schrägbedampfung.

Auch bei Aufdampfschichten, die sich ebenso wie Oxydfilme zum Oberflächenabdruck verwenden lassen, ist bei senkrechter Bedampfung und senkrechter Bestrahlung nicht erkennbar, ob auf der Oberfläche Unebenheiten vorhanden sind. So zeigt die im oberen Bild wiedergegebene geätzte Kochsalzfläche eine scheinbar glatte Struktur. Neben der Schrägdurchstrahlung (vgl. S. 118) ergibt sich hier die Möglichkeit, durch Schrägbedampfung einen durch den Schattenwurf der Erhöhungen ungleichmäßig werdenden Abdruckfilm zu erzielen, der nun bei senkrechter Durchstrahlung ein kontrastreiches Bild der Oberfläche liefert.

Mahl.

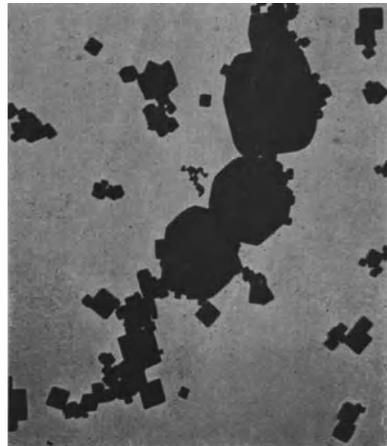
Elektr. Aufn.

Vergr.: 2500 fach
bzw. 3500 fach.

Sonderverfahren: Stereoaufnahme.

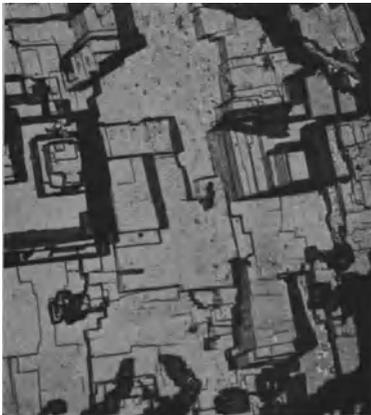


Mahl [108].



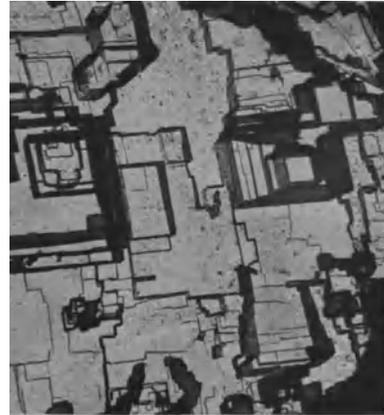
Magnesiumoxydwürfel.
Elektr. Aufn.

Vergr.: 17 000 fach.



Mahl [136].

Mit Salzsäure geätzte Aluminiumoberfläche.
Elektr. Aufn.

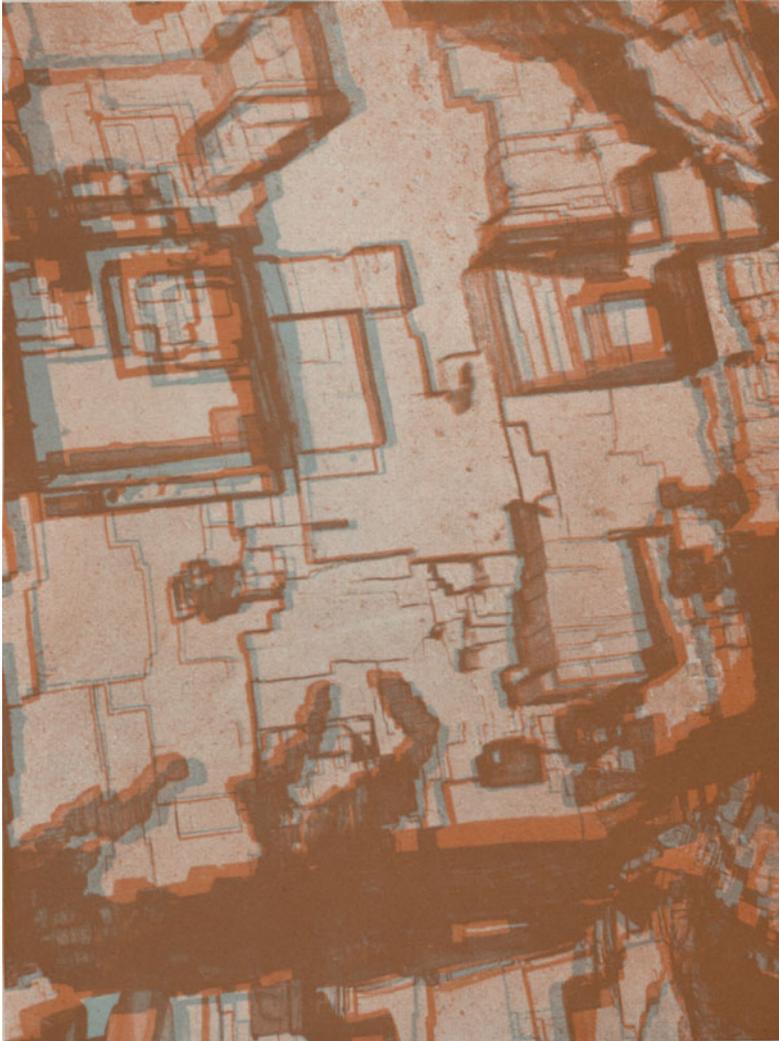


Vergr.: 3000 fach.

Stereoskopische Aufnahmen.

Die stereoskopischen Bilder werden beim Durchstrahlungsmikroskop durch zwei Aufnahmen nacheinander erzielt, bei denen die Objektfolie eine etwas verschiedene Neigung gegenüber der optischen Achse des Mikroskops erhält. Rasterfreie Originalaufnahmen dieser Art vermitteln im Stereoskop einen sehr plastischen Eindruck von übermikroskopischen Strukturen.

Sonderverfahren: Stereoaufnahme.



Aluminium, mit Salzsäure geätzt.

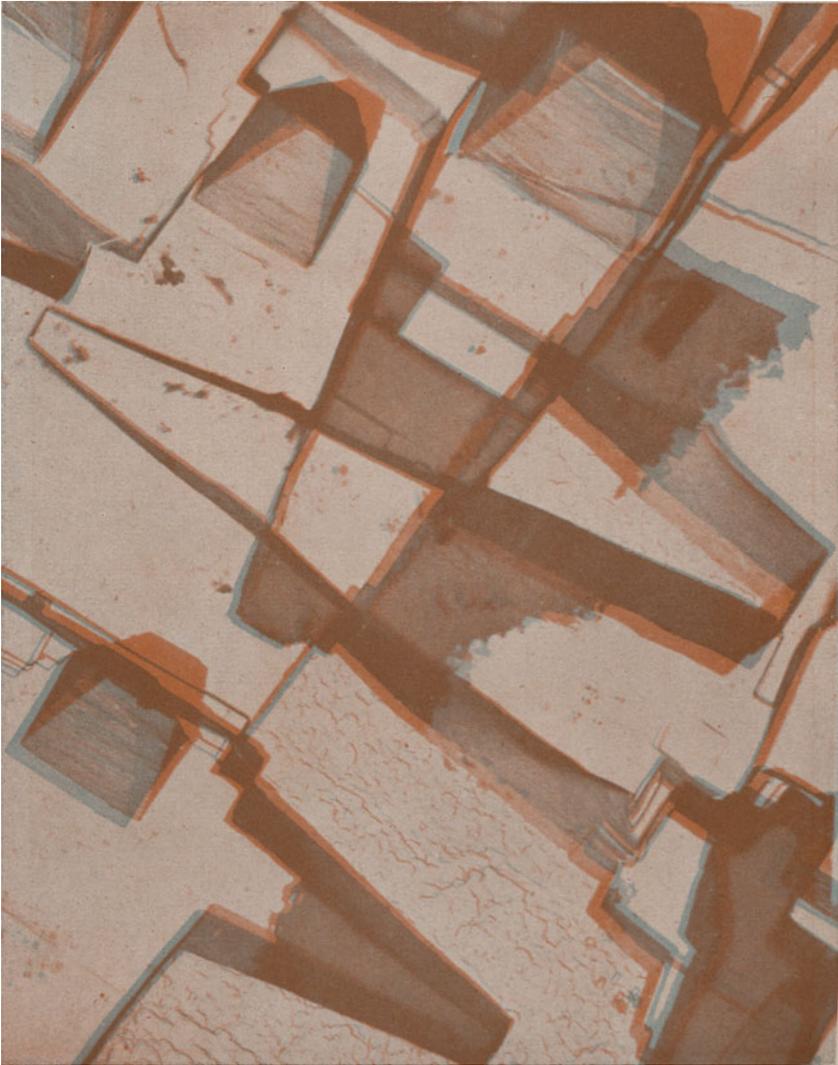
Die gleiche Aufnahme wie auf der Gegenseite ist hier als Farbstereobild wiedergegeben. Mit der Farbbrille, die vor das rechte Auge ein blaues, vor das linke ein rotes Filter schaltet, erhält man bei einiger Übung ein plastisches Bild der Oberfläche, wie es sich dem Beobachter von der Metallseite gesehen darstellt. Der Aufbau der Oberfläche aus treppenartig gestuften Ebenen wird erkennbar. Die im Vordergrund unten schwebenden Gebilde weisen auf tiefes Eindringen des Ätzmittels längs Korngrenzen hin.

Mahl [136].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 4500 fach.

Sonderverfahren: Stereoaufnahme.



Geätztes Reinstaluminium.

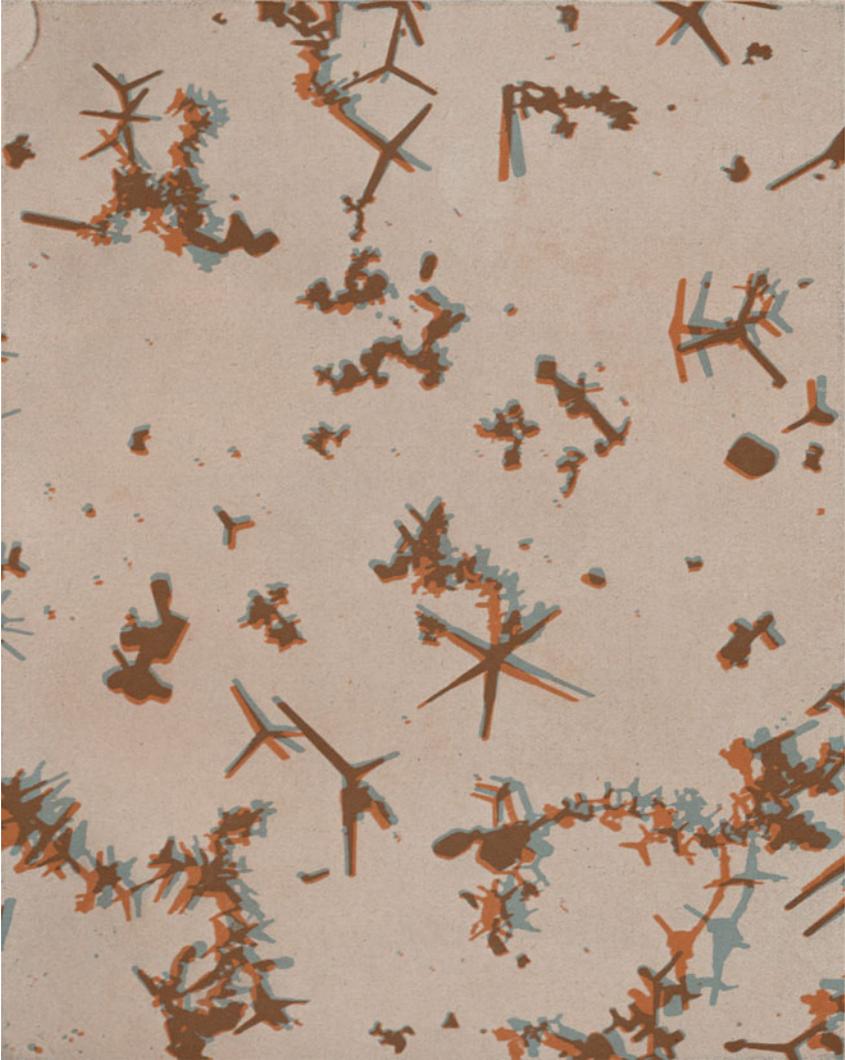
Bei dem Stereobild der auf S. 172 wiedergegebenen Aufnahme ist die Oberfläche von außen her gesehen. Bemerkenswert ist die komplizierte stollenartige Untergrabung der Metalloberfläche. Außerdem sind links pyramidenförmige Ätzgruben erkennbar.

Mahl.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 4000 fach.

Sonderverfahren: Stereoaufnahme.



Zinkoxyd aus dem Lichtbogen.

Gegenüber der auf S. 161 wiedergegebenen Aufnahme von Zinkoxyd läßt die Stereoaufnahme die räumliche Lagerung von Kristallketten und Gruppen sowie den Aufbau der einzelnen Kristallsterne erkennen. Bemerkenswert ist die „Schwerelosigkeit“, die bei der Anordnung der Kristalle auf die Folie zu gelten scheint.

Gözl.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 22 000 fach.

Sonderverfahren: Stereoaufnahme.



Schmetterlingsschuppe.

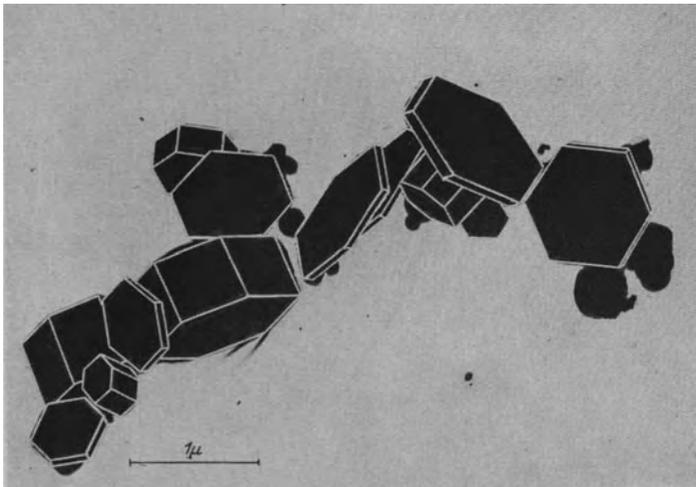
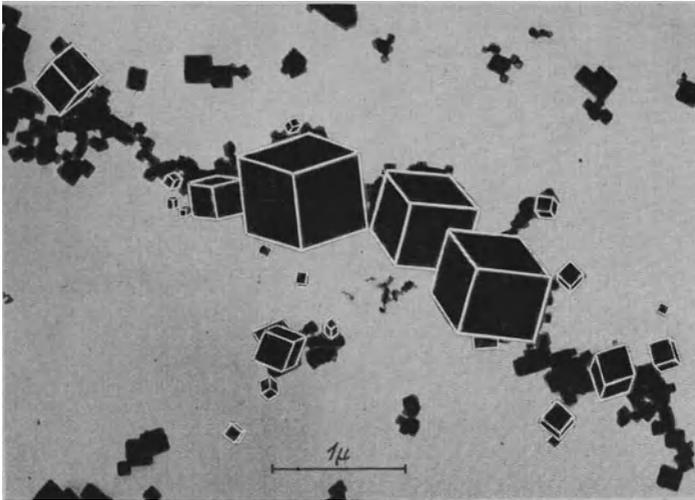
Diese Stereoaufnahme der Schillerschuppe von *Ancyluris aulestes* zeigt ein auf der Schuppenplatte stehendes — z. T. zerstörtes — Filigrannetz von Leisten und ihren Querverbindungen. Das Netz ist auf „Füßen“ über der darunterliegenden Haut aufgebaut.

Kinder.

Magnet. Aufn.

Vergr.: 14 000 fach.

Sonderverfahren: Stereoaufnahme.



Magnesiumoxyd und Zinkoxyd.

Stereoaufnahmen ergeben sogleich die geometrische Gestalt von Kristallen, von denen das Übermikroskop nur den Umriß zeigt. So erkennt man auch, daß sechseckigen Schattenrissen von Magnesiumoxyd- und Zinkoxydkristallen verschiedene Raumformen zukommen. Während Magnesiumoxydkristalle (oberes Bild, vgl. auch S. 120) Würfel sind, kann Zinkoxyd (unteres Bild, vgl. auch S. 161—163) Prismen und Plättchen von sechseckiger Grundform bilden. (Konturen auf Grund der Stereobetrachtung nachgezeichnet.)

Mahl [108].
Gölz.

Elektr. Aufn.
Elektr. Aufn.

Vergr.: 19 000 fach.
Vergr.: 16 500 fach.

Verleihung von Leibnizmedaillen†)

durch die Preußische Akademie der Wissenschaften in der öffentlichen Festsitzung zur Feier des Leibniztages, dem 3. Juli 1941.

Die Akademie verlieh die silberne Leibnizmedaille folgenden Männern, die sich um die Entwicklung des Elektronen-Mikroskops verdient gemacht haben:

Baron v. Ardenne, Dr. Boersch*), Dr.-Ing. v. Borries,
Dr.-Ing. habil. Brüche*), Dr.-Ing. Knoll, Dr.-Ing. Mahl*),
Dr.-Ing. Ruska.

Die Medaillen wurden durch den Präsidenten nach folgender Ansprache überreicht:

Meine Herren!

Die Möglichkeit, mittels Korpuskularstrahlen optische Abbildung zu verwirklichen, ist eigentlich schon lange bekannt; 1926 hat Hans Busch sie den Physikern noch in zwei Veröffentlichungen besonders nahegebracht. Aber die Entwicklung von einer wissenschaftlichen Idee zum technisch durchgebildeten, zur Anwendung auf Forschung geeigneten Instrument hat das Elektronenmikroskop erst in den Jahren seit 1931 durchgemacht. Heute gestattet es wirksame Vergrößerungen bis zum 20 000 fachen (bei optischer Nachvergrößerung bis zum 100 000 fachen) und die Trennung von Punkten, die um 10^{-6} cm voneinander abstehen. Es eröffnet somit ein Größenordnungsgebiet, in welches weder das optische Mikroskop noch die Strukturuntersuchung mit Röntgenstrahlen einzudringen vermögen. Es hat schon zu neuen und zum Teil ganz wesentlichen Erkenntnissen geführt in der Technik, in der Medizin, Biologie und Biochemie, und es hat vor kurzem einen besonders schlagenden Beweis für die Existenz der de Broglieschen Materiewellen ermöglicht, nämlich die Beobachtung ihrer Beugung an scharfen Rändern. Es besteht sichere Aussicht auf weitere erhebliche Steigerung seiner Leistungsfähigkeit. Aber schon jetzt hält die Akademie die Anerkennung des Geleisteten für geboten, um so mehr, als sich die Entwicklung ganz auf deutschem Boden vollzogen hat.

Von den Forschern, die sich ebenfalls um die Entwicklung des Elektronenmikroskops verdient gemacht haben, müssen Walther Glaser und Otto Scherzer*) hier außer Betracht bleiben, weil deren Leistungen für die Theorie des Elektronenmikroskops bereits durch die Verleihung hervorragender akademischer Stellungen anerkannt worden sind.

Es würde zu weit führen, wenn ich hier im einzelnen auf die Verdienste, die jeder von Ihnen, meine Herren, um die Entwicklung des Elektronenmikroskops hat, eingehen würde. Sie haben alle, zum Teil in gemeinsamer Arbeit, die großartige Entwicklungsarbeit geleistet, welche notwendig war, um das Elektronenmikroskop dazu zu machen, was es heute in jeder seiner Ausführungen ist:

Ein Meisterwerk der wissenschaftlichen Technik.

†) Über die Idee des Elektronen-Übermikroskops vgl. S. 85.

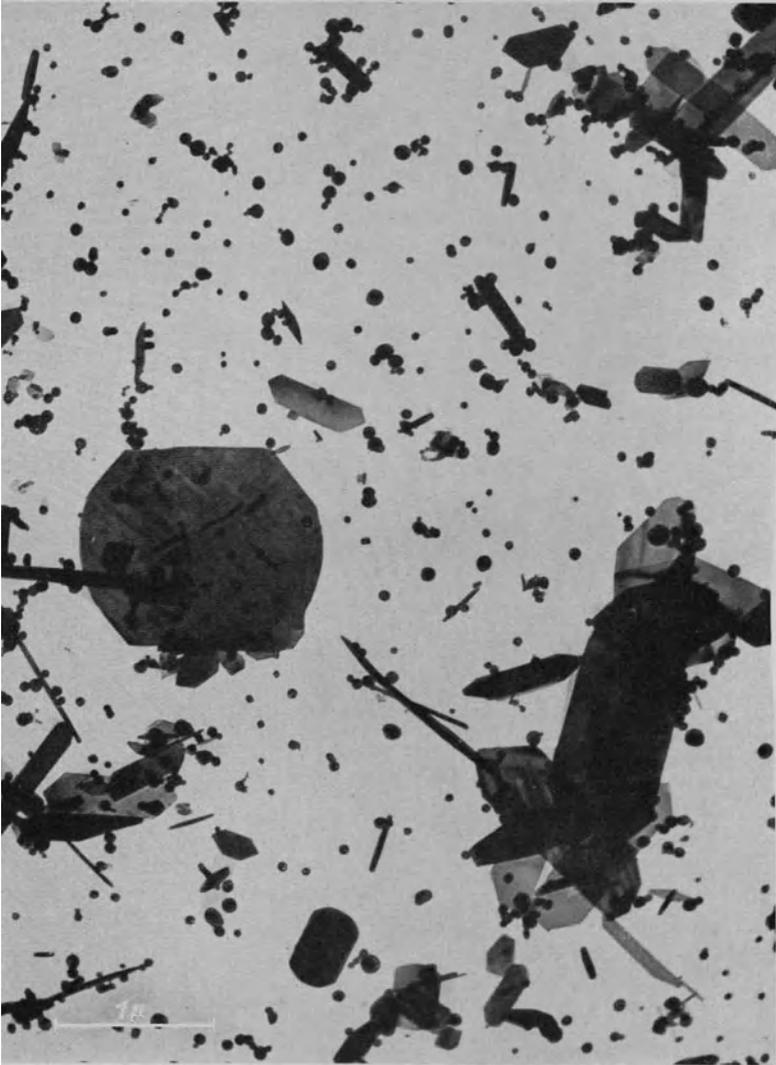
*) Mitarbeiter des AEG Forschungs-Instituts.

VII. Übermikroskopische Bilder aus der unbelebten Natur.

In der ersten Monographie des Gebietes der geometrischen Elektronenoptik [26] stellten Brüche und Scherzer für die Situation von 1931/32 fest, daß ein Hauptimpuls für den Ausbau der geometrischen Elektronenoptik „die ferne Hoffnung auf die Überschreitung der Auflösungsgrenze des Mikroskops“ gewesen sei. Von der Situation von 1934 sagten sie: „Heute stehen wir am Anfang der Entwicklung des Übermikroskops“.

Nun ist längst dank der Arbeiten von v. Ardenne, Boersch, Krause, Mahl und E. Ruska das elektrische und magnetische Übermikroskop als Durchstrahlungsmikroskop in verschiedenen Formen verwirklicht. Auch der zweite wichtige Typ des Elektronenmikroskops, das Emissionsmikroskop, ist heute durch die Arbeiten von Boersch, Kinder und Mecklenburg als elektrisches und als magnetisches Übermikroskop verwirklicht. Verschiedene Übermikroskope haben infolge der weitschauenden Entwicklungsarbeit industrieller Stellen (AEG, Siemens u. Halske AG.) bereits technische Form angenommen, und es liegt heute dank der ausgedehnten Arbeiten, die außer den genannten Autoren in den letzten Jahren besonders Beischer, v. Borries, Gölz, Jakob, Kausche, Kinder, Piekarski, H. Ruska und Wolpers mit dem Durchstrahlungs-Übermikroskop durchführten, schon ein so großes Material an Aufnahmen aus der belebten und unbelebten Natur vor, daß es schwierig ist, eine für den Überblick richtige Auswahl zu treffen. Aus der unbelebten Natur, die uns in diesem Kapitel vorwiegend beschäftigen soll, sind Stoffe in feinsten Verteilung ebenso wie — über das Abdruckverfahren von Mahl — Oberflächen zur Abbildung gekommen. Bei den feinveteilten Stoffen ist in den Gebieten: Kolloidchemie, Korrosionsforschung, Gummitechnik, Kathodenforschung, Faserchemie, Physik der Aufdampfschichten usw. der Forschung Hilfe geleistet worden. Bei der Oberflächenabbildung liegen heute bereits Ergebnisse über alle wichtigeren Metalle (so von Nickel, Eisen und Stahl), ebenso aber auch über Oberflächen von Glas sowie Salzkristallen vor. Hier sind neue Aussagen gewonnen bzw. vorbereitet über metallographische Probleme wie Oberflächenstrukturen, Ätzangriffe, Ausscheidungen, Oberflächenfilme und über Bearbeitungsverfahren. Von allen diesen Aufgaben sollen die folgenden Seiten berichten, die eine kleine Auswahl übermikroskopischer Bilder aus der unbelebten Natur zeigen.

Chemie: Kolloide.



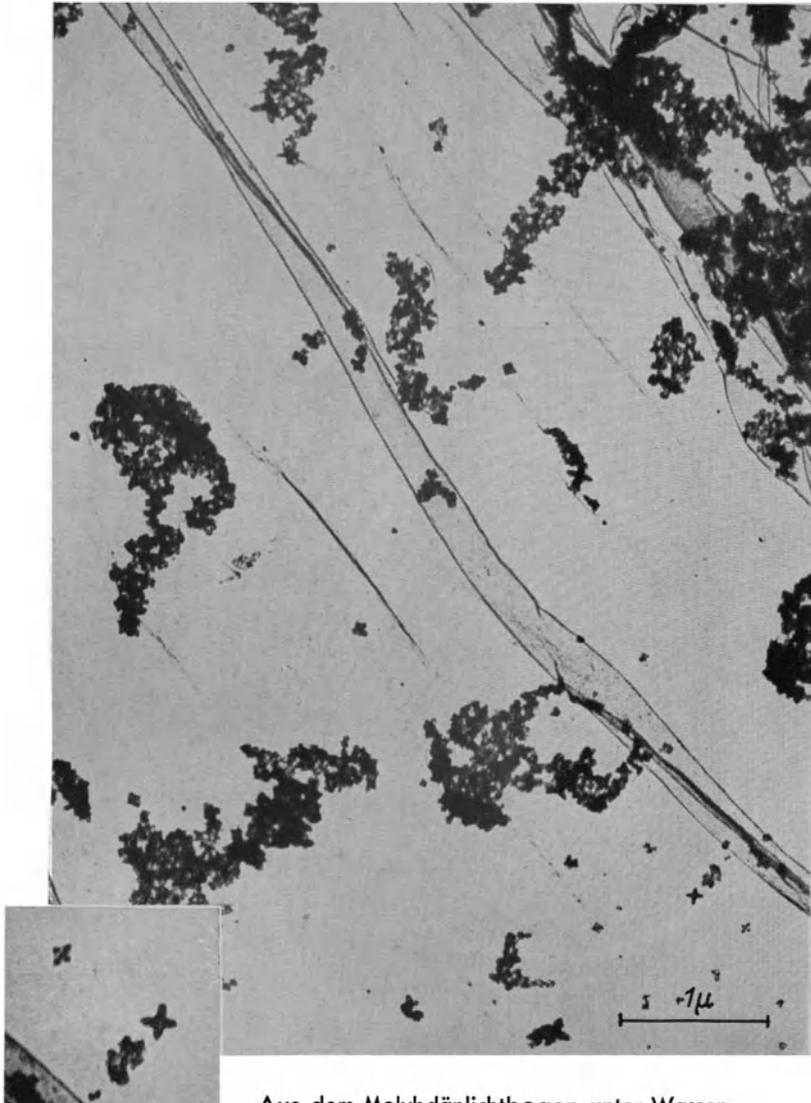
Teilchen aus dem Molybdänlichtbogen in Luft.

Zwischen Molybdänelektroden wurde in Luft ein Lichtbogen erzeugt. Der entstehende Rauch wurde auf dem Zapon-Objektträger niedergeschlagen. Das übermikroskopische Bild zeigt, daß der Rauch aus kleinen undurchsichtigen (vermutlich metallisches Molybdän) und durchsichtigen Plättchen (vermutlich Molybdänoxyd) besteht.

Kinder [136].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 20 000 fach.



Aus dem Molybdänlichtbogen unter Wasser.

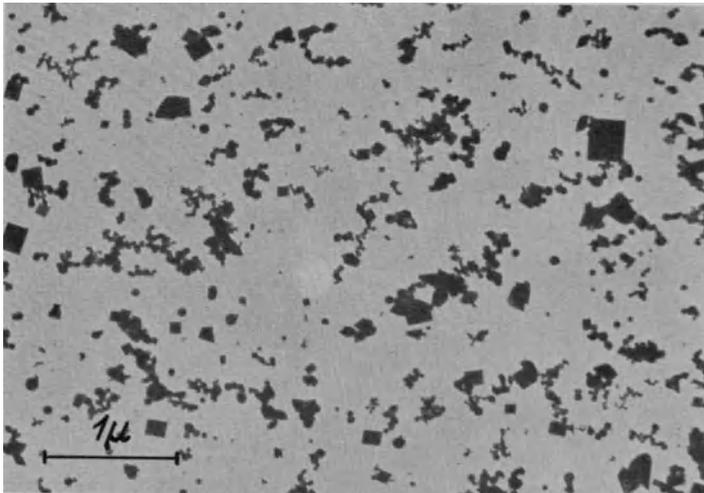
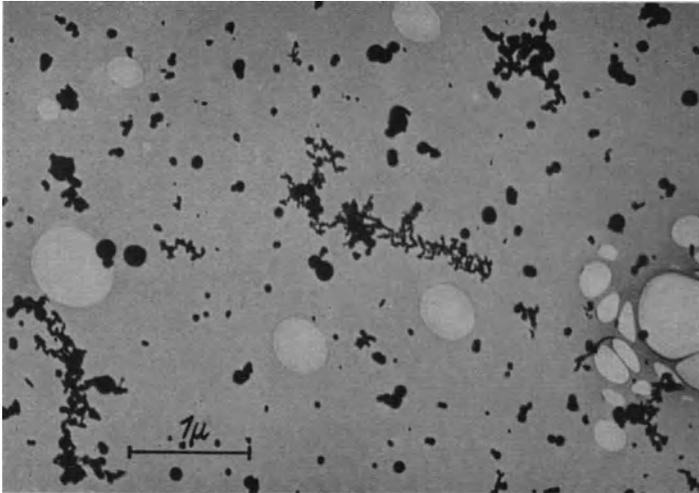
Bei dieser Aufnahme wurde der Lichtbogen mit Molybdänelektroden unter Wasser erzeugt. Im Gegensatz zu den Partikeln, die sich beim Brennen des Bogens in Luft bilden (s. Gegenseite) scheint der Schlamm aus einheitlichen Kriställchen zu bestehen. Bei hoher Vergrößerung (Bildeinschnitt links) erkennt man deutlich Sterne.

Kinder [141].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 20 000 bzw. 40 000 fach.

Chemie: Kolloide.



Lichtbogenrauch von Blei und Wolfram.

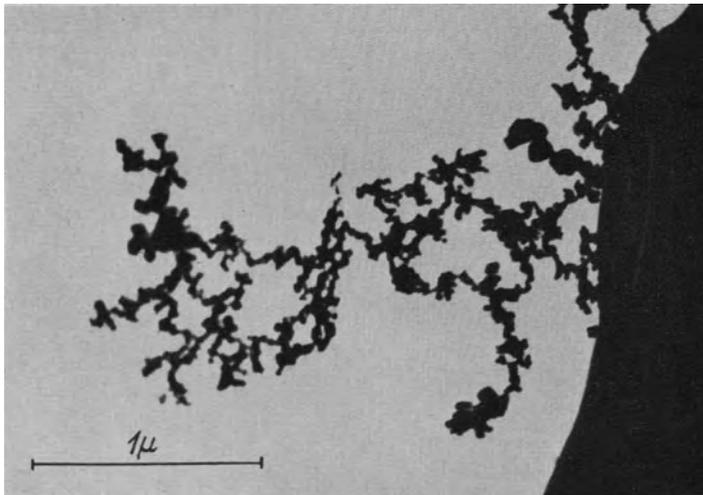
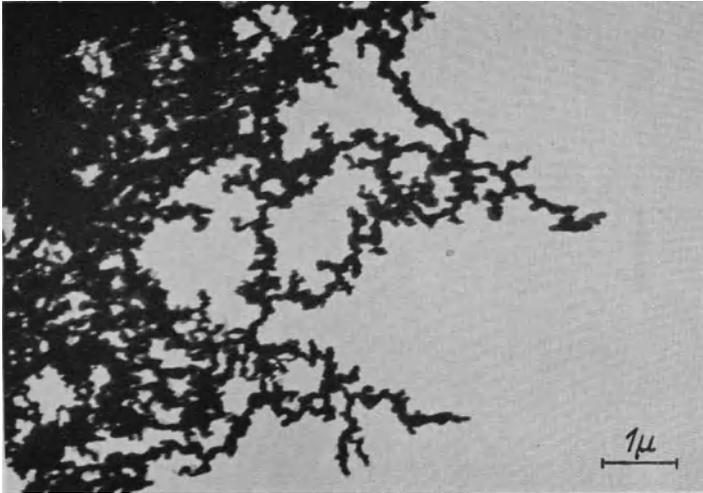
Zwischen Elektroden aus Blei bzw. Elektroden aus Wolfram wurden Lichtbogen erzeugt. Der entstehende Rauch schlug sich auf einer über den Bogen gehaltenen Trägerfolie nieder. Die übermikroskopischen Bilder zeigen bei Blei (oberes Bild) mehr runde Partikel, vermutlich geschmolzenes und als Kügelchen erstarrtes Metall, bei Wolfram (unteres Bild) vorzugsweise würfelförmige Kristalle. Diese Kriställchen werden im Gegensatz zu den Magnesiumoxydkristallen (vgl. S. 133) wegen des hohen Atomgewichtes des Wolframs nicht durchstrahlt.

Kinder [148].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 16 000 fach.

Chemie: Kolloide.



Lichtbogenrauch von Eisen und Zinn.

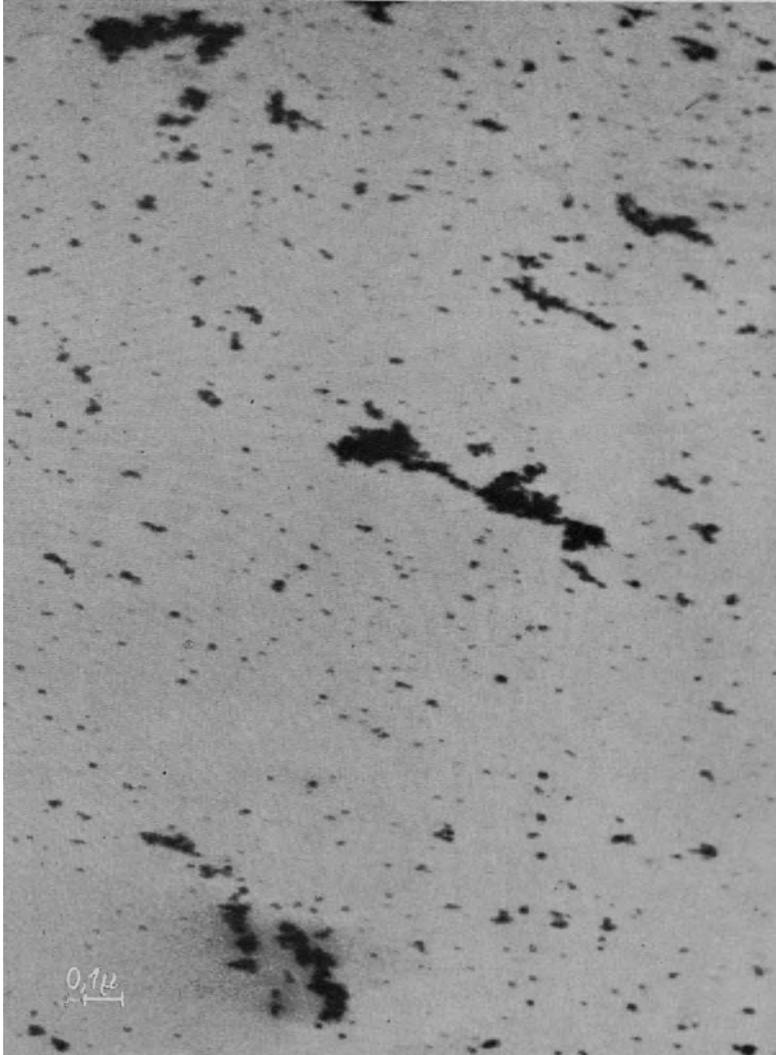
Diese beiden Präparate von Eisen (oberes Bild) und Zinn (unteres Bild) wurden ohne Mitwirkung einer Trägerfolie so gewonnen, daß man die Rauchteilchen sich am Rand der Objektträgerbohrung niedersetzten und aneinander anbauen ließ. Bemerkenswert sind die sich dabei bildenden freitragenden Ketten, die nach unseren Bildern bei Zinn aus besonders kleinen Teilchen zusammengesetzt sind.

Mahl [118].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 10 000- bzw. 30 000 fach.

Chemie: Kolloide.



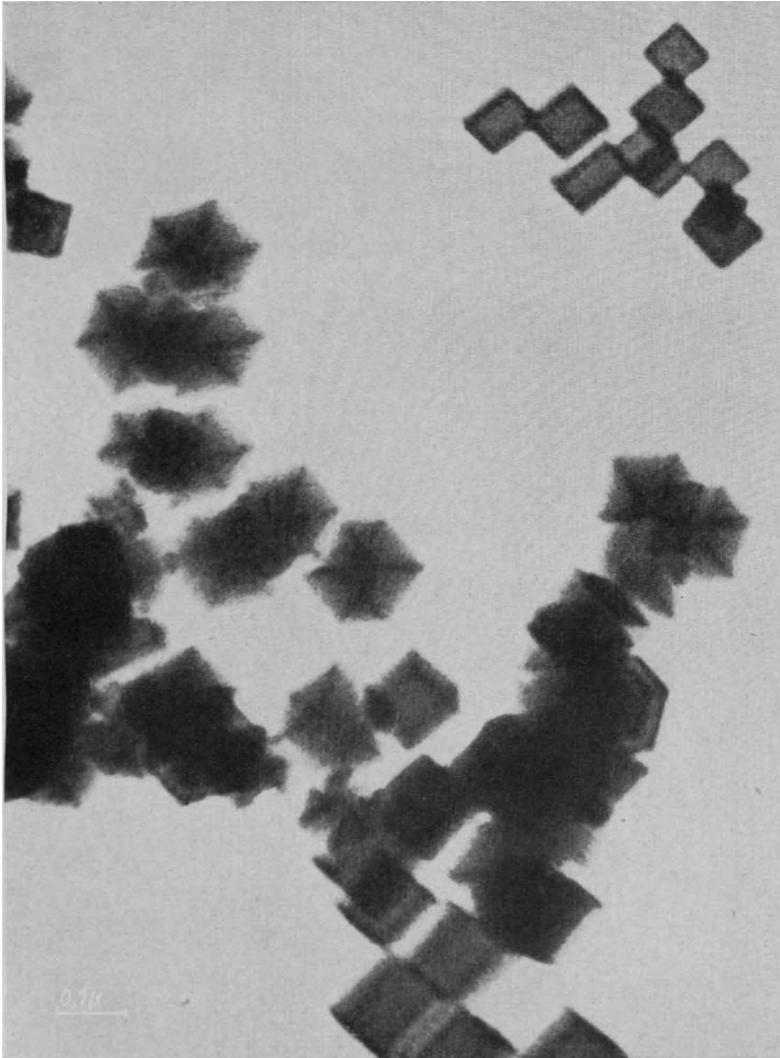
Kolloidales Silber.

Kolloide sind Stoffe in sehr feiner Verteilung. Während die vorstehenden Seiten solche Kolloide zeigen, die durch Verbrennen von Metallen bei hohen Temperaturen im Laboratorium hergestellt wurden, zeigt unsere Aufnahme ein im Handel befindliches Kolloid. Die Aufnahme, die höher vergrößert ist als die vorhergehenden, läßt die Feinheit dieses z. B. in der Medizin verwendeten kolloidalen Silbers erkennen.

Kinder [136].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 50 000 fach.



Durchscheinende Kristalle aus Magnesiumoxyd.

Dieses am höchsten vergrößerte Bild unseres Heftes gibt Magnesiumoxyd-Kriställchen wieder, die sich durch Verbrennen von Magnesium (Blitzlichtband) bildeten. Sie sind mit ihrer Kantenlänge unter 100μ um das Vielfache größer als die Teilchen auf dem Bild der Gegenseite. Bemerkenswert ist an obenstehender Aufnahme, daß die Würfel sich gruppenweise gleichartig gelagert haben und daß ihre räumliche Gestalt infolge der Verwendung von Elektronen hoher Energie zur Durchstrahlung (84 ekV) deutlich erkennbar ist.

Kinder [134].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 100 000 fach.

Chemie: Fasern.



Fibrillen von Hadernpapier.

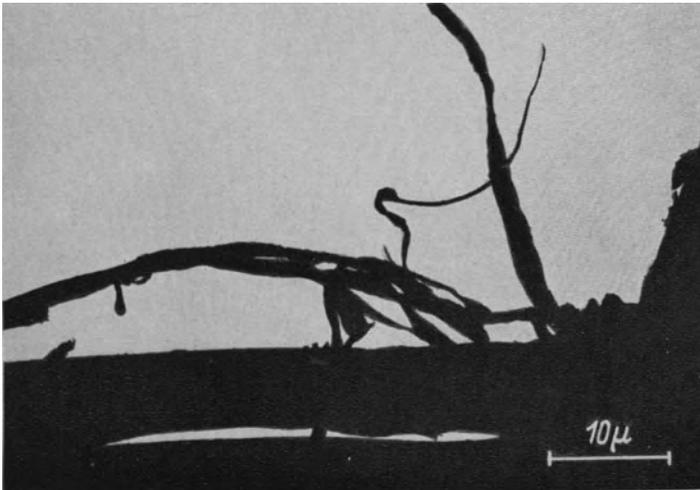
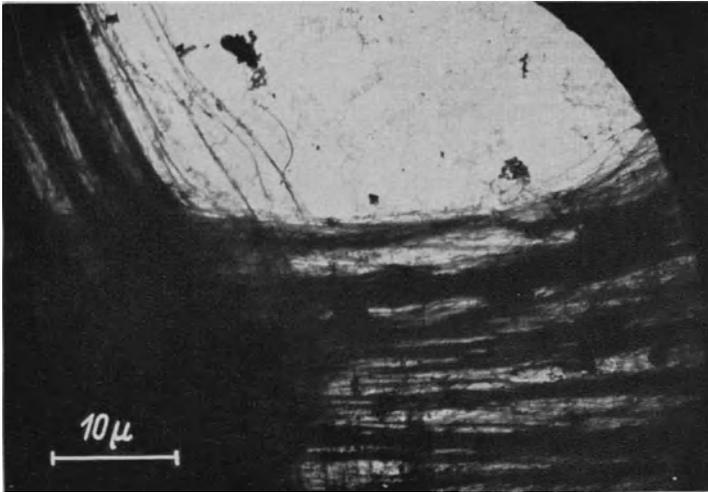
In der Faserstoffchemie spielen die „Fibrillen“ eine sehr wichtige Rolle. Es sind das langgestreckte Molekelketten, aus denen die Fasern zusammengesetzt sind. Das Präparat des obigen Bildes war durch langes Mahlen von Hadernpapier, das z. B. aus Baumwoll-Lumpen hergestellt wird, erhalten worden. Die elastischen Fibrillen zeigt das Übermikroskop als bandartige Gebilde, die verklebt zu sein scheinen.

Mahl [136].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 26 000 fach.

Chemie: Fasern.



Natürliche und künstliche Zellulosefasern.

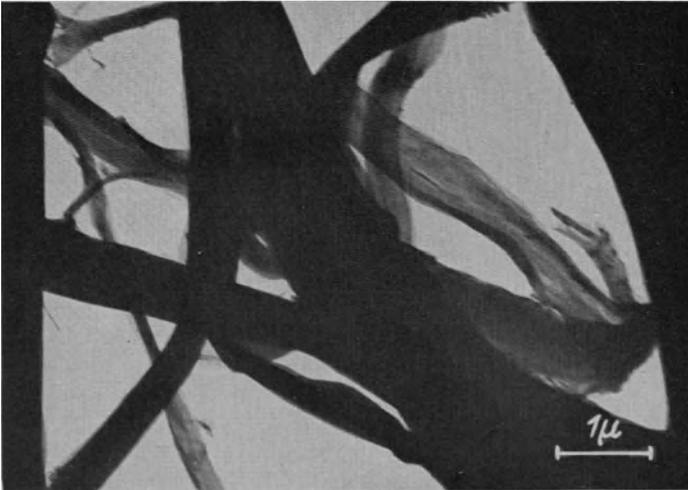
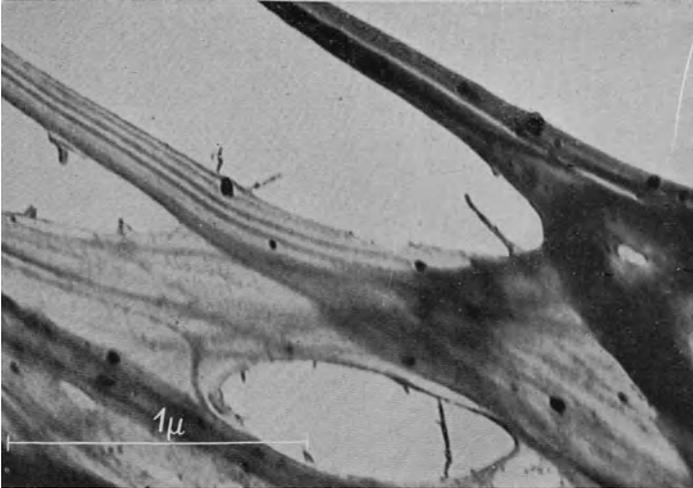
Natürliche Zellulosefasern, wie z. B. Ramiefasern aus Chinagrass (oberes Bild), sind aus sehr feinen, parallel nebeneinanderliegenden Zellulosesträngen, den sogenannten Fibrillen, aufgebaut. Zur Herstellung künstlicher Zellulosefasern wird Zelluloselösung durch sehr feine Düsen gepreßt und in dem sich bildenden Faden durch ein anschließendes Bad die Zellulose ausgefällt. Solche Fasern, wie z. B. Phrix-Zellwolle (unteres Bild) zeigen im Übermikroskop meist undurchstrahlbare, wesentlich dickere Fäden. (Man beachte die niedrige Vergrößerung bei den Bildern.)

Gözl und Kuhn [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 1600 fach.

Chemie: Fasern.



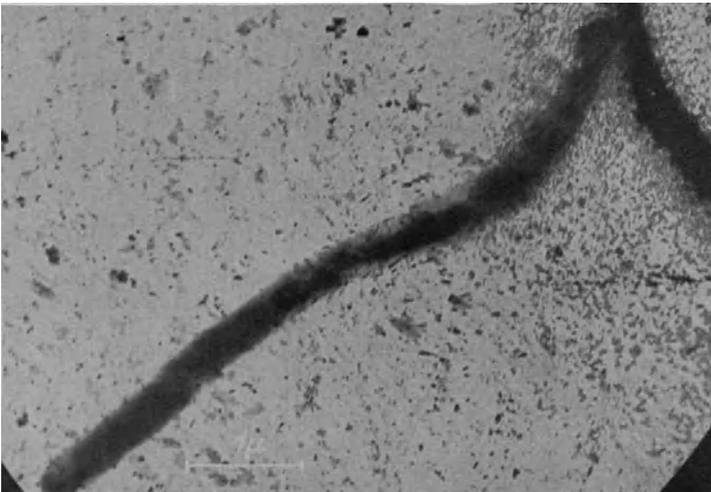
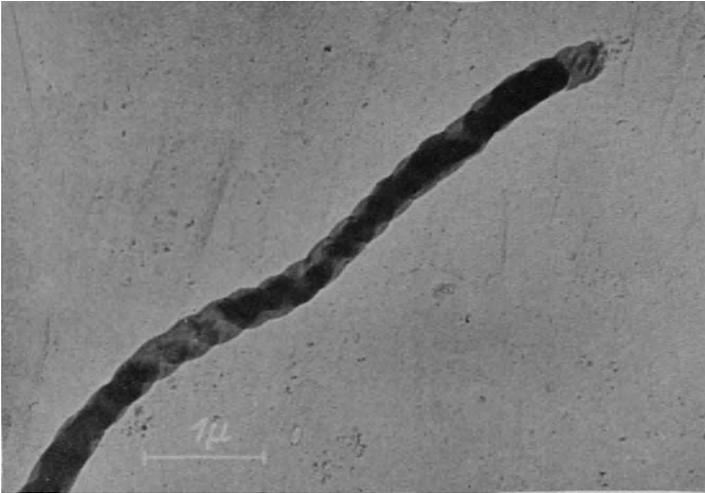
Naturzellstoff und Naturseide.

Die beiden Bilder zeigen natürlichen Zellstoff aus Natronpapier (oberes Bild) im Gegensatz zu tierischem Eiweiß (unteres Bild). Das Naturseidepräparat wurde ebenso wie die Präparate zu S. 135 durch Quellung des Materials in Kupferoxydammoniak und nachträgliches Breitpressen der Faser gewonnen. Auch bei der Seide sind fibrillenartige Gebilde zu erkennen, die jedoch gröber sind als bei dem Papierzellstoff (oberes Bild und Bild S. 134).

Mahl [131].
Kinder und Kuhn [148].

Vergr.: 40 000 fach.
Vergr.: 12 000 fach.

Chemie: Fasern.



Fibrillenbündel von Holz.

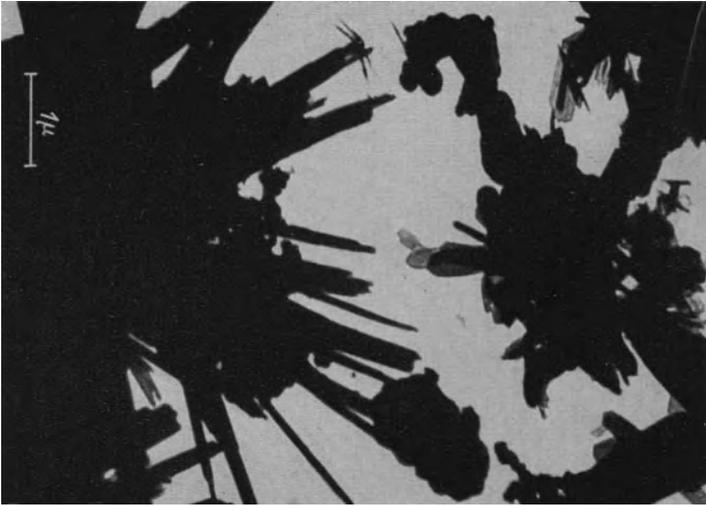
Die Bilder erläutern ein Einzelproblem aus der Zellstoffforschung. Die fädigen Bauelemente des Holzes (Fibrillenbündel) wurden durch Mahlen aus der Zellwand herausgelöst. Das im oberen Bild wiedergegebene Fibrillenbündel ist noch von einer Haut umschlossen, während bei dem unten wiedergegebenen Bündel bei fortschreitendem Mahlprozeß eine Auflösung der Haut und ein Heraustrreten einzelner Grundfibrillen aus der Packung deutlich erkennbar ist.

Gözl und Wergin [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 12 000 fach.

Chemie: Rost.



Rost-Partikel.

Zur Rostbildung wurde ein Stückchen Eisen in Wasser gelegt. Das Übermikroskop zeigt, daß die sich bildenden gelbbraunen Flocken (Ferrihydroxyd) aus dünnen durchsichtigen Plättchen, besonders aber aus ausgeprägten Kristallnadeln bestehen, wie es die beiden Bilder erkennen lassen. Im Gegensatz dazu zeigen Aufnahmen von chemisch gefälltem Ferrihydroxyd keine Kristalle, sondern kolloidale Teilchen.

Mahl [118].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 12 000 bzw. 22 000 fach.

Chemie: Rost.



Rost-Kristallplättchen.

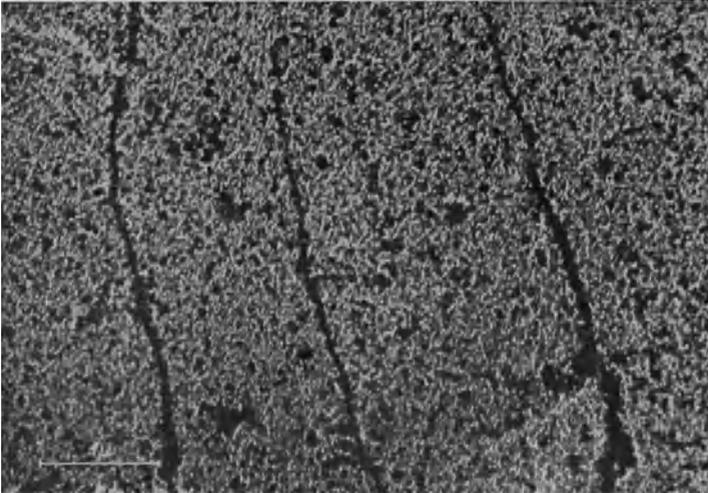
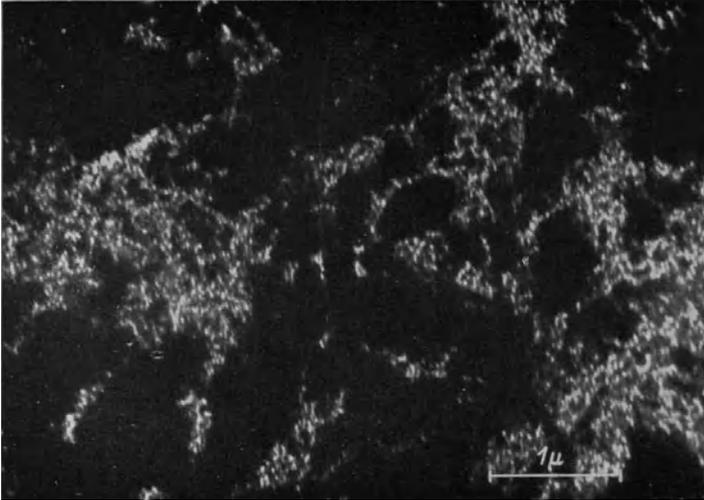
Während bei „jungem“ Rost (s. Gegenseite) die durchsichtigen Kristallplättchen eine unregelmäßige, meist gezahnte Begrenzung aufweisen, haben sich bei dem „alten“ Rost auf obigem Bild, der monatelang in Wasser lag, regelmäßige sechseckige Kristallplättchen entwickelt.

Mahl [136].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 27 000 fach.

Chemie: Oberflächenfilm.



Oberflächenfilm auf Eisen.

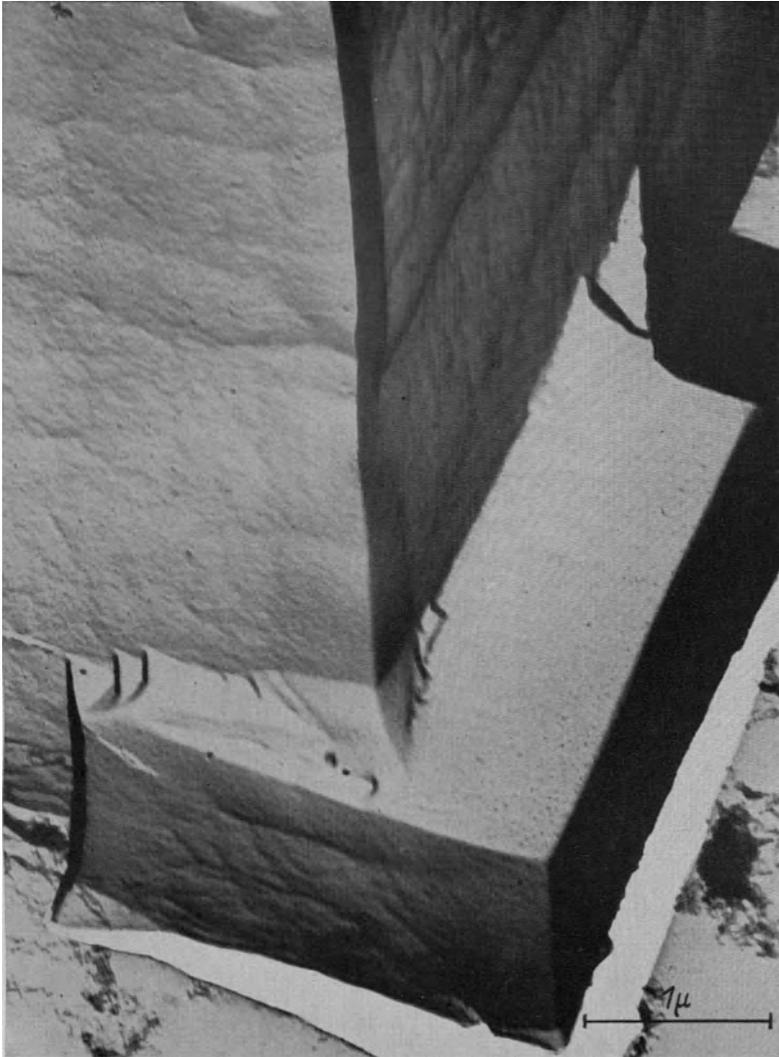
Die Oxydfilme, die sich auf Metallen bilden, verhindern je nach ihrer Beschaffenheit mehr oder weniger die weitere Oxydierung. Im Gegensatz zu Aluminium (s. Gegenseite) sind die Oxydfilme auf Eisen beim Anlassen (oberes Bild) und bei Passivierung in konzentrierter Kaliumdichromatlösung (unteres Bild) ungleichmäßig und porös (z. B. etwa 10^8 Poren/mm² bei angelassenem Eisen). So lehrt das Übermikroskop mit seinen Aussagen die Korrosionsbeständigkeit des Aluminiums und die Rostneigung des Eisens verstehen.

Mahl [118, 133].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 18 000 bzw. 15 000 fach.

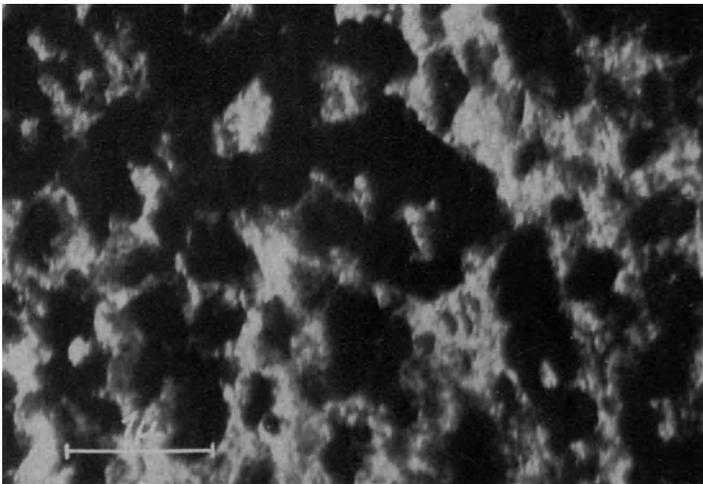
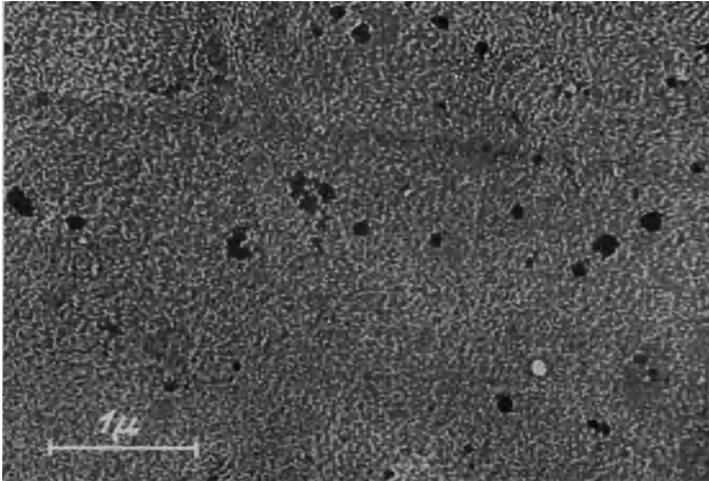
Chemie: Oberflächenfilm.



Oberflächenfilm auf Aluminium.

Der auf dem Aluminium (hier geätztes Reinstaluminium) durch elektrolytische Oxydation gebildete Oxydfilm ist im Gegensatz zu den Oberflächenfilmen des Eisens (s. Gegenseite) praktisch porenfrei. Er bietet darum einen ausgezeichneten Schutz gegen Korrosion. Mahl [136]. Elektr. Aufn. Vergr.: 25 000 fach.

Chemie: Oberflächenfilm.



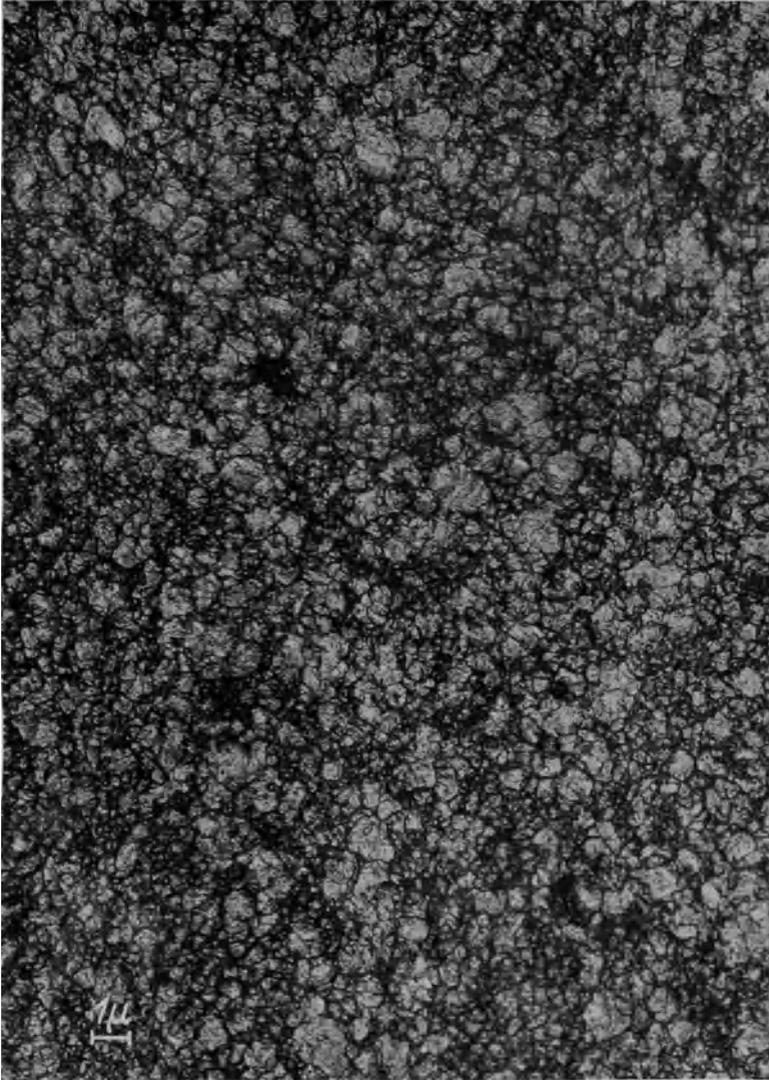
Galvanischer Chromniederschlag.

Die beiden oben wiedergegebenen Chromschichten wurden nach verschiedenen Verfahren hergestellt. Besonders das obere Bild einer dünnen galvanisch erzeugten Chromschicht (Verchromung) zeigt ein sehr feinkörniges Gefüge. Die Ablösung der Chromschichten zur Untersuchung erfolgte auf elektrolytischem Wege.

Mahl.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 18 000 fach.



Galvanischer Nickelniederschlag.

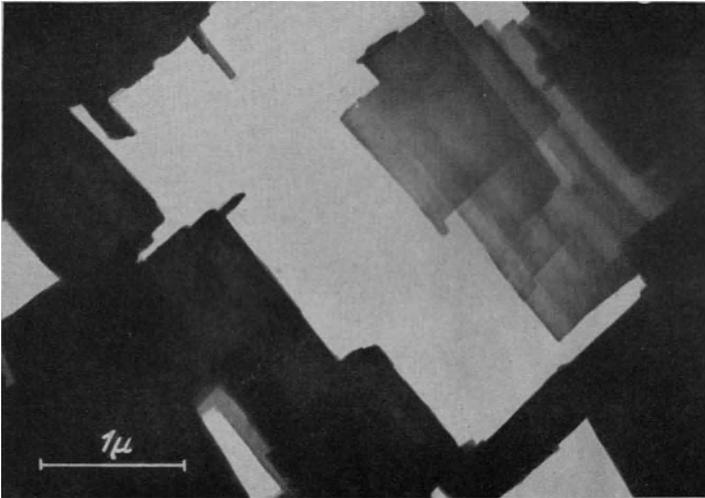
Das Bild zeigt einen galvanischen Nickelniederschlag, der auf Messing niedergeschlagen worden war. Der Nickelniederschlag besteht aus einzelnen, verschieden großen Kriställchen. Der Abdruckfilm wurde durch thermische Oxydation und elektrolytische Ablösung gewonnen.

Mahl und Seeliger [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 5500 fach.

Chemie: Metallauflösung.



Geätzte Aluminiumfolie.

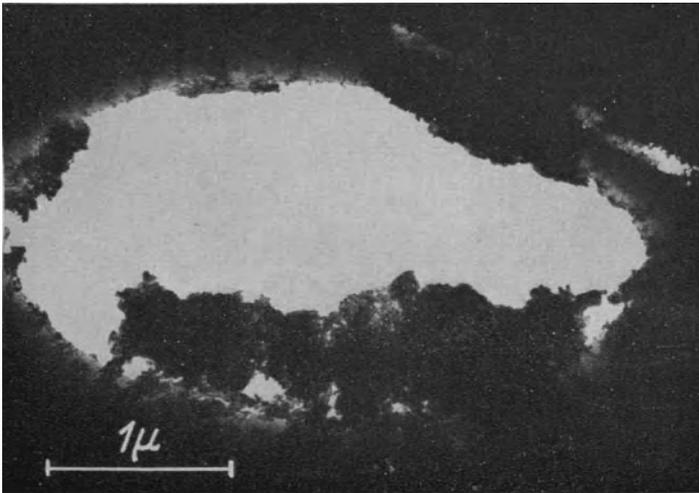
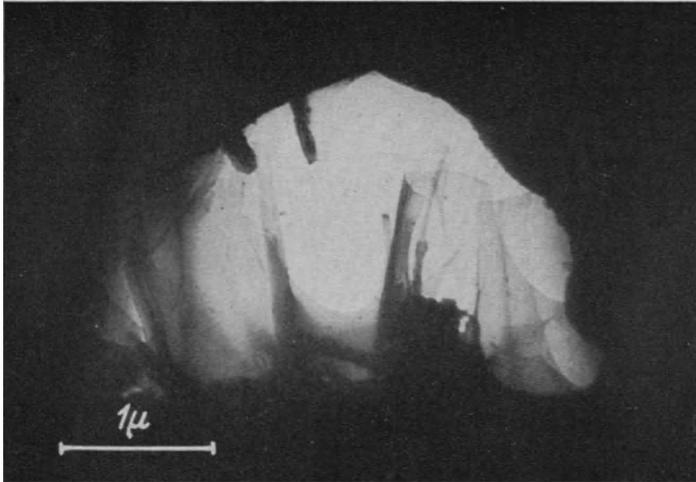
Die Aluminiumfolie war mit einem Salzsäure-Flußsäure-Gemisch stark geätzt worden, bis die Folie stellenweise durchlöchert war. Während bei 99,5%igem Aluminium (oberes Bild) rechteckige Lamellen sichtbar wurden, ergibt Reinaluminium von 99,99% (unteres Bild) unregelmäßige Konturen. Aus dem lamellenförmigen Materialabbau von verunreinigtem Aluminium kann man auf eine schichtenförmige Einlagerung der Verunreinigung schließen.

Mahl.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 18 000- bzw. 6000 fach.

Chemie: Metallauflösung.



Geätzter Aluminiumfilm.

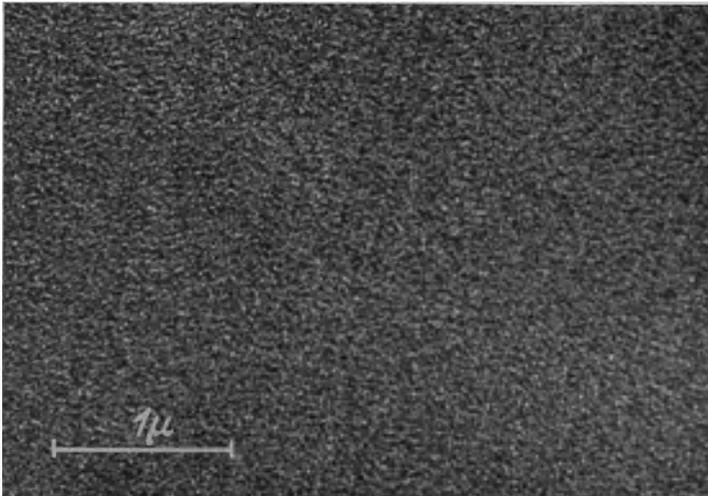
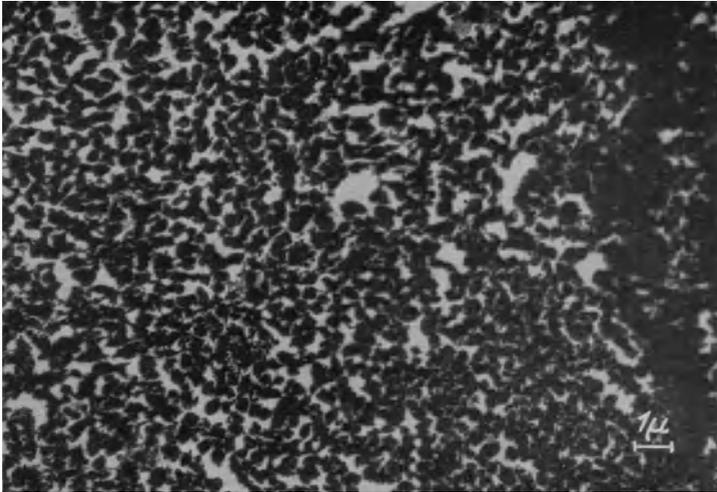
Die beiden Aufnahmen geben ebenso wie die der Gegenseite die Ränder von Ätzlöchern in Aluminiumfolien wieder, mit dem Unterschied, daß hier mit Kalilauge geätzt worden war. Bei dem oberen Bild handelt es sich um Reinstaluminium, bei dem unteren um Aluminium vom Reinheitsgrad 99,5%.

Mahl.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 20 000 fach.

Physik: Aufdampfschicht.



Selen- und Silber-Aufdampfschicht.

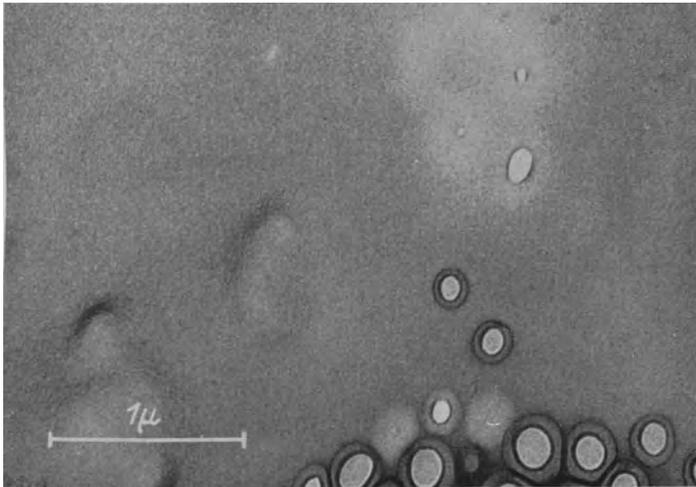
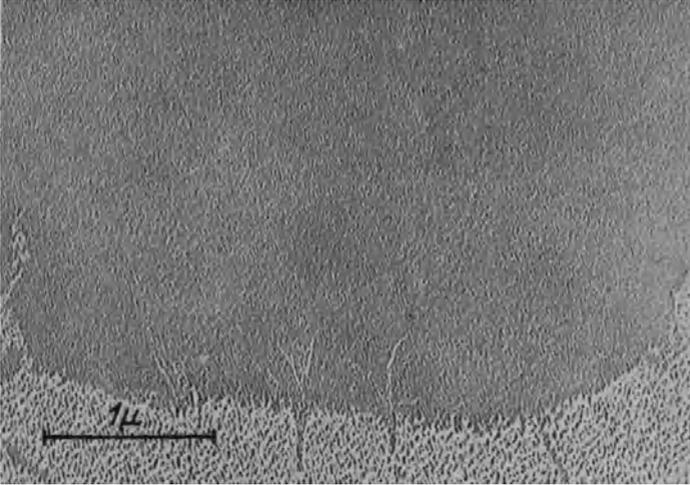
Auf dieser und der Gegenseite sind Aufnahmen von Aufdampfschichten wiedergegeben, deren Struktur von Bild zu Bild feiner wird. Bei der hier wiedergegebenen getemperten Selen-schicht (oberes Bild) zeigen sich relativ grobe Teilchen, die auch mit dem Lichtmikroskop noch erkennbar sind. Wesentlich feiner sind die submikroskopischen Teilchen der Silberschicht (unteres Bild).

Mahl
Mahl [102].

Elektr. Aufn.
Elektr. Aufn.

Vergr.: 4500 fach.
Vergr.: 22 000 fach.

Physik: Aufdampfschicht.



Indium- und Eisen-Aufdampfschicht.

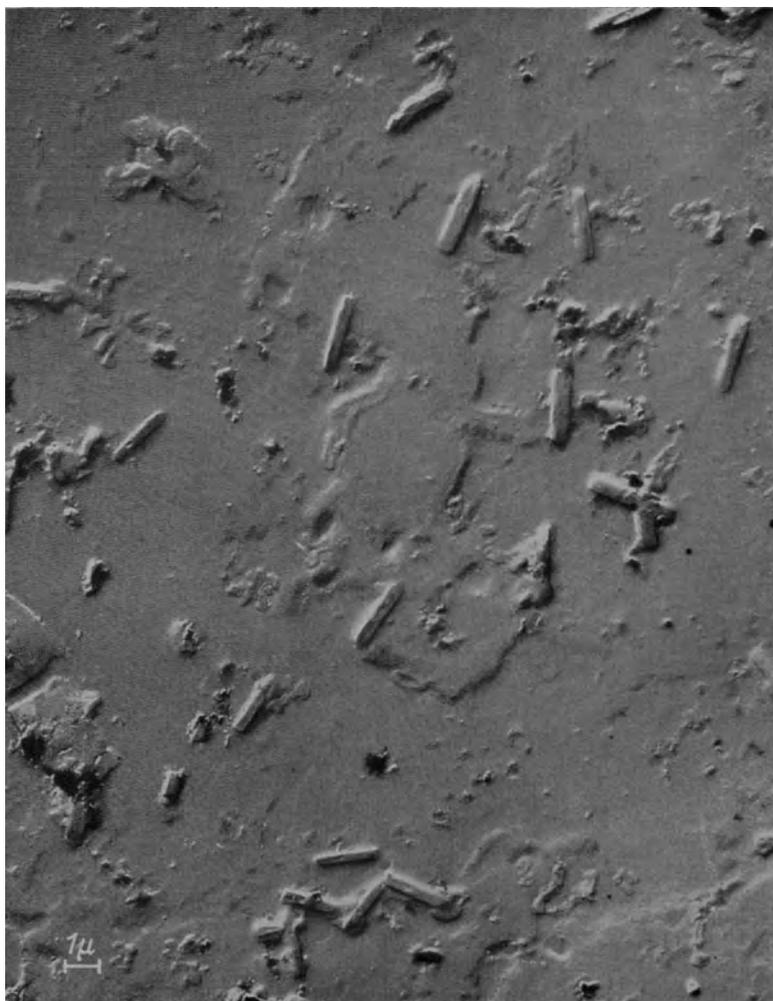
Sehr feine Aufdampfschichten, wie auf dieser Seite, erscheinen im Lichtmikroskop völlig strukturlos. Aus Elektronenbeugungsaufnahmen weiß man jedoch, daß sie aus sehr kleinen Kriställchen zusammengesetzt sind. Das Obermikroskop erlaubt ihren Abstand bei feinkörnigen Schichten wie Indium (oberes Bild) und Eisen (unteres Bild) zu der Größenordnung von 10μ zu ermitteln. Das entspricht einer Anzahl von 10^{11} Körnern je Quadratcentimeter. Denkt man sich diesen Quadratcentimeter auf eine Fläche von 1000 qm vergrößert, so würde ein Kriställchen rund 1 mm groß sein.

Mahl und Herbeck [148].
Kinder [148].

Magnet. Aufn.
Elektr. Aufn.

Vergr.: 25 000 fach.
Vergr.: 22 000 fach.

Physik: Salzkristalloboberfläche.



Kochsalzspaltfläche.

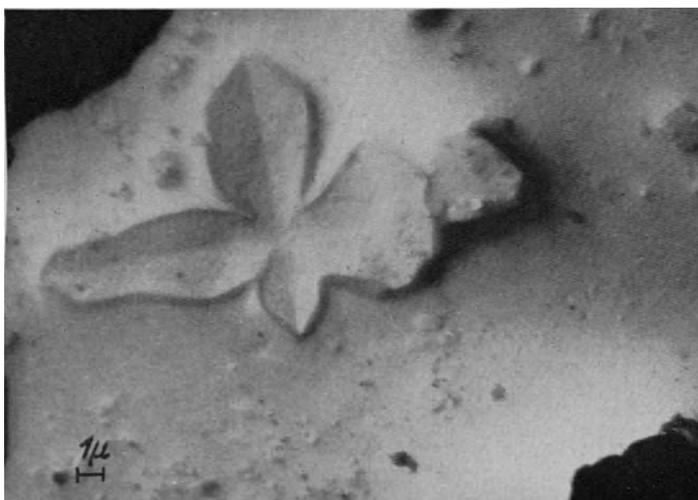
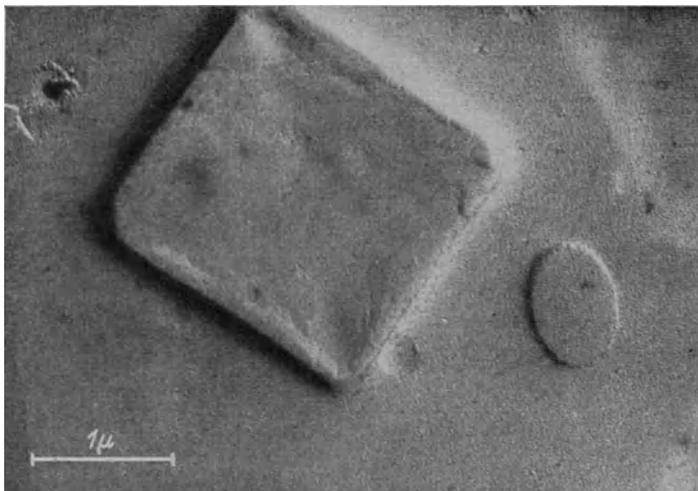
Die Oberflächenabbildung von gespaltenem Kochsalz wurde nach dem Abdruckverfahren (vgl. S. 116) mit Hilfe einer Chromaufdampfschicht hergestellt. Die regellos verstreut liegenden Stäbchen, welche durch die schräge Bedampfung sehr plastisch hervortreten, sind vermutlich Kristallbruchstücke, die beim Aufspalten des Kochsalzkristalls entstanden sind. Dagegen gehören die Unebenheiten, die an Ätzfiguren erinnern, zweifellos der Oberfläche selbst an. Diese Unebenheiten, deren Begrenzungskanten in zwei zueinander senkrechten Richtungen orientiert sind, sind vermutlich echte Bruchfiguren. Das übermikroskopische Bild zeigt also demnach, daß der Bruch ebenso wie im makroskopischen Gebiet auch im submikroskopischen Gebiet vorwiegend entlang der Würfelflächen erfolgt.

Mahl [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 5000 fach.

Physik: Salzkristalloberfläche.



Kristallfiguren bei Kochsalz und Seignettesalz.

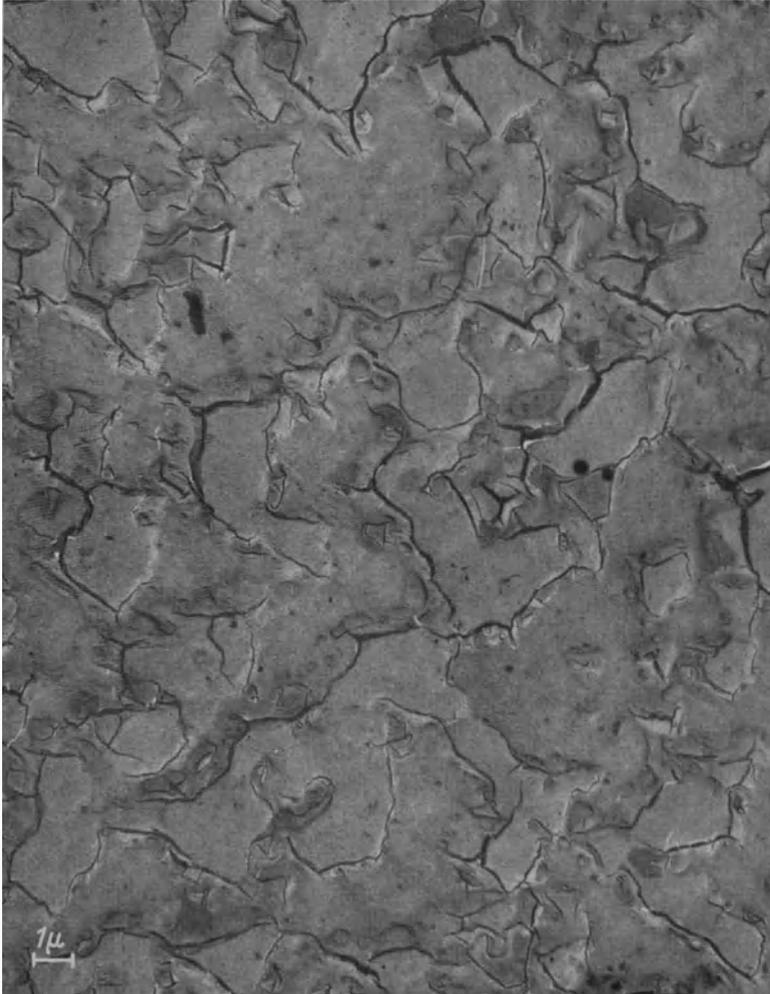
Bei der Kochsalzspaltfläche des oberen Bildes zeigt die regelmäßige Ausbildung einer quadratischen Spaltfigur, daß die Spaltung auch in übermikroskopischen Dimensionen längs der Würfelfläche erfolgt. — Die untere Aufnahme von Seignettesalz, das nach längerem Liegen an der Luft Kristallwasser verloren hatte, läßt erkennen, daß sich neue regellos orientierte Kristalle an der Oberfläche gebildet haben.

Mahl.
Burkhardt u. Mahl.

Elektr. Aufn.
Elektr. Aufn.

Vergr.: 19 000 fach,
Vergr.: 4 000 fach.

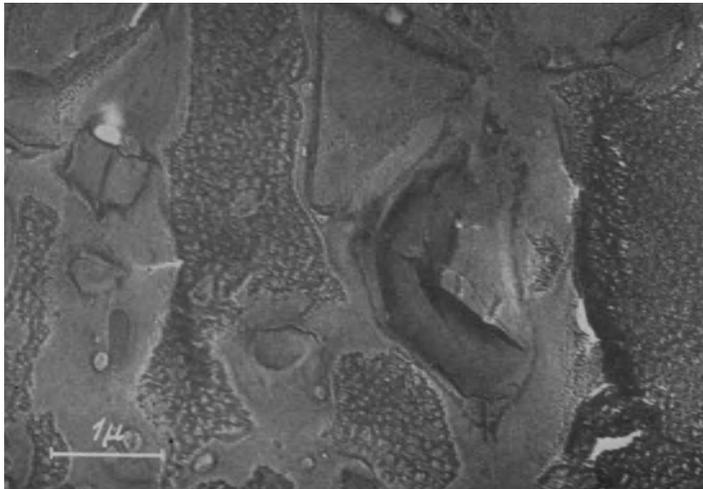
Physik: Salzkristalloberfläche.



Kochsalz-Ätzfläche.

Der kubische Kochsalzkristall wurde in einer Oktaederfläche geschnitten, geschliffen und mit Wasser angeätzt. Die Ätzfiguren sind — vermutlich wegen der kräftigen Ätzwirkung des Wassers — nicht regelmäßig begrenzt. Trotzdem glaubt man dreieckige Grundformen zu erkennen, wie sie bei Ätzfiguren der Oktaederfläche zu erwarten sind (vgl. Gegenseite).
Mahl [148]. Elektr. Aufn. Vergr.: 5000 fach.

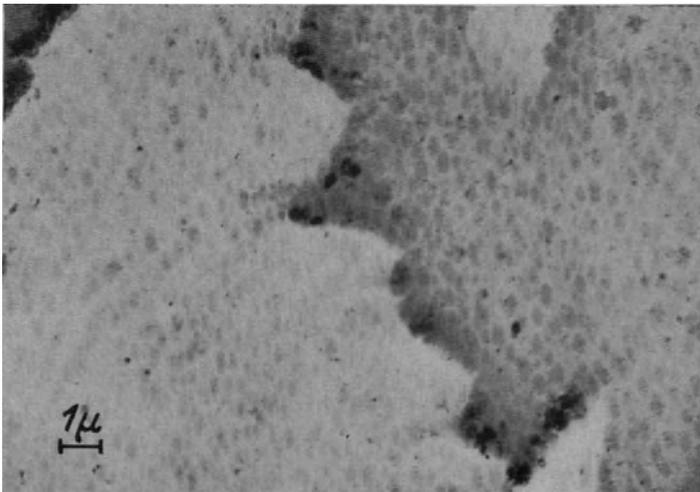
Physik: Salzkristalloberfläche.



Einzelheiten einer Kochsalz-Ätzfläche.

Die wiedergegebenen hochvergrößerten Bilder geben Einzelheiten eines geätzten Kochsalzkristalls wieder, der parallel zur Oktaederebene angeschliffen war. Die dreieckigen Ätzfiguren sind hier deutlicher zu erkennen als auf der Gegenseite.
Mahl. Elektr. Aufn. Vergr.: 16 000 fach.

Physik: Glasoberfläche.

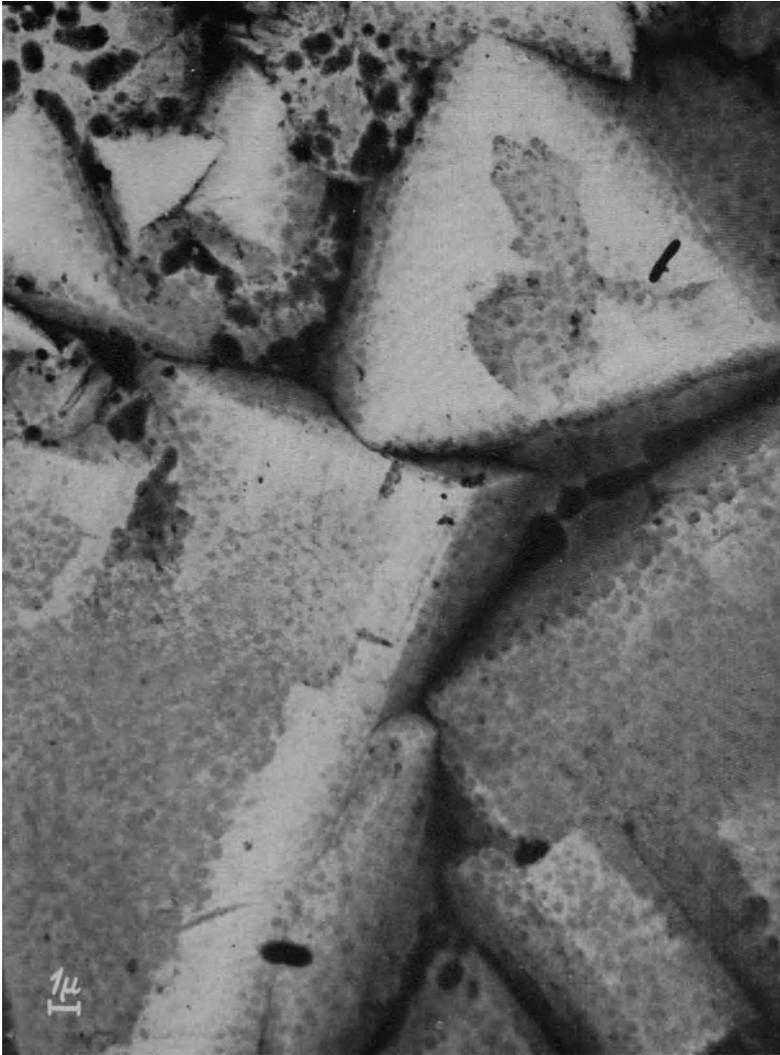


Ätzen von Glas.

Wenn Glas in Flußsäurerauch geätzt wird, bilden sich feine Grübchen von Bruchteilen eines Tausendstel Millimeters Durchmesser. Der Aluminiumabdruck des Glases (oberes Bild) zeigt diese Grübchen in gleicher Größe wie der Zaponlackabdruck (unteres Bild), wenn auch die beiden Verfahren merklliche Unterschiede in der Strukturwiedergabe zeigen.

Gözl. Elektr. Aufn. Vergr.: 5000 fach.

Physik: Glasoberfläche.



Ätzen von Glas.

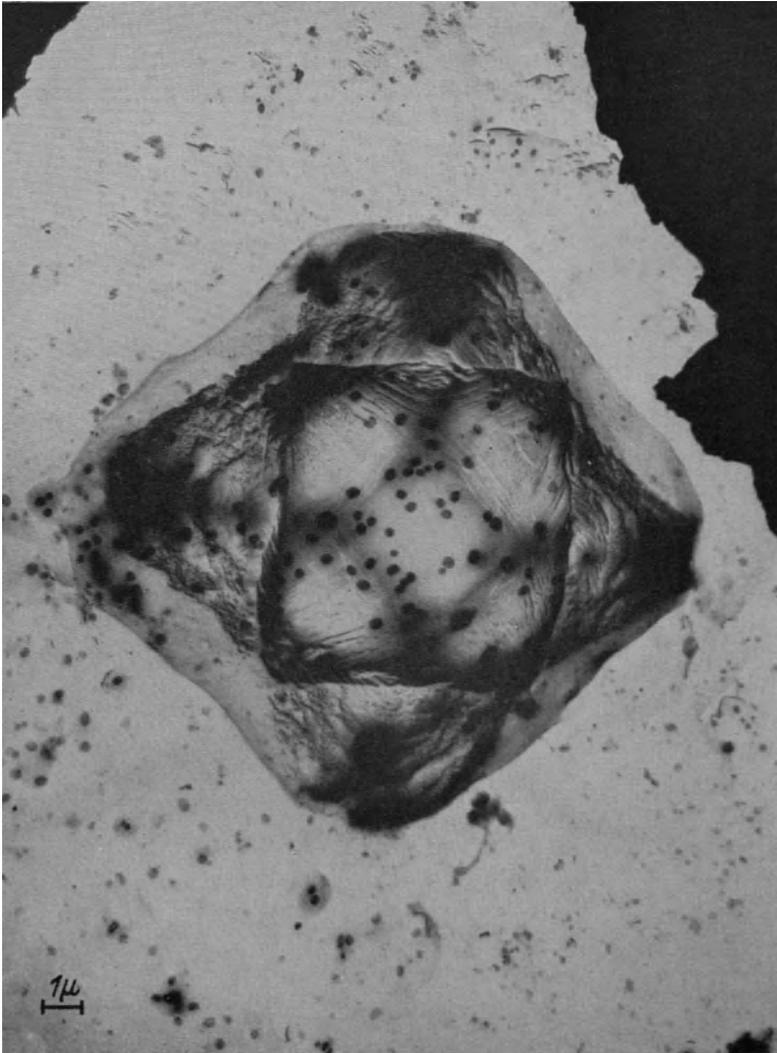
Beim Ätzen von Glas mit einer Lösung von Ammoniumfluorid in verdünnter Flußsäure bilden sich „Schutzkristalle“ an der Glasoberfläche, an deren Rändern nun nur noch ein weiterer Angriff des Glases stattfinden kann. Die obige Aufnahme zeigt den Endzustand, bei dem die einzelnen zufällig verteilten Kristallkerne bis zur Berührung der Kristalle gewachsen sind.

Gözl.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 4000 fach.

Kristallographie: Ätzfigur.



Ätzgrube bei Salzsäure-Flußsäureätzung.

Außer den Würfelflächen werden durch Ätzung mit einem Salzsäure-Flußsäuregemisch bei Reinstaluminium auch andere Flächen freigelegt. Gelegentlich entstehen, wie es das Bild zeigt, Ätzgruben, deren Form an Rhombendodekaeder erinnert. Sie zeigen eine Vielzahl von verschieden gelagerten Ätzzfalten.

Mahl [146].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 6000 fach.

Kristallographie: Ätzfigur.



Ätzgrube bei Kalilaugenätzung.

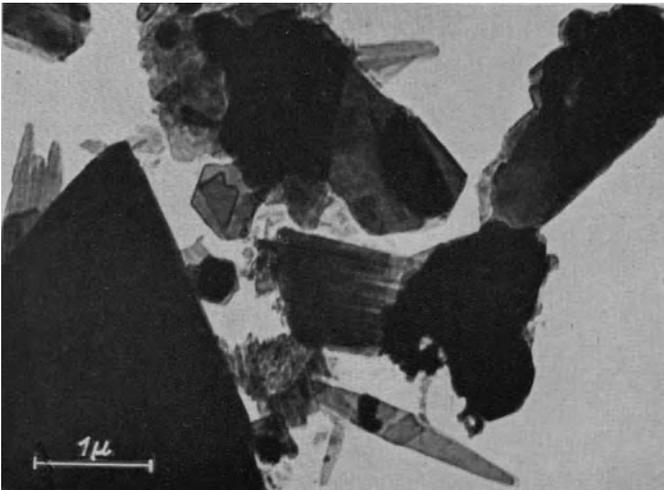
Während bei Salzsäure-Flußsäureätzung (s. Gegenseite) auch bei dem Entstehen von Ätzgruben im wesentlichen scharfkantige Formen vorherrschen, sind die Formen bei Kalilaugenätzung abgerundet. Dieser Unterschied zeigt sich deutlich auch bei der Tiefätzung von Aluminiumflächen, die mit Salpetersäure nachgeätzt sind (vgl. S. 168, 169).

Kinder.

Magnet. Aufn.

Vergr.: 8500 fach.

Werkstoffkunde: Mineralien.



Gips und Kaolin.

Das Übermikroskop reicht mit seiner Auflösung in Gebiete, in denen die Strukturunterschiede feiner Pulver deutlich werden. Dafür geben unsere Bilder von Gips (oberes Bild) und Kaolin (unteres Bild) zwei Beispiele.

Kinder [148].

Magnet. Aufn.

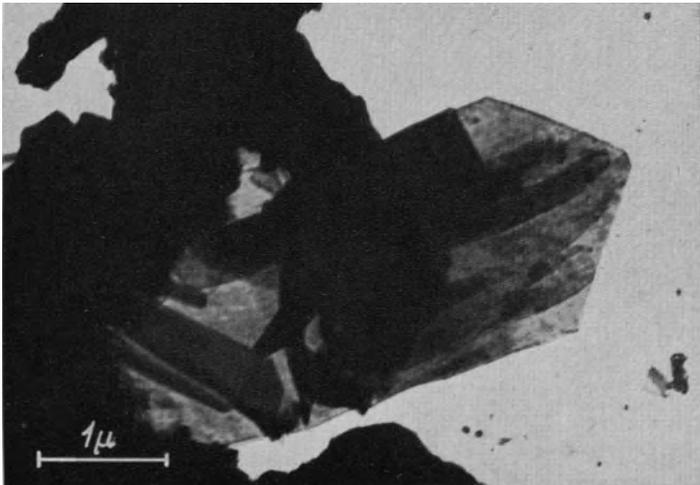
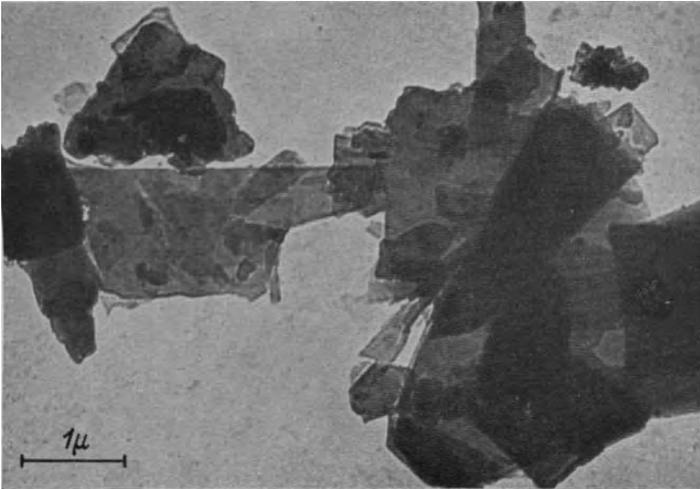
Vergr.: 14 000 fach.

Gözl [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 14 000 fach.

Werkstoffkunde: Mineralien.



Talkum und Magnesiumoxyd.

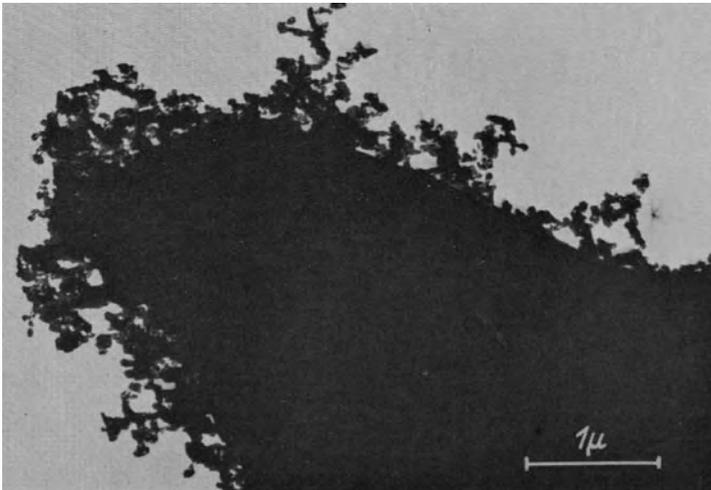
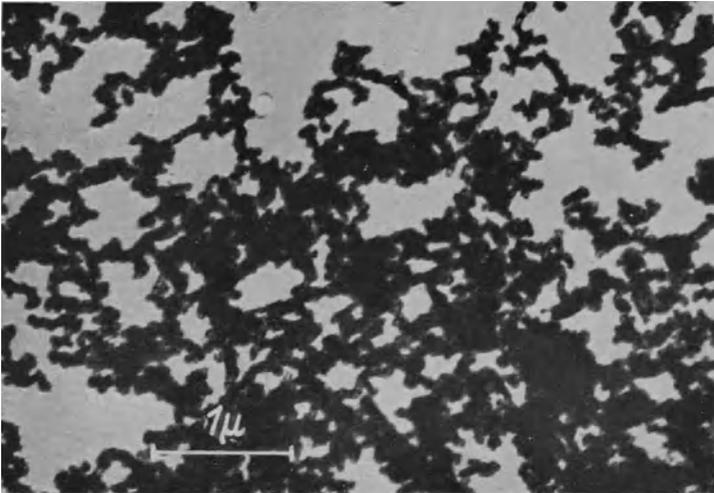
Zwei weitere Beispiele für die Anwendung des Übermikroskops in Mineralogie, Staubbeforschung bzw. Werkstoffkunde geben unsere beiden Bilder, deren oberes Talkum, deren unteres Magnesiumoxyd zeigt, das im Gegensatz zu den Präparaten der Seiten 97 u. 133 auf nassem Wege gewonnen war.

Götz [148].
Mahl [102].

Elektr. Aufn.
Elektr. Aufn.

Vergr.: 14 000 fach.
Vergr.: 17 000 fach.

Werkstoffkunde: Ruß.



Ruß aus Flammen.

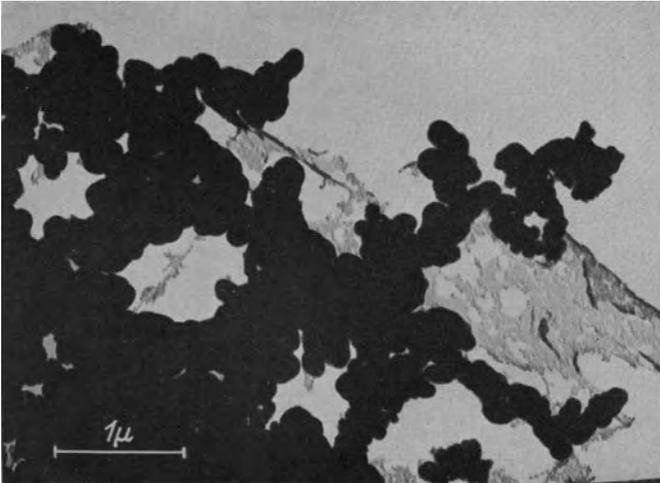
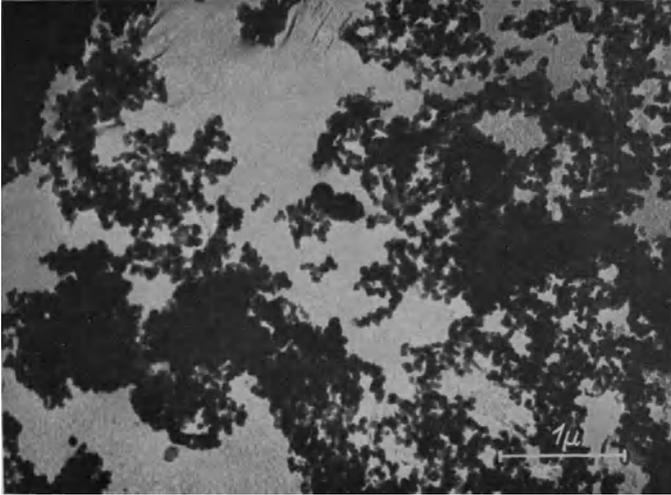
Ruß besteht im allgemeinen aus rundlichen Teilchen, die zur Bildung von Ketten neigen. Die Größe dieser Rußteilchen ist von einer zur anderen Rußsorte sehr verschieden. Unsere Aufnahmen zeigen Ruß, der im Laboratorium dadurch gewonnen wurde, daß der Objektträger über eine Kerzenflamme (unteres Bild) bzw. über eine Benzolflamme (oberes Bild) gehalten wurde.

Mahl [118].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 18 000 fach.

Werkstoffkunde: Ruß.



Technischer Ruß.

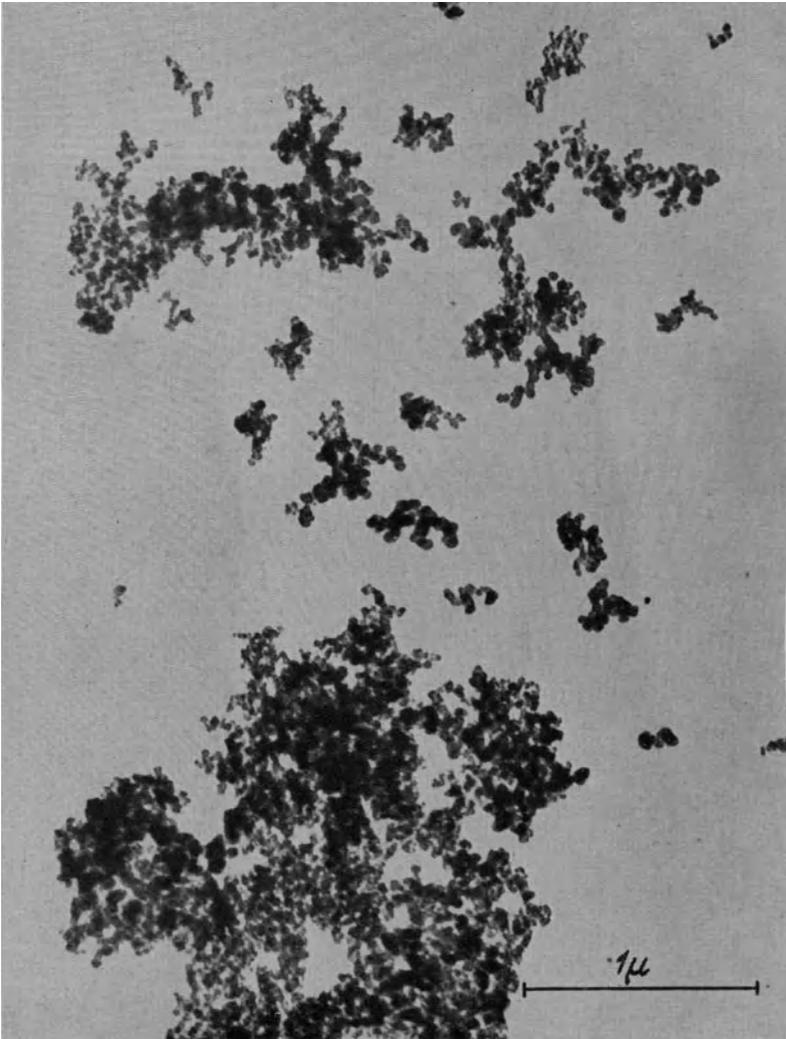
Ruß wird für die Gummierstellung gebraucht. Solcher „aktiver“ Ruß (oberes Bild), der in technischer Großfabrikation hergestellt wird, erweist sich aus relativ kleinen Teilchen bestehend. Von solchem sehr feinen Ruß führt die Skala der verschiedenen technischen Rußsorten bis zu den sehr großen Teilchen grober inaktiver Gasruße (unteres Bild).

Mahl [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 17 000 fach.

Werkstoffkunde: Ruß.



Technischer Ruß.

Die hier wiedergegebene technische Rußsorte, die z. B. in der Gummifabrikation eine Rolle spielt, zeigt extrem kleine Einzelkörnerchen in einer Größenordnung von etwa 10 μ , d. h. $\frac{1}{100000}$ mm.

Gözl.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 31 000 fach.

Werkstoffkunde: Zinkweiß.



Lichtbogen-Zinkweiß.

Die für Zinkoxyd typischen sternförmig angeordneten Kristallnadeln lassen sich besonders ausgeprägt aus einem Lichtbogen zwischen Zinkelektroden gewinnen. Die Sterne, die bei der Aufnahme vorwiegend mit drei Nadeln auf der Folie stehen, während die vierte, auf den Beschauer zugerichtete Nadel nicht erkennbar ist, gehören dem hexagonalen System an, in dem Zinkoxyd kristallisiert.

Gözl.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 10 000 fach.

Werkstoffkunde: Zinkweiß.



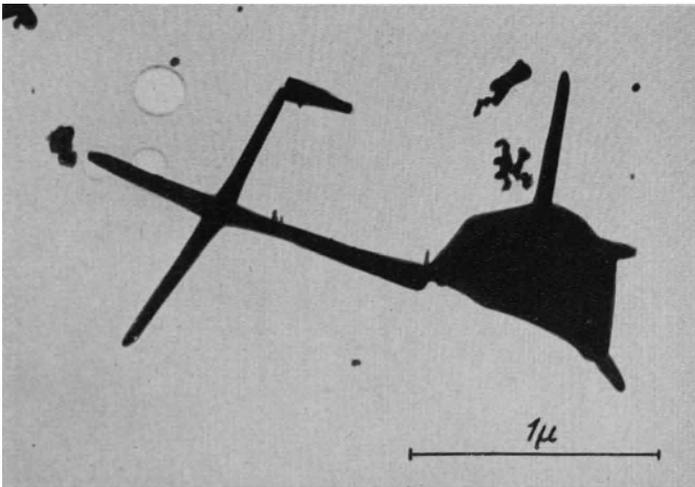
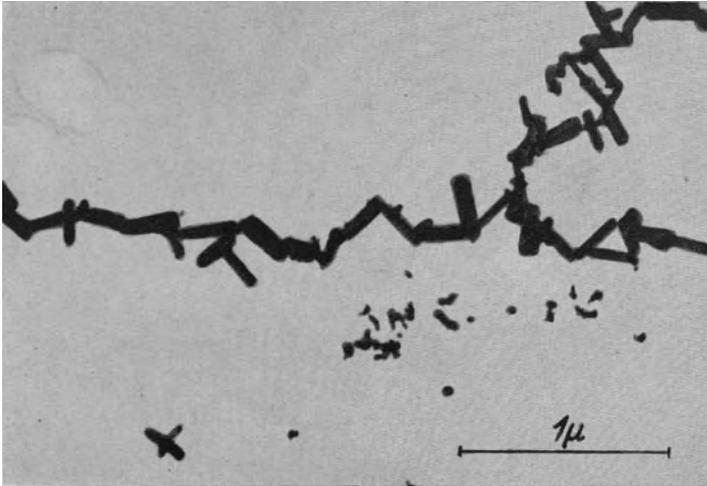
Technisches Zinkweiß.

Bei technischem Zinkoxyd, das durch Verbrennen von Zink in großen Ofen hergestellt wird, werden regelmäßige Kristalle, wie sie S. 161 gezeigt wurden, selten erhalten. Das obige Bild hoher Vergrößerung zeigt solche Kristallnadeln untermischt mit größeren Kristallgebilden, die im pyrogen hergestellten Zinkoxyd (Verbrennen im Luftstrom bei hoher Temperatur) je nach den Abkühlungsbedingungen in sehr verschiedenen Formen auftauchen. Arnold und Götz [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 25 000 fach.

Werkstoffkunde: Zinkweiß.



Lichtbogen-Zinkweiß.

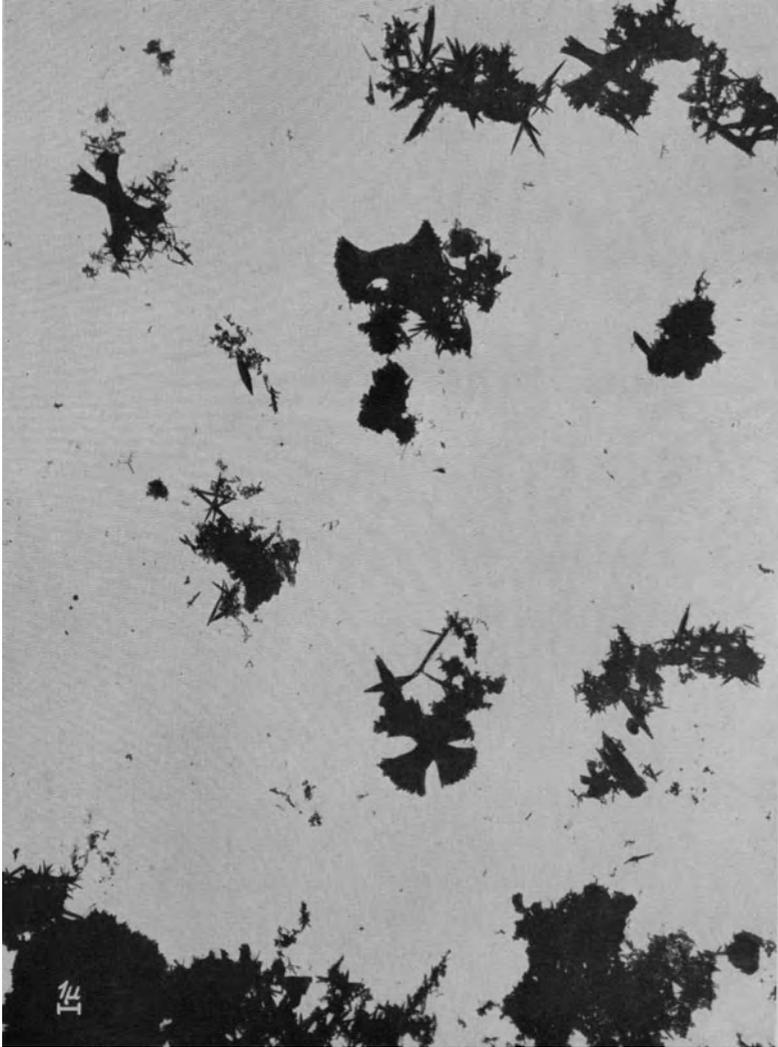
Neben voll ausgebildeten Nadelsternen treten im Lichtbogen auch mannigfaltige andere Kristallformen auf. Das obere Bild zeigt eine Kette kleiner Kristallnadeln, das untere einen kompakten Kristall im Kreuzungspunkt eines Kristallnadelsterns.

Gözl.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 28 000- u. 33 000 fach.

Werkstoffkunde: Kathodenpaste.



Gemischte Kathodenpaste.

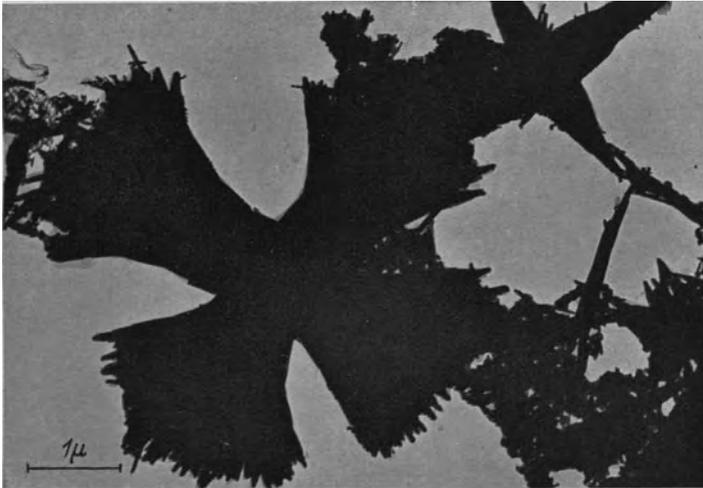
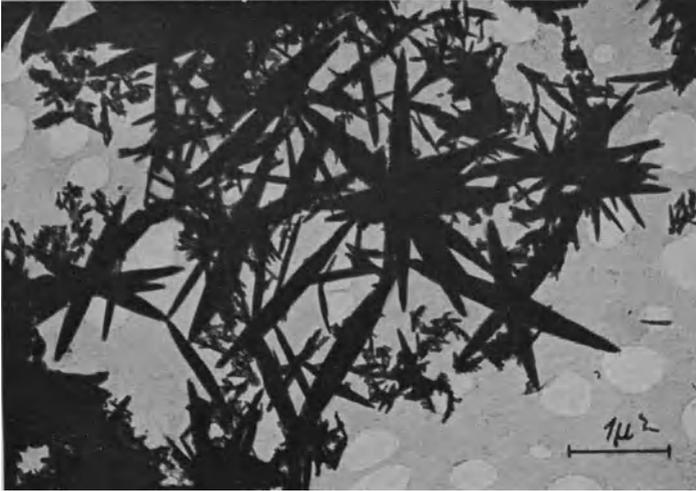
Eine Probe Kathodenpaste unbekannter Herkunft wurde von einer Oxydkathode abgekratzt und im Übermikroskop untersucht. Die Übersichtsaufnahme läßt die Zusammensetzung der Paste aus vielerlei Einzelbestandteilen, die sich nach Kristallform und Größe unterscheiden, erkennen.

Gölnz.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 3000 fach.

Werkstoffkunde: Kathodenpaste.



Gemischte Kathodenpaste.

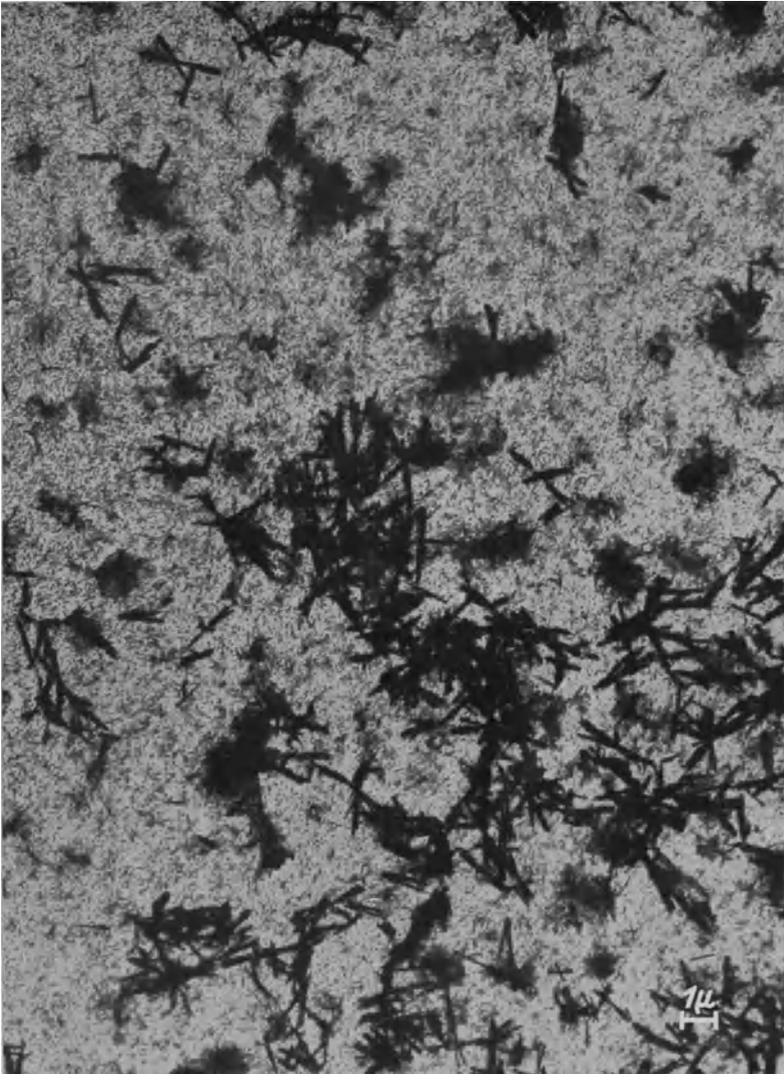
Die beiden Aufnahmen zeigen Einzelheiten der auf der Gegenseite im Übersichtsbild wiedergegebenen Kathodenpaste in höherer Vergrößerung. Die Bilder geben zwei sehr unterschiedliche Kristallformen wieder, wie sie bei dieser Substanz, die aus vielerlei Komponenten bestand, auftreten.

Gözl [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 13 000 fach.

Werkstoffkunde: Kathodenpaste.



Kolloidale Kathodenpaste.

Die Paste für Oxydkathoden wird im allgemeinen aus Barium- oder Strontium als Grundmaterial hergestellt. Die hier wiedergegebene Paste sollte nach ihrem Herstellungsverfahren kolloidaler Natur sein. Das Übermikroskop zeigte jedoch, daß neben den als kleine Körner wiedergegebenen Kolloidpartikeln auch ein großer Anteil relativ grober Kristallnadeln vorhanden war.

Mahl [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 4500 fach.

Metallographie: Walzstruktur von Aluminium.



Blankes Aluminium.

Nach dem Abdruckverfahren (vgl. S. 116) wurde die Oberfläche von blankem Aluminiumblech, wie es handelsüblich ist, übermikroskopisch untersucht. Das Bild zeigt, daß die Oberfläche viele feine Unebenheiten, Fremdkörper und Löcher hat. Die Walzstruktur von oben nach unten ist deutlich erkennbar.

Mahl [121].

Elektr. Aufn. (Oxydabdruck).

Vergr.: 8500 fach.

Metallographie: Aluminium-Tiefätzung.



Salzsäure-Ätzung.

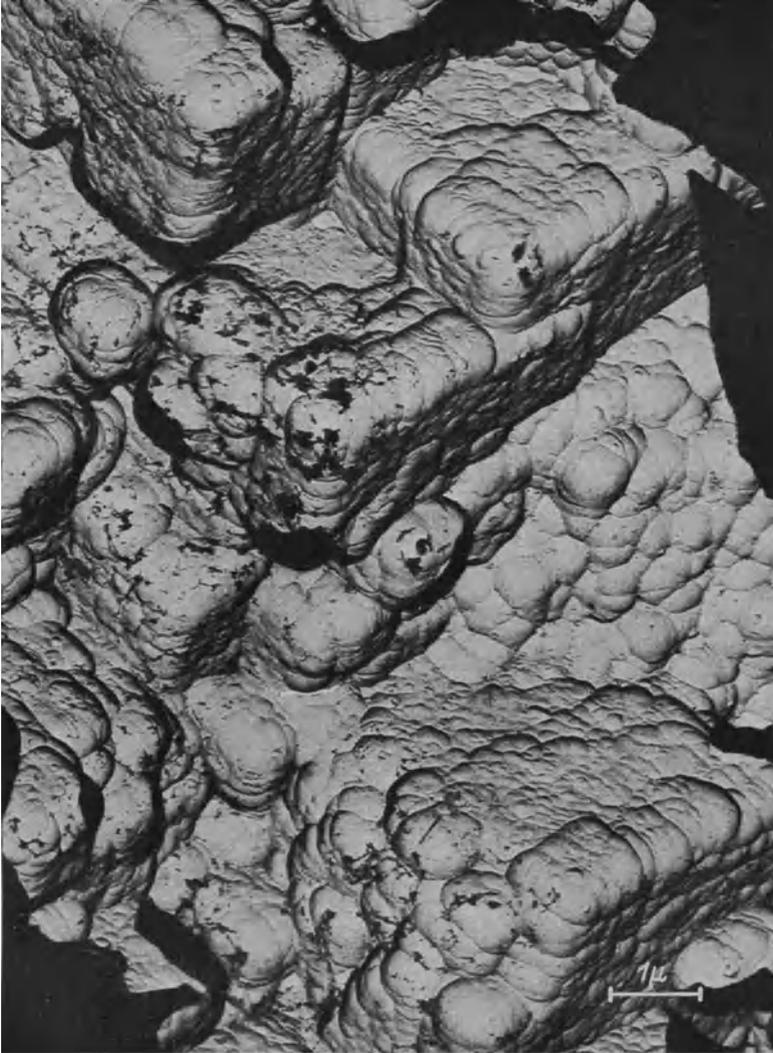
Aluminium wurde mit Salzsäure-Flußsäure-Gemisch geätzt. Das Übermikroskop zeigt ein Gebirge aus Würfeln, wobei die Kanten der Würfel scharfkantig sind.

Mahl [136].

Elektr. Aufn. (Oxydabdruck).

Vergr.: 11 000 fach.

Metallographie: Aluminium-Tiefätzung.



Salpetersäure-Nachätzung.

Wird ein mit Salzsäure-Flußsäure-Gemisch geätztes Aluminium (vgl. Gegenseite) mit heißer Salpetersäure nachgeätzt, so bilden sich Grübchen auf den vorher weitgehenden glatten Würfel-Flächen und -Kanten.

Mahl [131].

Elektr. Aufn. (Oxydabdruck).

Vergr.: 13 000 fach.

Metallographie: Aluminium-Tiefätzung.



Elektrolytisch geätztes Aluminium.

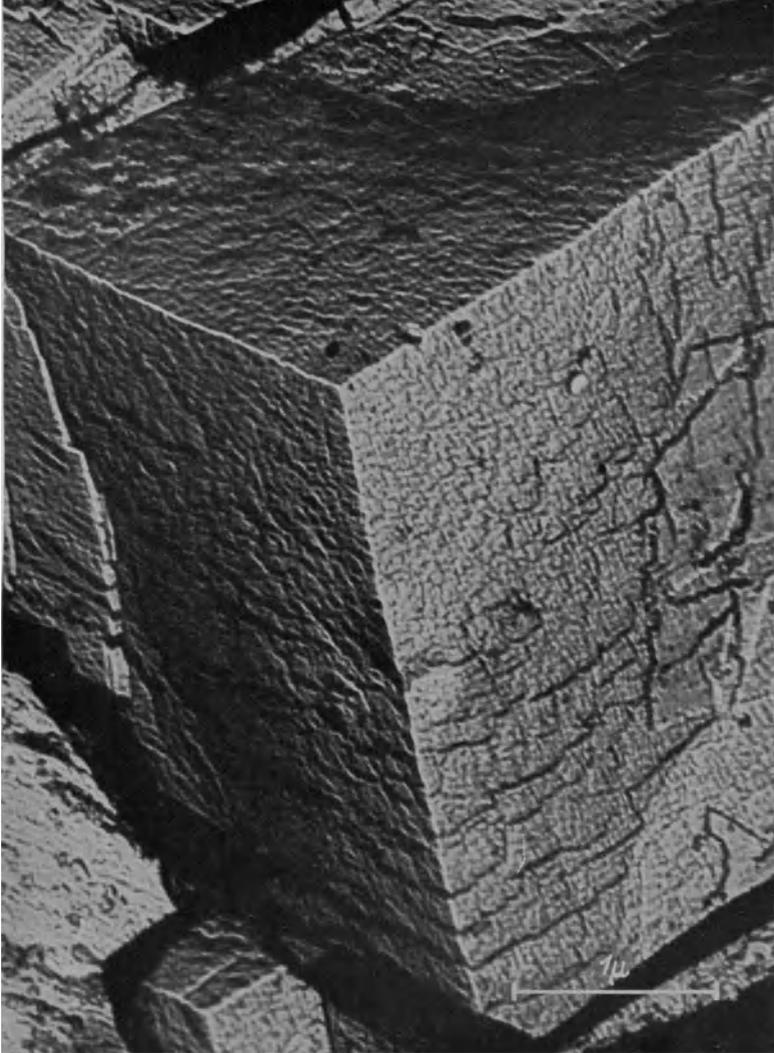
Bei der elektrolytischen Ätzung von Aluminium ergibt sich ein ganz ähnliches Ätzrelief wie bei der Ätzung mit Salzsäure (vgl. S. 168). Bei beiden Ätzungen treten Würfelflächen in den Vordergrund.

Mahl.

Elektr. Aufn. (Oxydabdruck).

Vergr.: 15 000 fach.

Metallographie: Aluminium-Tiefätzung.



Ätzwürfel bei technischem Aluminium.

Das Bild zeigt einen besonders gut ausgebildeten Ätzwürfel, der sich bei elektrolytischer Ätzung von technischem Aluminium bildete. Aus der Rauigkeit der einzelnen Flächen ersieht man, daß der Materialabbau über größere Bereiche nicht genau längs der Würfelseiten des Kristalls erfolgt.

Mahl [146].

Elektr. Aufn. (Oxydabdruck).

Vergr.: 27 000 fach.

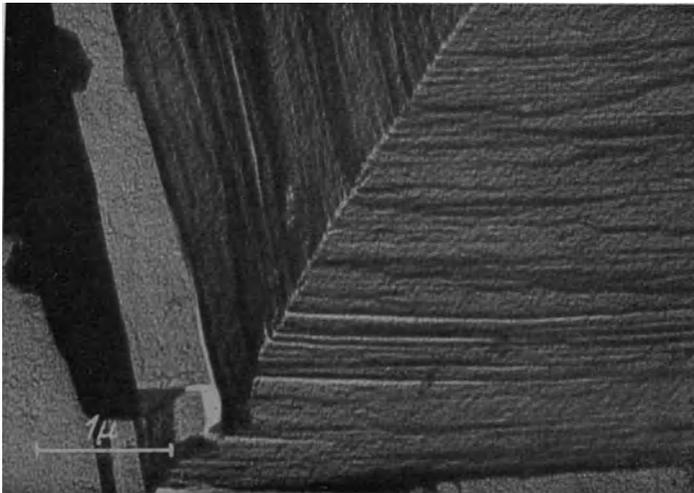
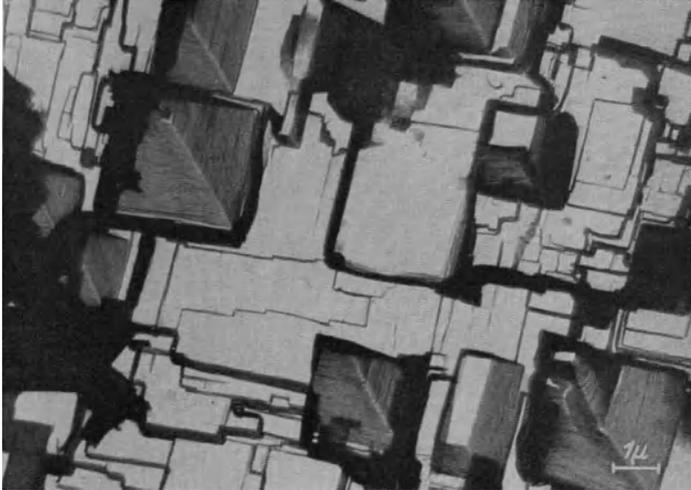
Metallographie: Aluminium-Tiefätzung.



Reinstaluminium.

Bei der Ätzung von Reinstaluminium mit wässriger oder alkoholischer Salzsäure wird der würfelförmige Materialabbau häufig durch Bildung von Pseudopyramiden verdeckt, die in Wirklichkeit aus feinsten Treppenstufen bestehen. Vgl. auch die Stereoaufnahme S. 122. Mahl und Stranski. Elektr. Aufn. (Oxydabdruck). Vergr.: 10 000 fach.

Metallographie: Aluminium-Tiefätzung.



Pyramiden-Pseudoflächen.

Bei verunreinigtem Aluminium (99,5% Al) gelingt die Erzeugung von Pseudopyramidenflächen ebenfalls dann, wenn die Ätzwirkung der Salzsäure durch Alkohol oder besonders durch Glycerinzusatz stark herabgesetzt wird. Auf dem unteren Bild ist der treppenförmige Aufbau einzelner Pyramidenflächen besonders gut zu erkennen.

Mahl und Stranski.

Elektr. Aufn.(Oxydabdruck). Vergr.: 6000- bzw. 18 000 fach.

Metallographie: Aluminium-Tiefätzung.



Ätzung mit Salzsäure-Gas.

Während bei der Ätzung von Aluminium in wässriger oder alkoholischer Salzsäure stets ein würfelförmiges Ätzrelief auftritt, bilden sich bei der Ätzung mit trockenem Salzsäure-Gas bei erhöhter Temperatur neben Würfflächen vorwiegend Oktaederflächen.
Mahl und Stranski. Elektr. Aufn. (Oxydabdruck). Vergr.: 9000 fach.

Metallographie: Geätzte Metalle.



Nickel.

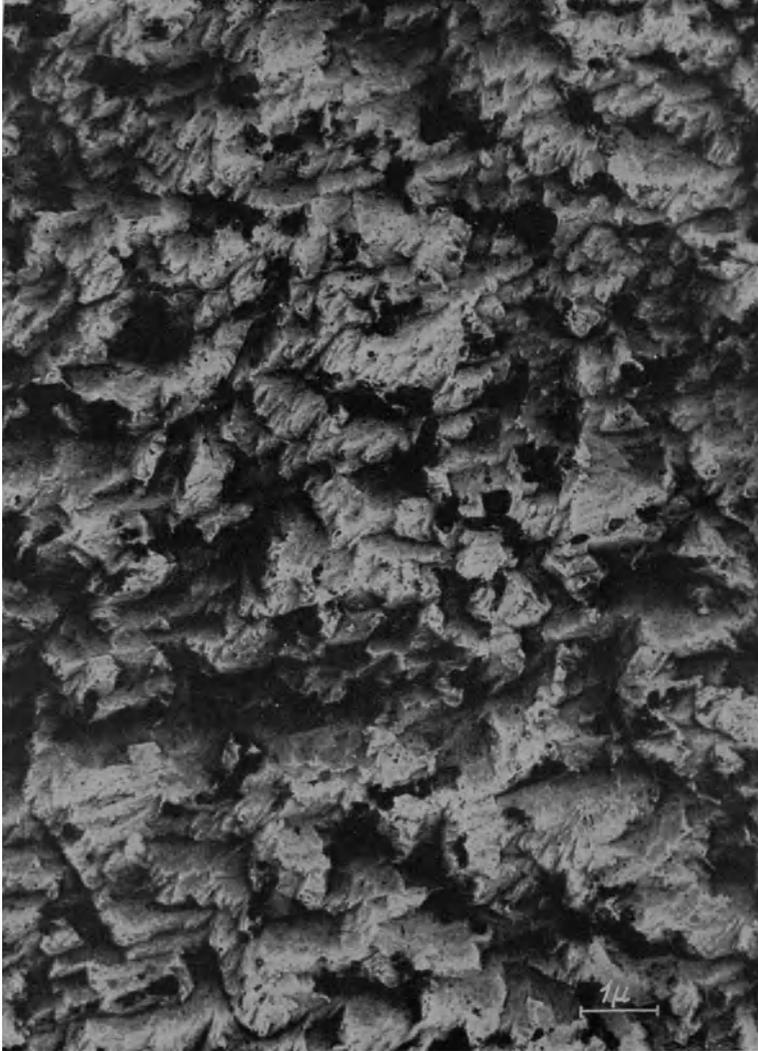
Wie bei Aluminium, das die vorhergehenden Bilder darstellten, herrscht auch bei Nickel der Abbau in Würfflächen vor. Die Ätzfiguren, die sich bilden, erinnern bei Nickel an Eiskristalle an Fensterscheiben.

Mahl u. Seeliger [136].

Elektr. Aufn. (Oxydabdruck).

Vergr.: 7000 fach.

Metallographie: Geätzte Metalle.



Kupfer.

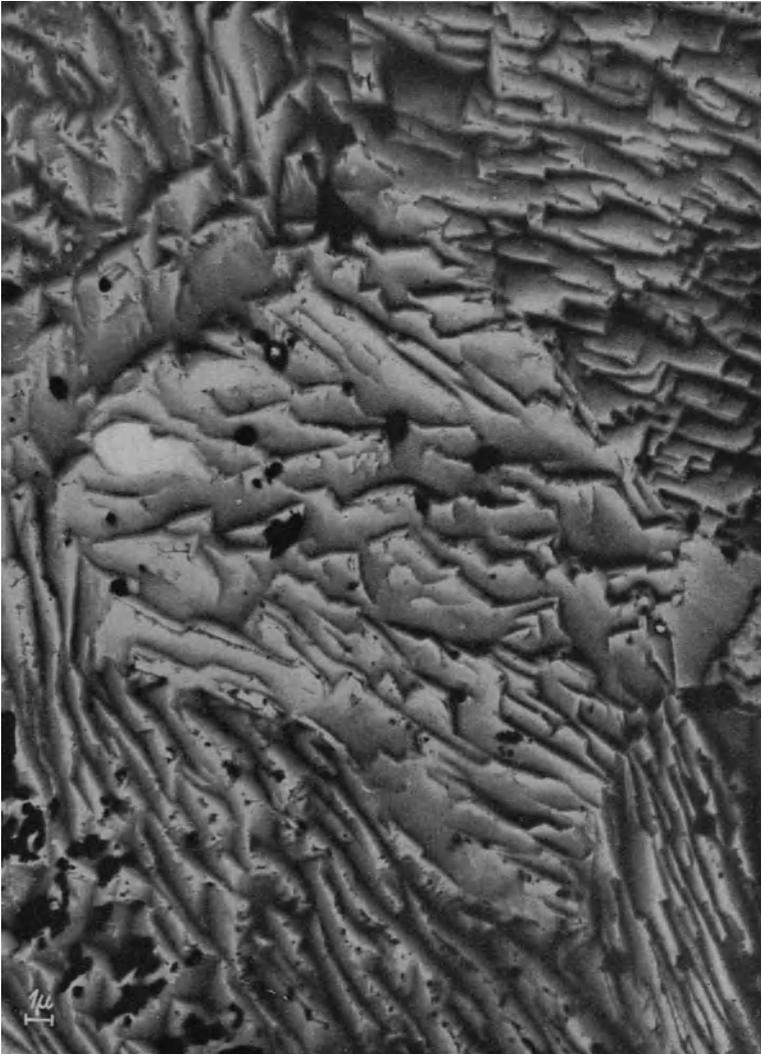
Eine ganz andere Oberflächenstruktur als bei Aluminium und Nickel ergibt sich bei Kupfer, das mit Salzsäure geätzt worden war. Übrigens erfolgte bei dieser Aufnahme ebenso wie bei den Stahlaufnahmen S. 178, 179 der Abdruck mittels eines Lackfilms, während man sich sonst häufig des Oxydabdrucks bedient.

Mahl u. Seeliger [136].

Elektr. Aufn. (Lackabdruck).

Vergr.: 10 000 fach.

Metallographie: Geätzte Metalle.



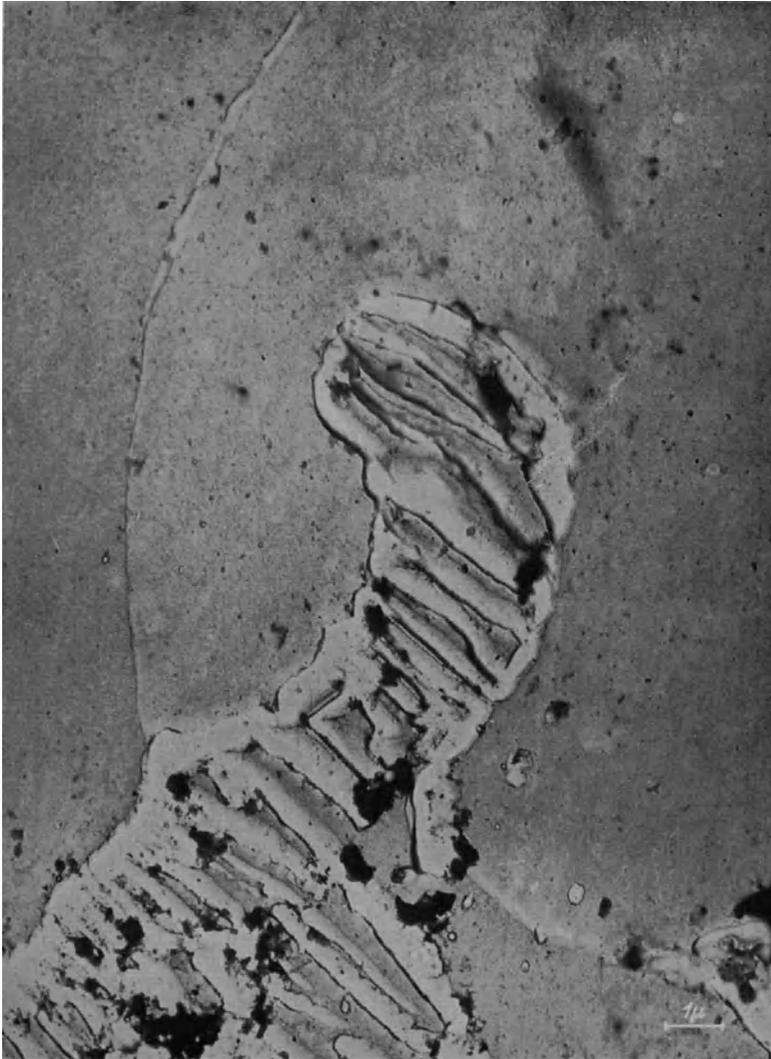
Messing.

Zur Abbildung der geätzten Messingoberfläche wurde, wie auf dem Bild der Gegenseite, ein Zaponabdruckfilm verwendet. Das Bild läßt deutlich verschiedene Kristallkörner an der unterschiedlichen Form der Ätzfiguren erkennen.

Mahl und Seeliger [148].

Elektr. Aufn. (Lackabdruck).

Vergr.: 4000 fach.



Perlitgefüge bei Stahl.

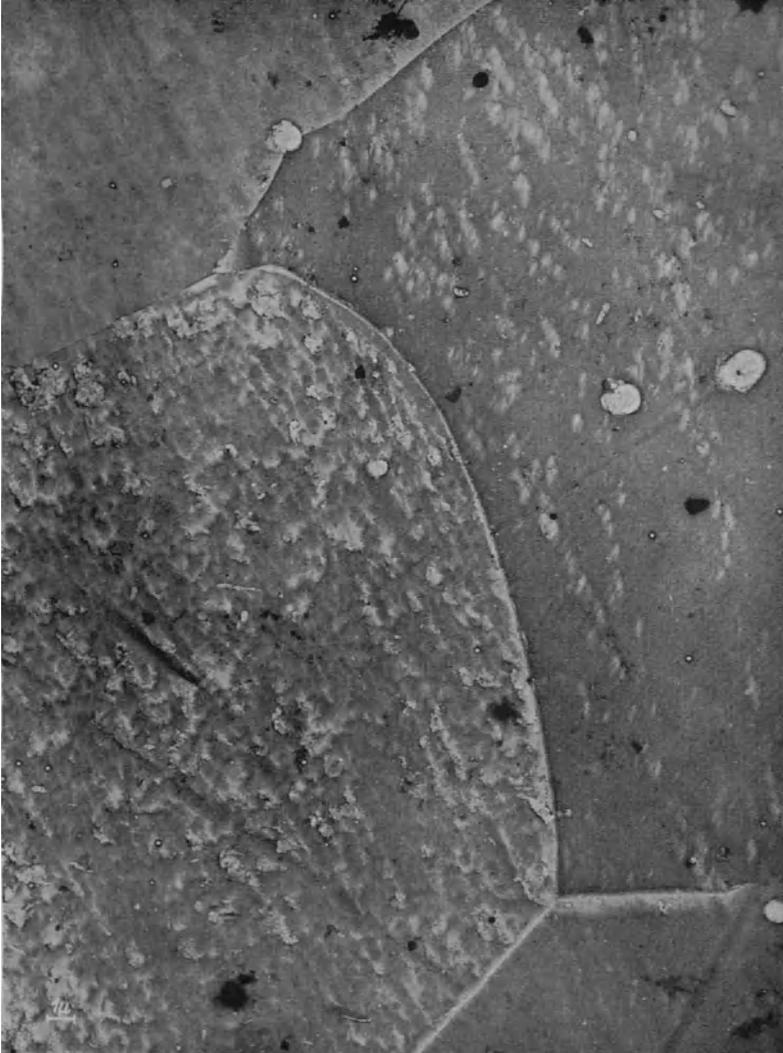
Das übermikroskopische Abdruckbild eines Perlitgefüges bei Kohlenstoff-Stahl läßt im Gegensatz zum lichtmikroskopischen Bild die einzelnen Perlitlamellen deutlich und scharf-begrenzt erkennen.

Duffek und Mahl [155].

Elektr. Aufn. (Lackabdruck).

Vergr.: 7000 fach.

Metallographie: Geätzte Metalle.



Ferritgefüge bei Stahl.

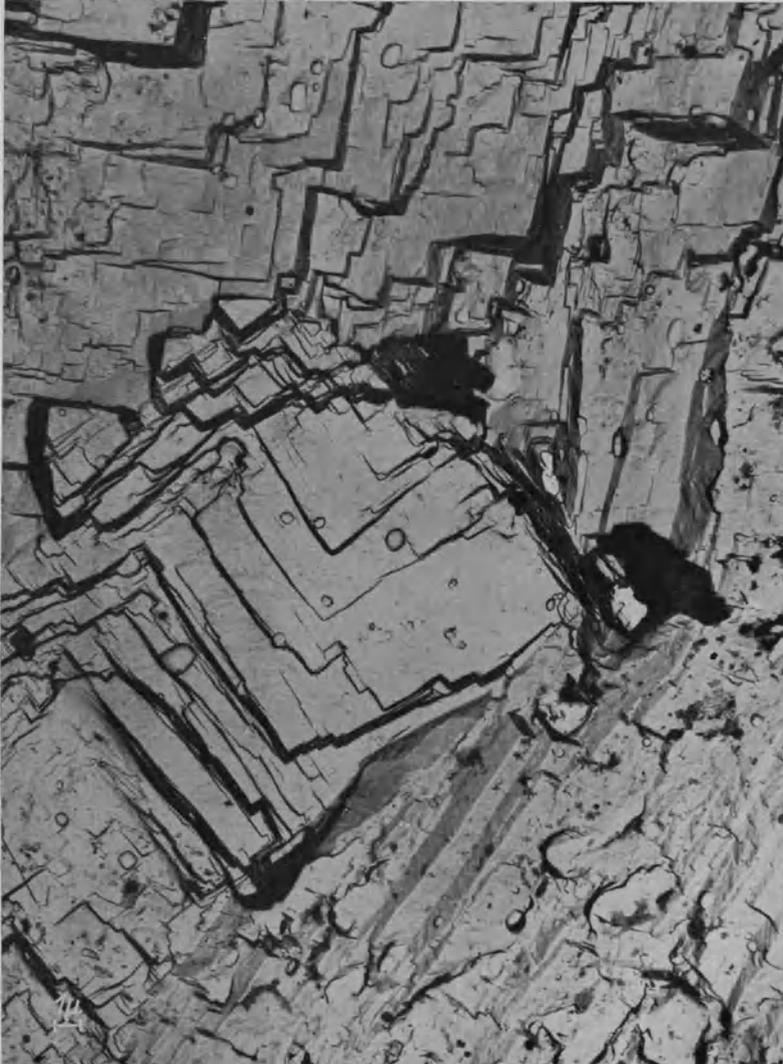
Das Bild zeigt ein Ferritgefüge eines Kohlenstoff-Stahls. Die auf den verschiedenen Kristalliten unterschiedliche Ätz-Feinstruktur weist auf eine verschiedene Legierung der Kristallite hin.

Duffek und Mahl.

Elektr. Aufn. (Lackabdruck).

Vergr.: 4000 fach.

Metallographie: Geätzte Metalle.



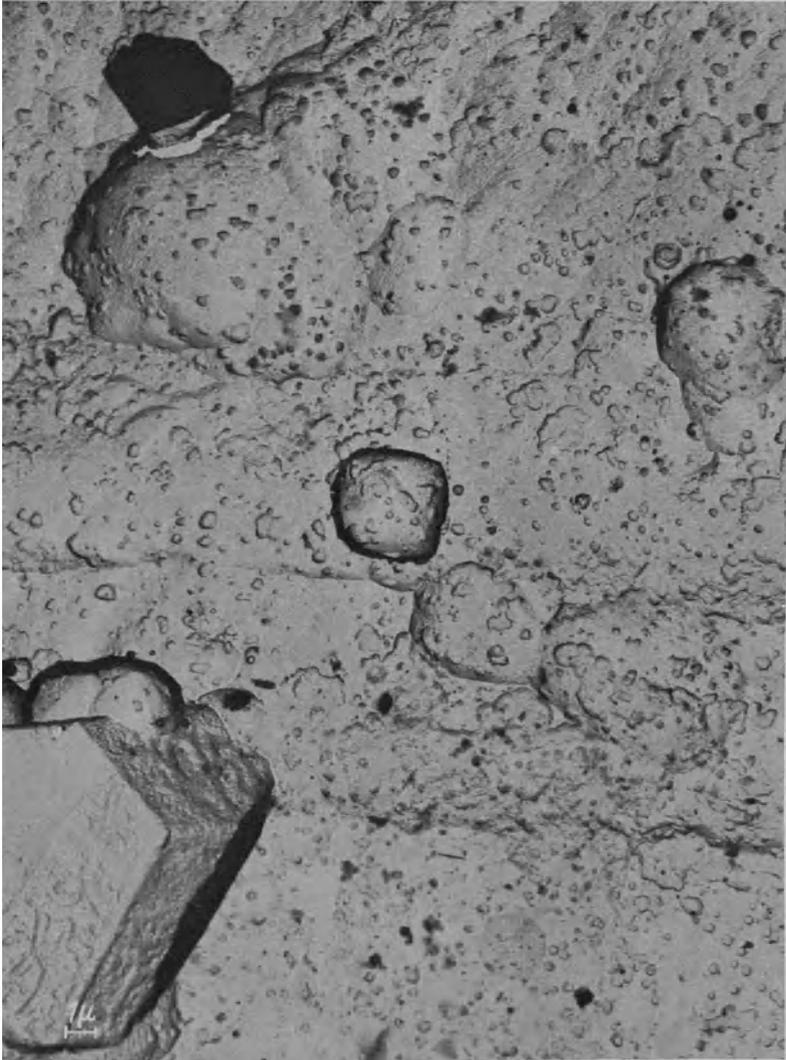
Hydranalium.

Dieses mit Salzsäure geätzte Hydranalium (Aluminium mit in diesem Fall 7% Magnesium) zeigt Kristallite, die bei dem hier wiedergegebenen homogenisierten Gefüge durch das Ätzmittel annähernd gleich weit abgebaut worden sind.

Mahl und Pawlek [148]. Elektr. Aufn. (Oxydabdruck).

Vergr.: 4000 fach.

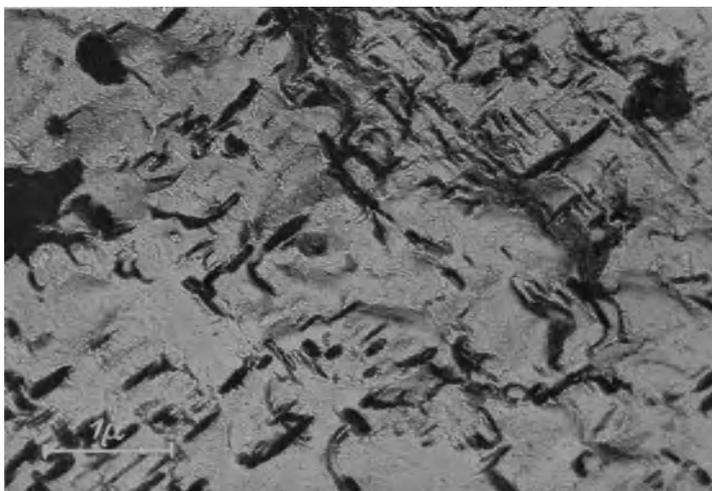
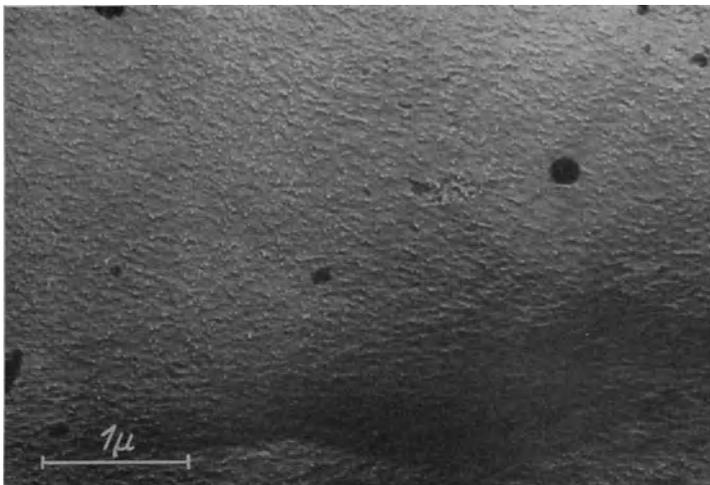
Metallographie: Geätzte Metalle.



Duralumin.

Das Bild stellt geätztes Duralumin dar, das vor der Ätzung einer Wärmebehandlung ausgesetzt war, die zu einer CuAl_2 -Ausscheidung geführt hatte. Die Ausscheidungen haben beim Ätzen Lokalelemente gebildet, so daß der Ätzangriff an den Stellen, an denen die Ausscheidungen saßen, besonders stark war und zu grubchenförmigen Ätzfiguren führte. Mahl [148]. Elektr. Aufn. (Oxydabdruck). Vergr.: 4000 fach.

Metallographie: Ausscheidungen.

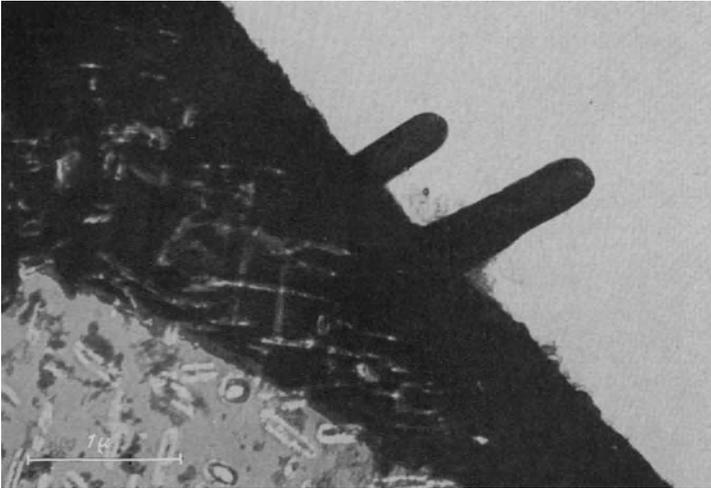
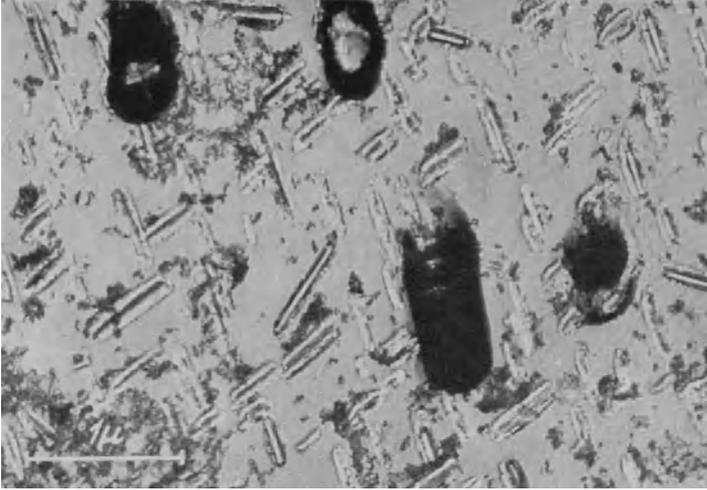


Duralumin.

Das Abdruckverfahren erlaubt auch den Nachweis von Ausscheidungen aus Legierungen, die bei geeigneter Wärmebehandlung des öfteren auftreten. Während auf dem oberen Bild, das kalt ausgehärtetes Duralumin wiedergibt, die Struktur des Abdruckfilmes keine wesentlichen Einlagerungen zeigt, sind auf dem warm ausgehärteten Duralumin (unteres Bild) die ausgeschiedenen CuAl_2 -Partikelchen deutlich als schwarze Stäbchen, die senkrecht zueinander orientiert sind, zu erkennen.

Mahl und Pawlek [147, 162]. Elektr. Aufn. (Oxydabdruck). Vergr.: 18 000- bzw. 16 000 fach.

Metallographie: Ausscheidungen.



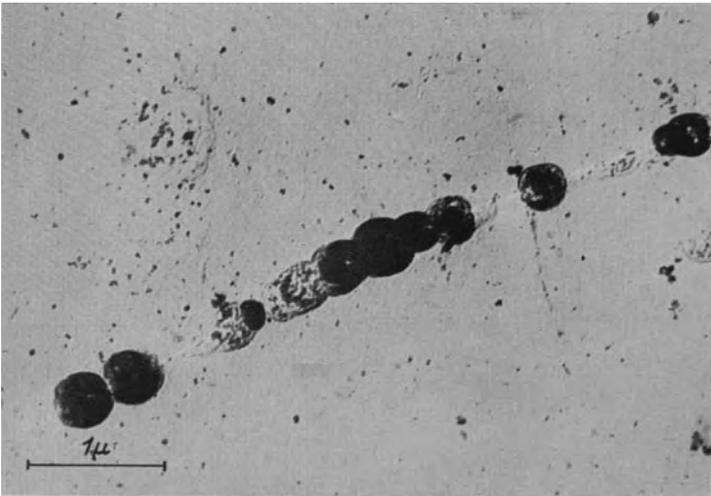
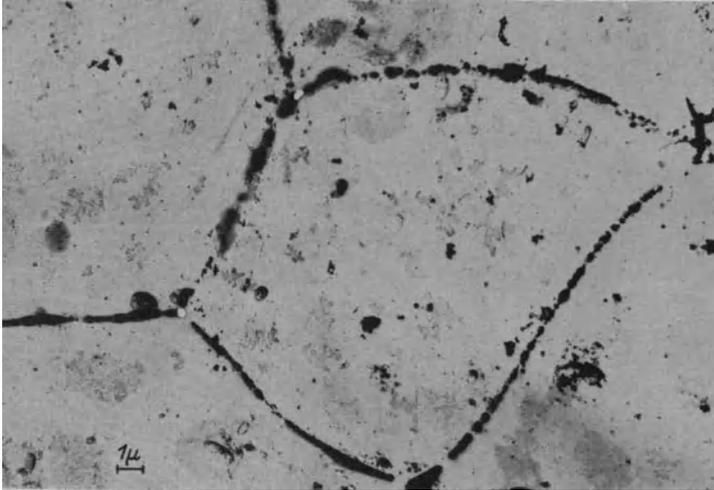
Duralumin.

Die beiden Aufnahmen geben ebenso wie das untere Bild auf der Gegenseite Ausscheidungen von getempertem Duralumin wieder. Die ausgeschiedenen Partikel sind infolge der höheren Anlaßtemperatur im vorliegenden Fall relativ groß. Die Stäbchenform der Ausscheidungen ist besonders deutlich auf dem unteren Bild zu erkennen, bei dem zwei Ausscheidungen zufällig über eine Umklappkante des Abdruckfilms hinausragen.

Mahl und Pawlek [147, 162]. Elektr. Aufn. (Oxydabdruck).

Vergr.: 20 000 fach.

Metallographie: Ausscheidungen.

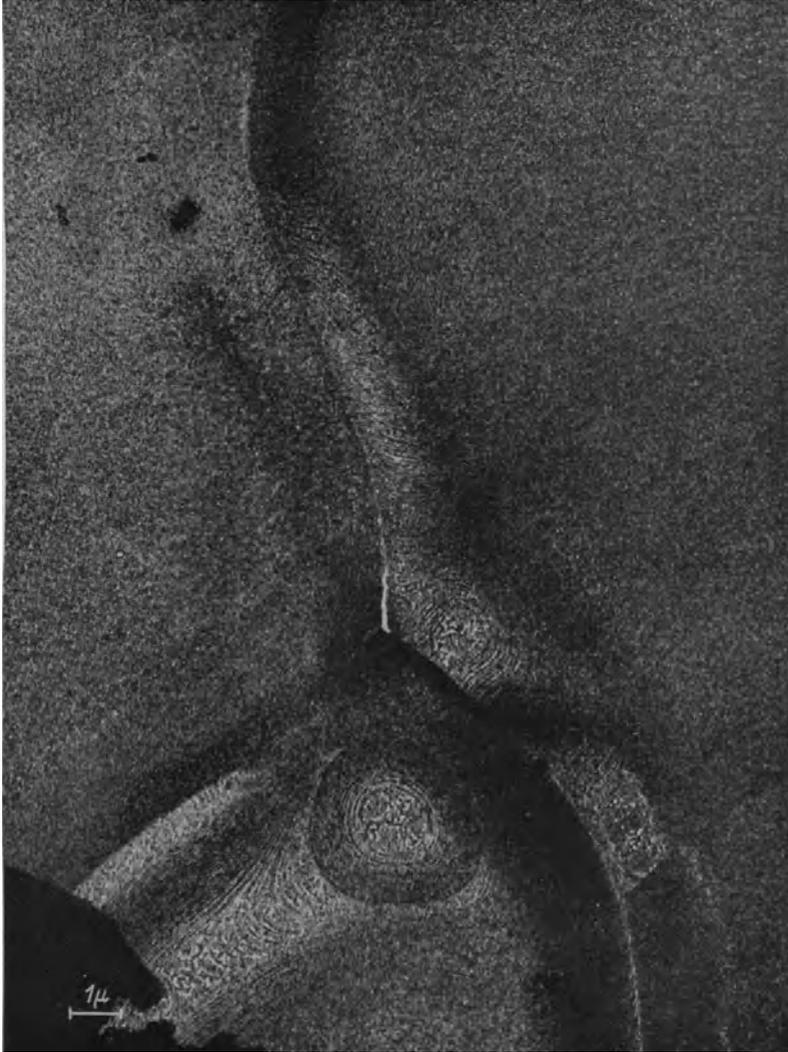


Getempertes Hydronalium.

Während bei Duralumin (vgl. Gegenseite) bei der Temperung Ausscheidungen inmitten der Kristallite auftreten, treten bei Hydronalium solche Ausscheidungen (Mg_2Al_3) zuerst vorwiegend an den Korngrenzen als perlschnurartig aneinandergereihte Körner auf (oberes Bild). Die übermikroskopische Aufnahme (unteres Bild) zeigt, daß solche „Perlen“ wie in dem hier wiedergegebenen Stadium auch eine Zusammenballung feiner kolloidaler Teilchen sein können.

Mahl und Pawlek [147, 162]. Elektr. Aufn. (Oxydabdruck). Vergr.: 3000- bzw. 18 000 fach.

Metallographie: Gleitlinien.



Gefügeabbau durch Glühen.

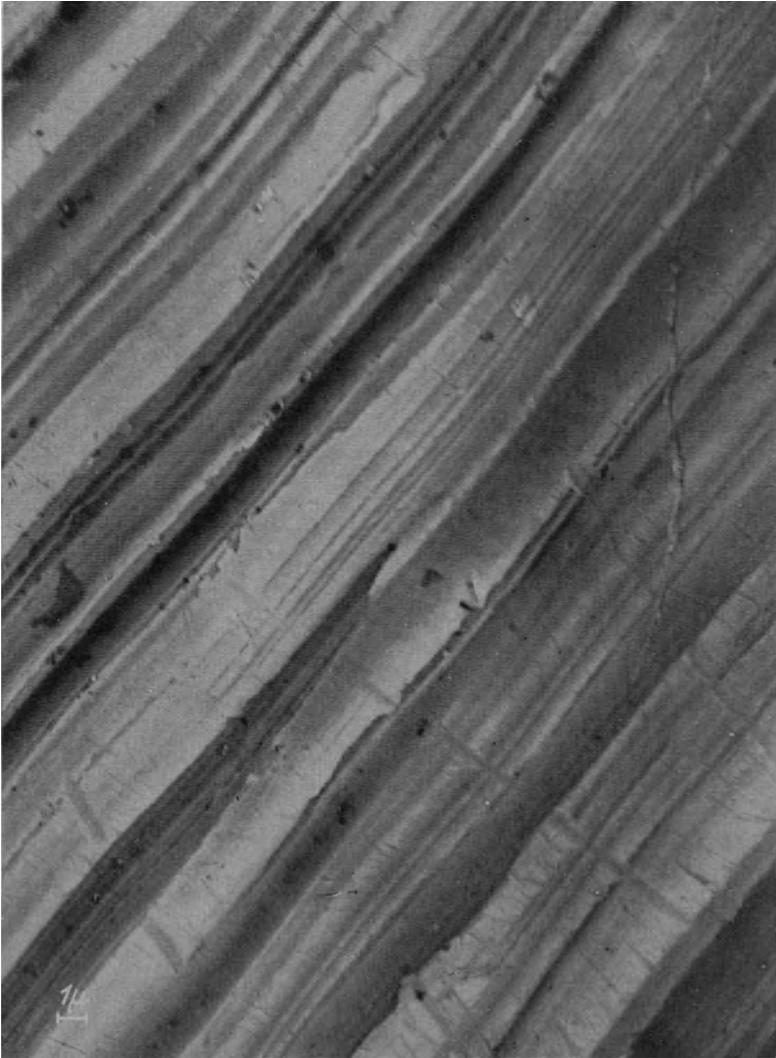
Das Bild stellt die Oberfläche eines Nickelbleches dar, das im Vakuum so hoch geglüht worden war, daß eine Verdampfung des Materials begonnen hatte. Das Material ist vorwiegend aus den Korngrenzen herausgedampft, so daß die Spuren von Gleitebenen, die in den einzelnen Kristalliten vorhanden waren, ähnlich wie Höhenlinien eines Landkartenreliefs beobachtbar sind.

Mahl und Seeliger [148].

Elektr. Aufn. (Oxydabdruck).

Vergr.: 7000 fach.

Bearbeitungsverfahren: Schleifen.



Geschliffener Stahl.

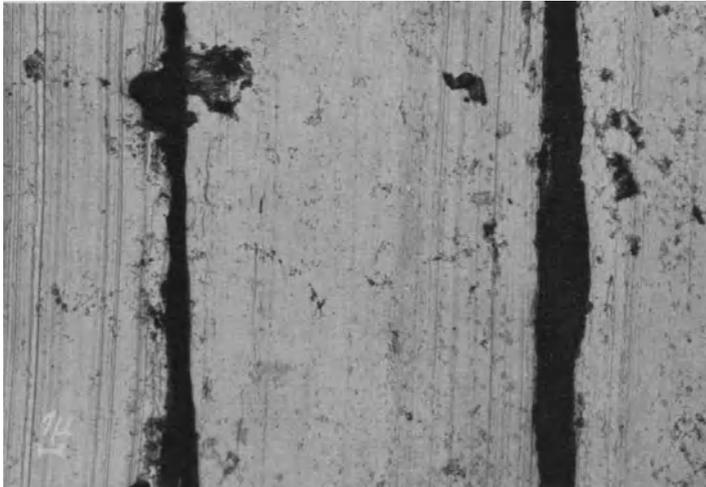
Das Bild wurde nach dem Lackabdruckverfahren erhalten, wobei der Lackfilm nach einem in Zusammenarbeit mit Duffek erprobten kathodischen Ablöseverfahren ohne Beschädigung der Stahloberfläche abgelöst werden kann.

Mahl.

Elektr. Aufn. (Lackabdruck).

Vergr.: 4000 fach.

Bearbeitungsverfahren: Drehen.



Abgedrehtes Aluminium.

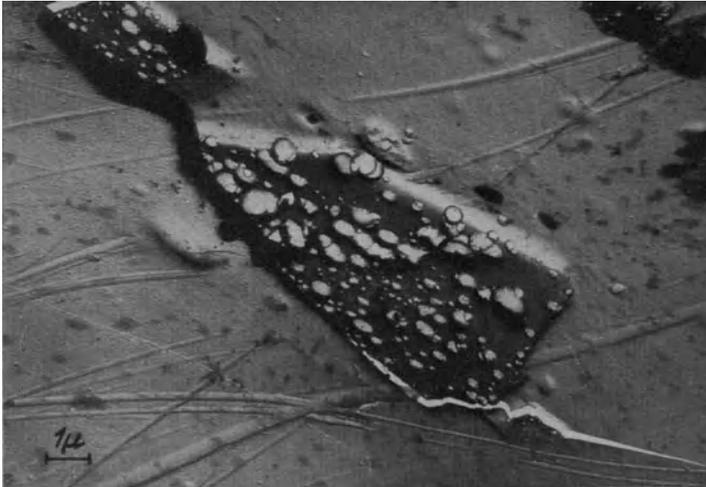
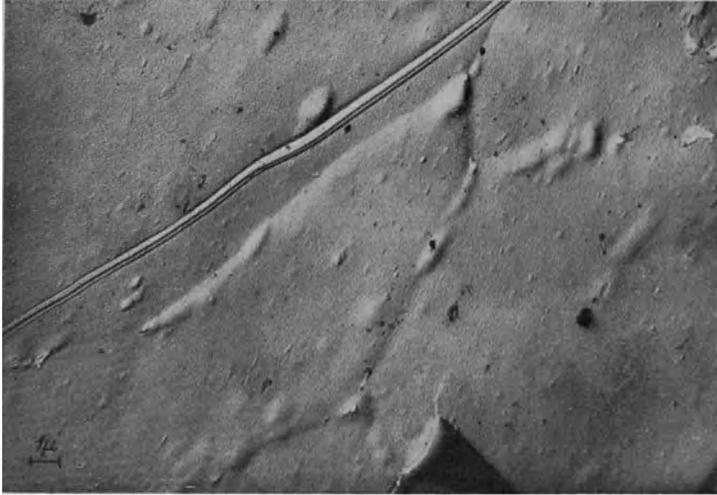
Bei der oberen Aufnahme war das Aluminium mit Stahl, bei der unteren mit einem Diamant abgedreht. Die deutlichen Unterschiede an der Oberflächenstruktur dürfen jedoch nur mit Vorsicht zu Schlüssen benutzt werden, da sich bei Verwendung eines ungeeigneten Diamanten und eines sehr gut polierten Stahls u. U. andere Ergebnisse ergeben.

Gözl [148].

Elektr. Aufn. (Oxydabdruck).

Vergr.: 3000 fach.

Bearbeitungsverfahren: Polieren.



Anodisch poliertes Hydronalium.

Durch elektrolytische Behandlung, wobei das Material Anode ist, läßt sich eine blanke Oberfläche herstellen. Die beiden Bilder, die elektrolytisch poliertes Hydronalium wiedergeben, zeigen, daß die einzelnen Kristallite des Gefüges verschieden stark aufgelöst werden. Zur Steigerung der Bildkontraste wurde der Abdruckfilm unter 45° abgebildet (vgl. S. 118).

Mahl.

Elektr. Aufn. (Oxydabdruck). Vergr.: 4000- bzw. 6000 fach.

Bearbeitungsverfahren: Polieren.



Elektrolytisch behandeltes Hydronalium.

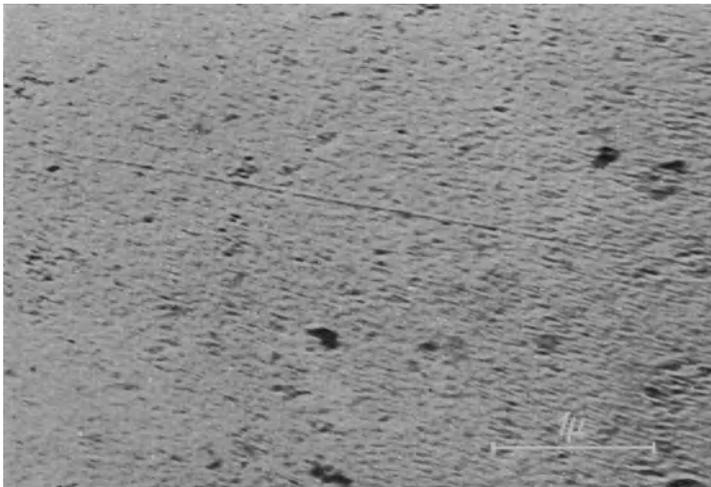
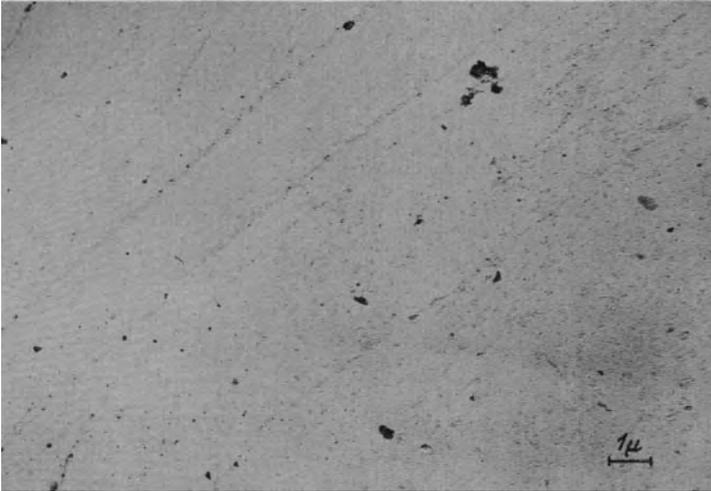
Je nach Wahl der elektrolytischen Bedingungen bei anodischer Behandlung von Metallen kann man die Oberfläche ätzen oder polieren. Obiges Bild gibt Hydronalium wieder, auf dem vermutlich durch Unsymmetrie in der Stromdichteverteilung teils eine Ätzung, teils ein Polieren eingetreten ist. Aus der glatten Oberfläche des eingesprengten Kristalls ist zu schließen, daß neben der Stromdichte noch spezielle Materialeigenschaften von Einfluß auf den Poliervorgang sind.

Mahl.

Elektr. Aufn. (Oxydabdruck).

Vergr.: 11 000 fach.

Bearbeitungsverfahren: Polieren.



Polierte Glasfläche.

Auch polierte Glasflächen lassen sich — ebenso wie geätzte, vgl. S. 152 — nach dem Abdruckverfahren übermikroskopisch untersuchen. Die Oberfläche der untersuchten Okularlinse eines Mikroskops zeigte Wischspuren, die auf geringe Verunreinigungen zurückzuführen sind (oberes Bild). Deutlich davon unterschieden sind die eigentlichen Polierspuren (unteres Bild), die in verschiedener Stärke, bis herunter zu etwa 20 μ Breite auftreten. Gölz.

Elektr. Aufn. (Lackabdruck). Vergr.: 6000- bzw. 22 000 fach.

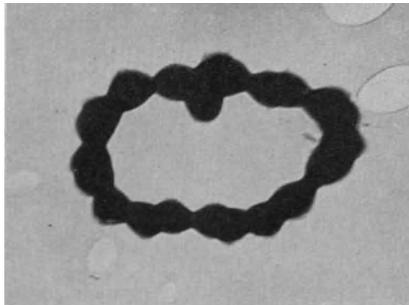
VIII. Übermikroskopische Bilder aus der belebten Natur.

Außer den vielen Anwendungsmöglichkeiten, die das Elektronenmikroskop — sei es ein Emissions- oder Durchstrahlungsmikroskop — in der unbelebten Natur hat, ist ein großer Kreis von Anwendungen vorhanden, die das Durchstrahlungs-Übermikroskop dem Forscher in der belebten Natur erschließt.

Die Zellforschung war das erste Gebiet, auf dem das Durchstrahlungsmikroskop — allerdings noch unterhalb der Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops — zum Einsatz gebracht wurde. Diese ersten Versuche sind an den Namen von Marton geknüpft, über dessen Arbeiten wir 1935 sagten:

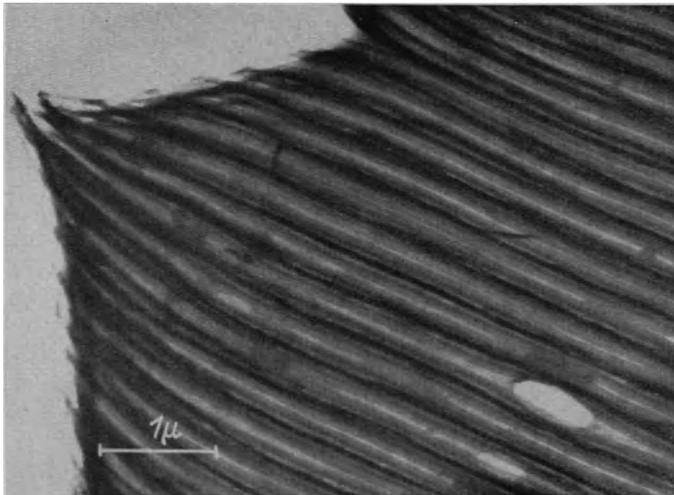
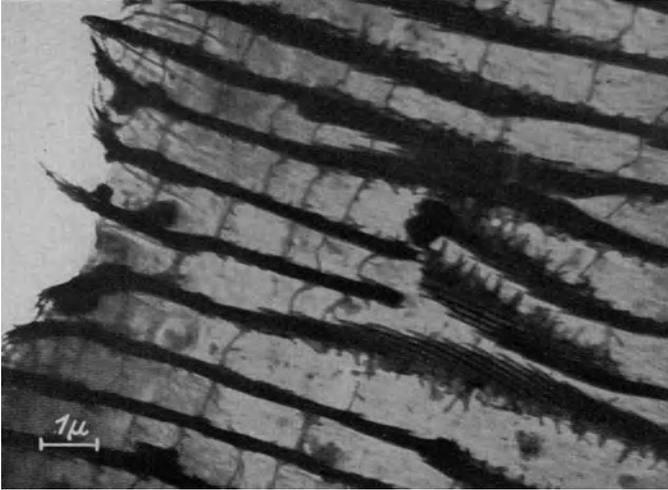
„Es scheint zunächst, als ob die weitere Verfolgung dieses Weges wenig Aussichten verspräche, denn die hohen Elektronenenergien und die Einbringung des Objektes ins Vakuum bedeuten für die Untersuchung empfindlicher organischer Substanzen große Schwierigkeiten. Daß man die Hoffnung jedoch nicht aufzugeben braucht, zeigen die kürzlich durch Marton erzielten Ergebnisse.... Wenn auch sehr hohe Vergrößerungen bei diesen Objekten bisher nicht durchgeführt sind und die Bilder noch an Schärfe zu wünschen übrig lassen, so ist doch durch das Experiment ein gangbarer Weg gezeigt, mag es auch noch lange währen, bis sich das Elektronenmikroskop auch hier seinen Platz neben dem Lichtmikroskop erobert hat.“ [38]

Bald darauf ist es dann Krause gelungen, das magnetische Elektronenmikroskop Ruskas so zu verbessern, daß ihm die Abbildung biologischer Objekte an der Grenze der lichtmikroskopischen Auflösung glückte. Er bildete, wenn auch zunächst noch unvollkommen, Gewebeteile ab. Heute liegen bereits viele Aufnahmen medizinisch interessanter Objekte wie Bakterien, Bakteriophagen, Viren, Blutkörperchen, Zellen usw. vor. Auch in die Zoologie, Botanik und in andere Gebiete der belebten Natur sind Vorstöße unternommen, die Fortschritte erwarten lassen.



Eigenartige Ringbildung von Kokken. Der Ring hat einen Radius von wenigen Tausendstel Millimetern.
(Aus einer Zusammenarbeit mit dem Inst. Robert Koch.)

Zoologie: Schmetterlinge.

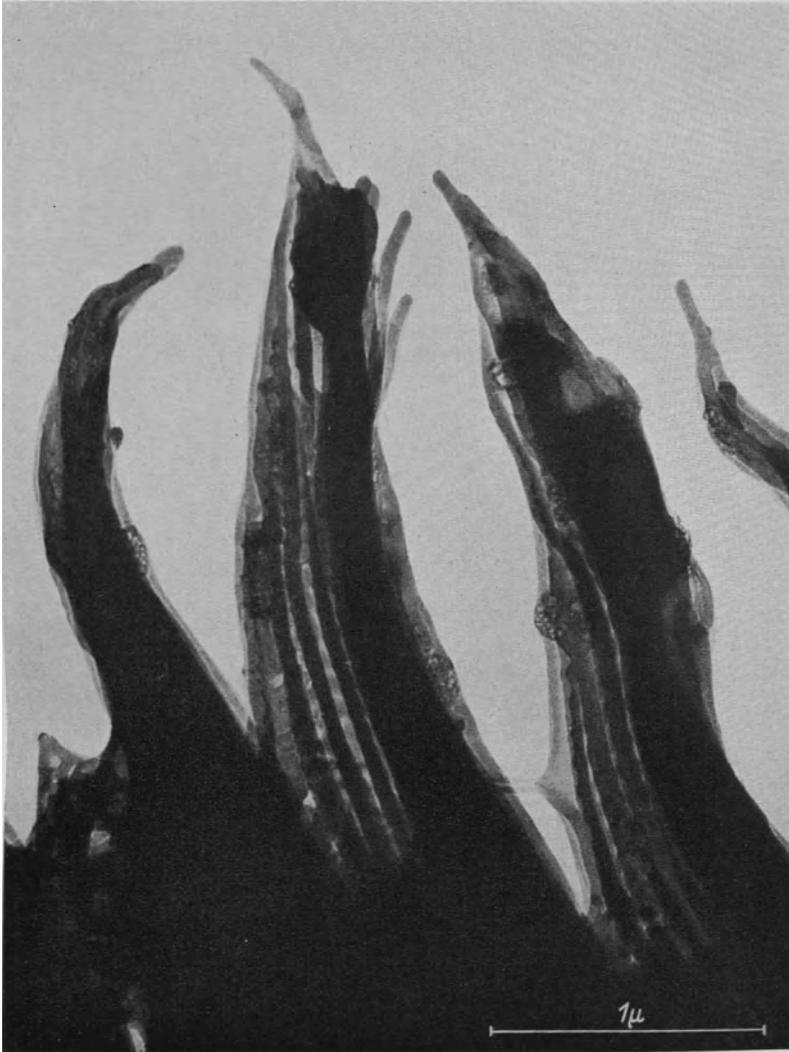


Schuppen von Schmetterlingsflügeln.

Bei der groben Schuppe von *Morpho achilles* (oberes Bild) erkennt man die Feinstruktur der zum Teil umgelegten Leisten. Danach bestehen sie in diesem Falle aus einzelnen übereinanderliegenden Lamellen. Die Schuppe von *Morpho adonis* (unteres Bild) zeigt sehr schmale, eng benachbarte „Leisten“, die mit dem Lichtmikroskop nur schwierig nachzuweisen sind.

Gentil und Kinder [148].

Magnet. Aufn. Vergr.: 7000- bzw. 15 000 fach.



Ende einer Schuppe.

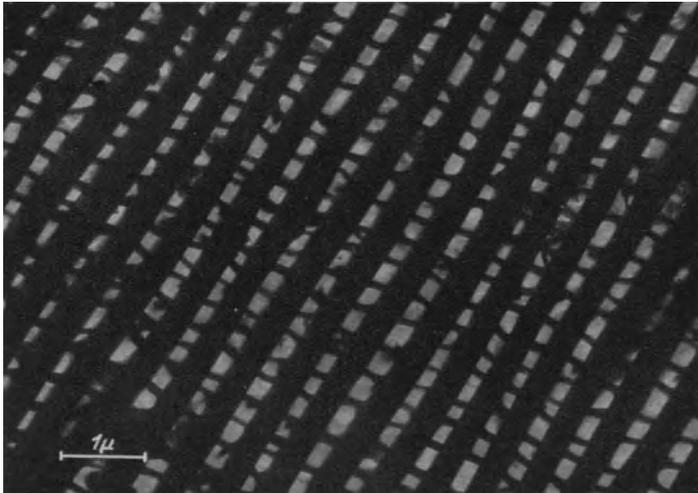
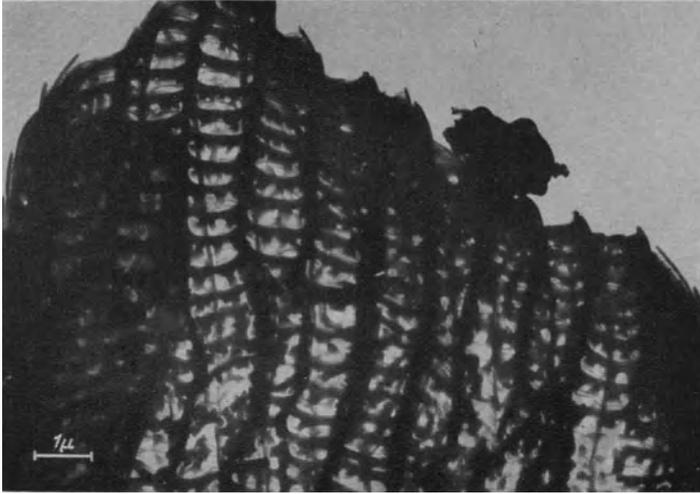
Die Aufnahme zeigt überstehende Leisten der Flügelschuppen von *Morpho aega* in hoher Vergrößerung. Die auf Grund polarisationsoptischer Untersuchungen vermutete Lamellierung der Leisten wird durch die elektronenoptische Untersuchung bewiesen.

Gentil und Kinder [148].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 35 000 fach.

Zoologie: Schmetterlinge.



Struktur einer Schmetterlingsschuppe.

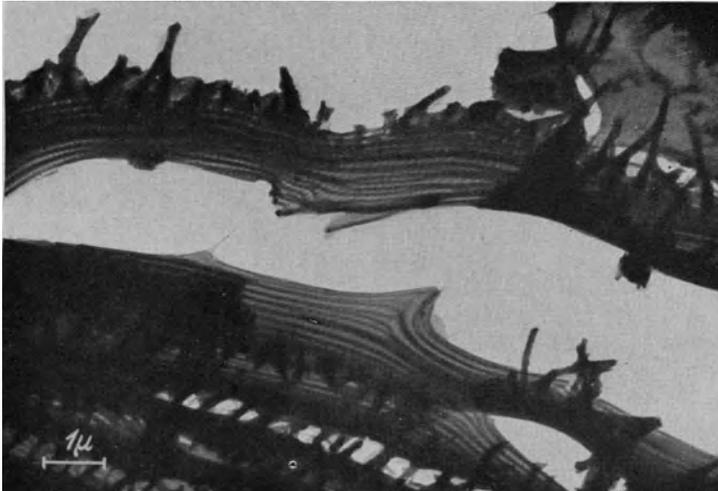
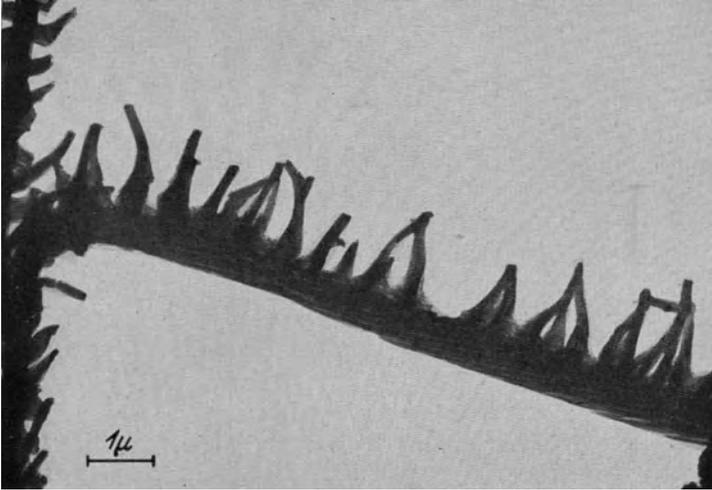
Die Aufnahmen lassen kräftige Leisten in paralleler Anordnung erkennen, zwischen denen feinere Verbindungen bestehen. Aus dem oberen Bild des verworfenen Schuppenstücks ahnt man bereits den räumlichen Aufbau, den jedoch erst die stereoskopische Aufnahme (vgl. S. 124) eindeutig ergibt.

Gentil und Kinder.

Magnet. Aufn.

Vergr.: 7000- bzw. 10 000 fach.

Zoologie: Schmetterlinge.



Feinstruktur der Leisten.

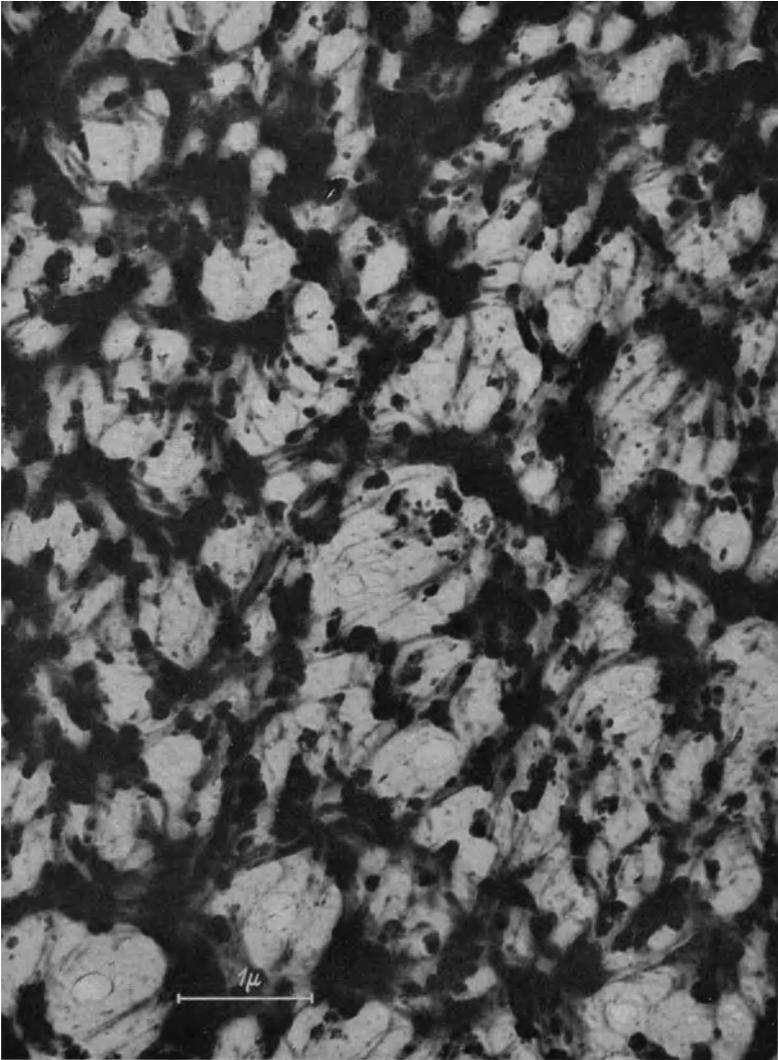
Diese Schuppen von *Apatura iris* (oberes Bild) bzw. von *Morpho aega* (unteres Bild) wurden mit dem Mikromanipulator zerrissen. Dadurch wurde die Feinstruktur der Leisten bloßgelegt. Sie zeigt ein sublichtmikroskopisches Lamellensystem, das durch Interferenz die Schillerfarbe erzeugt. Bei dem unteren Bild sind die Leisten z. T. zerquetscht und dadurch die Regelmäßigkeit der Schichtenstruktur gestört.

Kinder und Süffert.

Magnet. Aufn.

Vergr.: 9000 fach.

Zoologie: Schneckenschale.



Feinstruktur einer Schneckenschale.

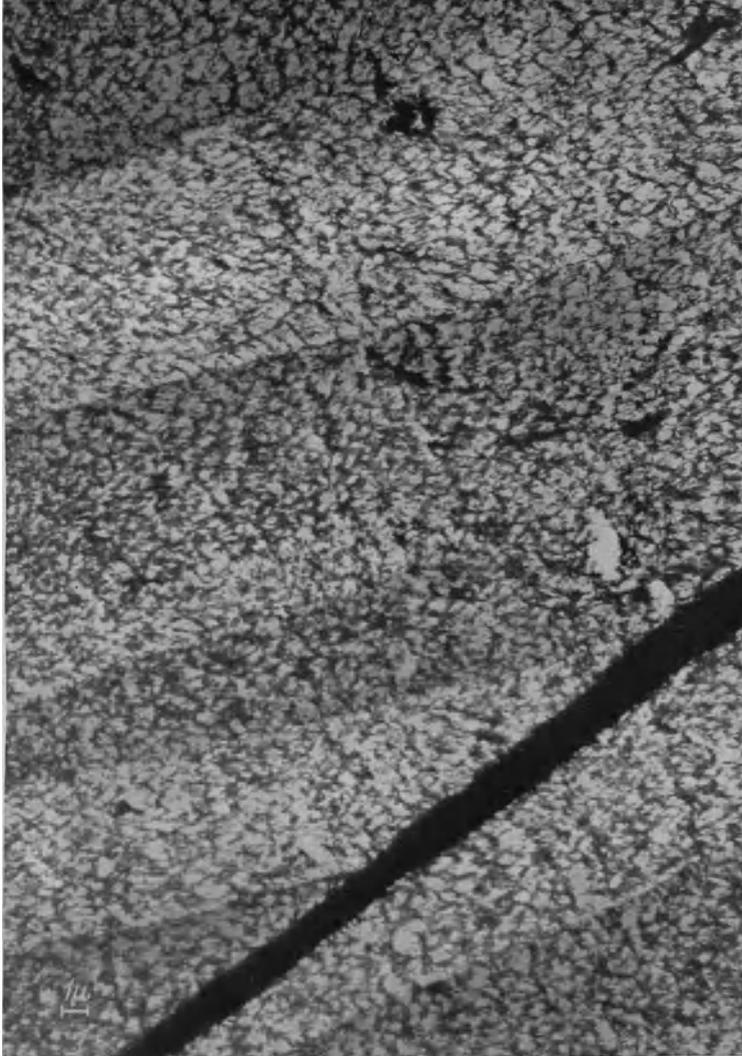
Von der angeätzten Fläche eines Dünnschliffs von *Cypraea tigris* L. wurde ein Zapon-Abdruck hergestellt. Die hellen Bereiche im Bilde zeigen die Abdrücke der einzelnen Kalk-Elemente. Die dazwischen ausgespannten Häutchen mit den darin eingelagerten Pigmentkörnern blieben nach Auslösen des Kalkes an der Folie haften.

Gözl und Helmcke [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 19 000 fach.

Zoologie: Schneckenschale.



Kalk-Lamellen einer Schneckenschale.

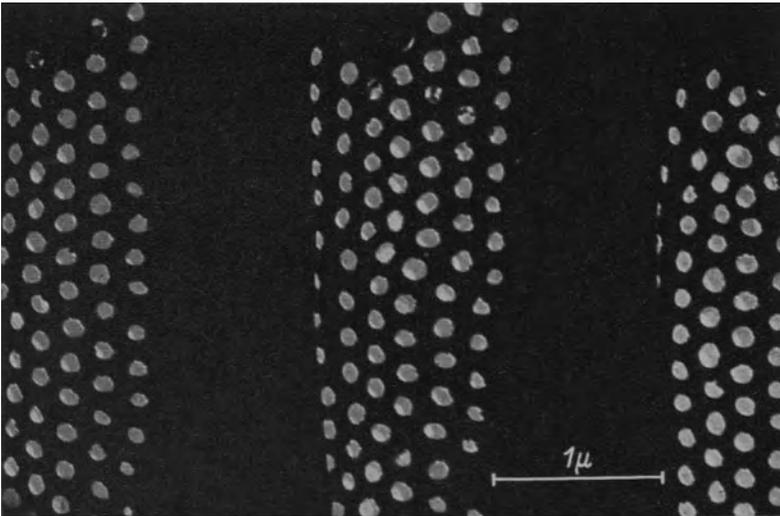
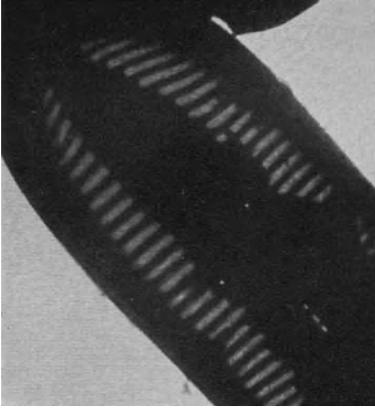
Bei geringerer Vergrößerung zeigt dieser Zapon-Abdruck Streifen verschiedener Helligkeit. Diese Streifen entsprechen den Kalk-Lamellen, die sich in einem Dünnschliff der Schale unter dem Polarisations-Mikroskop nach Art der Zwilling-Lamellen gleichwertig verhalten.

Gözl und Helmcke [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 5000 fach.

Botanik: Diatomeen.



Schalenstruktur der *Primularia nobilis*.

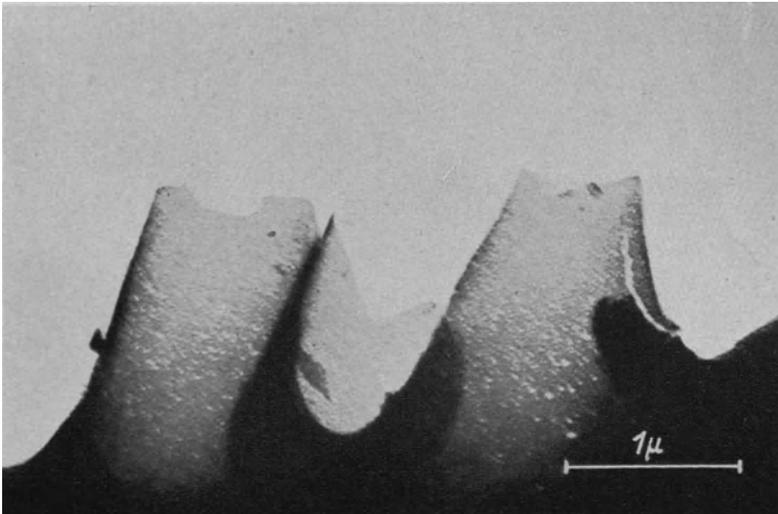
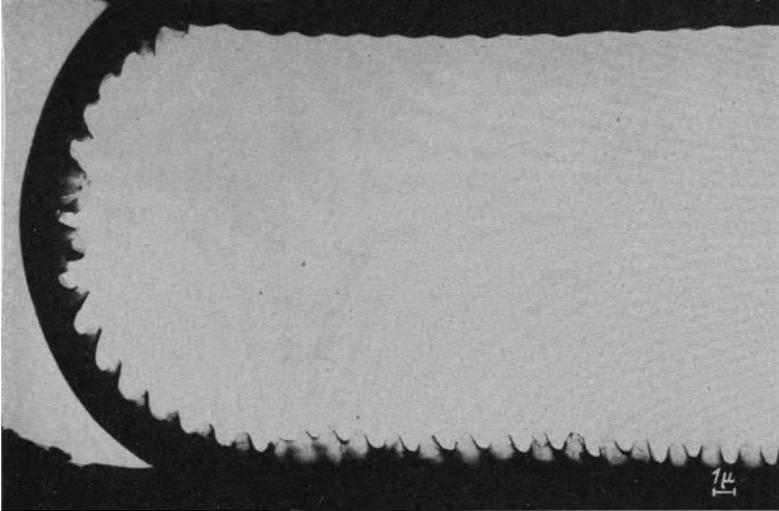
Die Kieselshalen dieser Diatomeen sind grätenartig von Rippen durchzogen, zwischen denen feine Wabenlöcher angeordnet sind. Diese Poren mit einem Mittenabstand von 150...200 μ sind unter günstigen Bedingungen im Ultraviolettmikroskop gerade eben noch zu trennen, während das Obermikroskop auch ihre Form zeigt. Die obere Aufnahme wurde mit dem Schattenmikroskop (vgl. S. 86), die untere mit dem elektrostat. Abbildungsmikroskop aufgenommen.

Boersch [114].
Mahl [136].

Elektr. Aufn.
Elektr. Aufn.

Vergr.: 1100- bzw. 4200 fach.
Vergr.: 24 000 fach.

Botanik: Diatomeen.



Zertrümmerte Diatomeenschale.

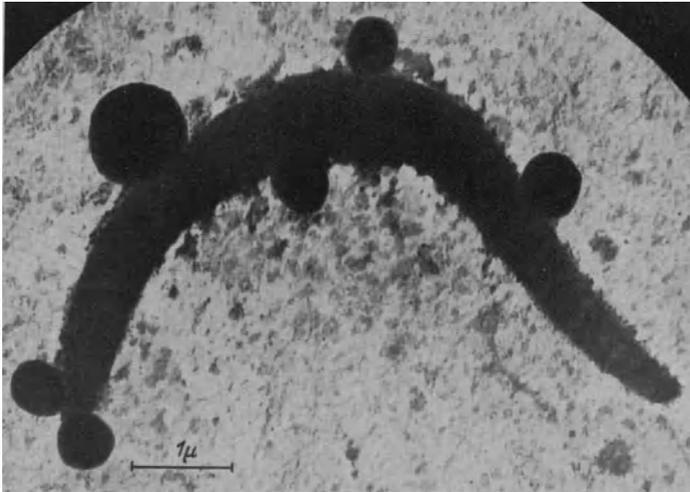
Das Innere der *primularia nobilis* (s. auch Gegenseite) ist herausgebrochen. Die Ansätze der Rippen sind stehengeblieben, die teilweise durchstrahlt werden. Die Rippen zeigen eine sehr feinkörnige Struktur.

Mahl [136].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 3000- bzw. 24 000 fach.

Medizin: Protozoen.



Malaria-Sporozoiten.

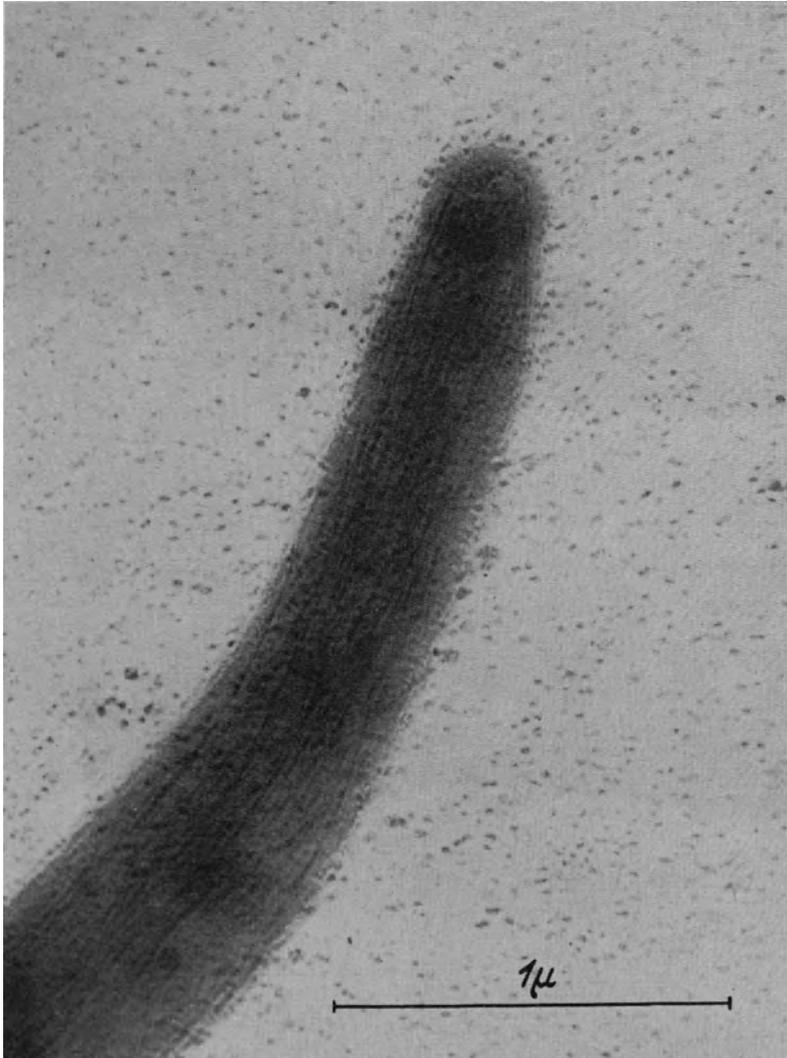
Der Malariaerreger macht einen Entwicklungskreisprozeß durch, bei dem er als Sporozoit in der Mücke auftritt, die ihn zur weiteren Entwicklung mit ihrem Stich dem Menschen überträgt. Die Aufnahmen zeigen solche Sporozoiten aus der Speicheldrüse der Anopheles in verschiedener Vergrößerung. Das untere Bild deutet auf den Austritt von Plasma an verschiedenen Stellen eines Sporozoiten hin, wie er mit dem Lichtmikroskop noch nicht beobachtet war und dessen Bedeutung noch unklar ist.

Emmel, Götz u. Jakob.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 2500- bis 13 000 fach.

Medizin: Protozoen.



Ende eines Malariasporozoiten.

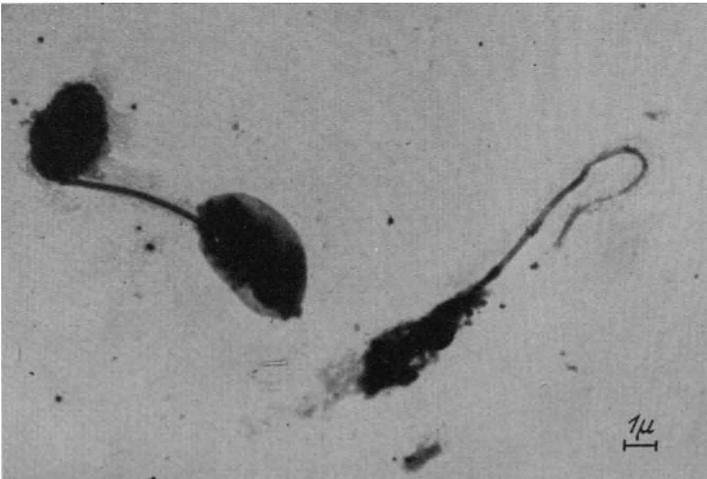
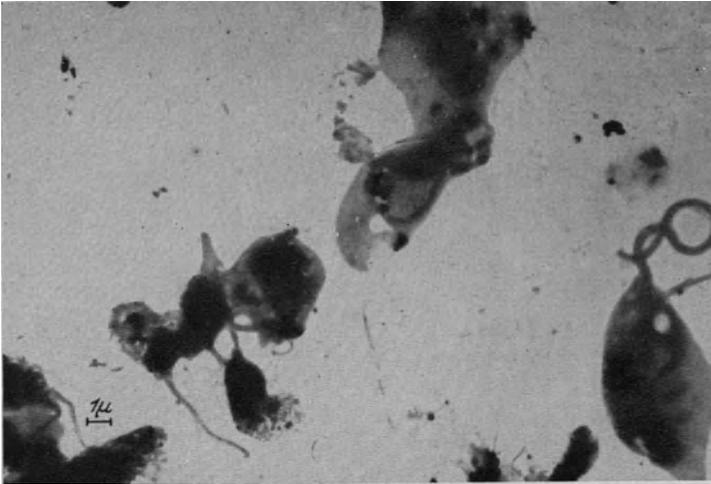
Nach den Aussagen des Elektronenmikroskops verlaufen längs des untersuchten Sporozoiten (*Malaria tertiana*, Stamm Griechenland) dunklere linienartige Streifungen. Es liegt nahe, diese Streifung mit den Bewegungsorganen der Sporozoiten in Zusammenhang zu bringen, durch die sie zitternd und gleitend ihren Ort wechseln.

Emmel, Götz u. Jakob [167].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 52 000 fach.

Medizin: Leichmania.



Leichmanien.

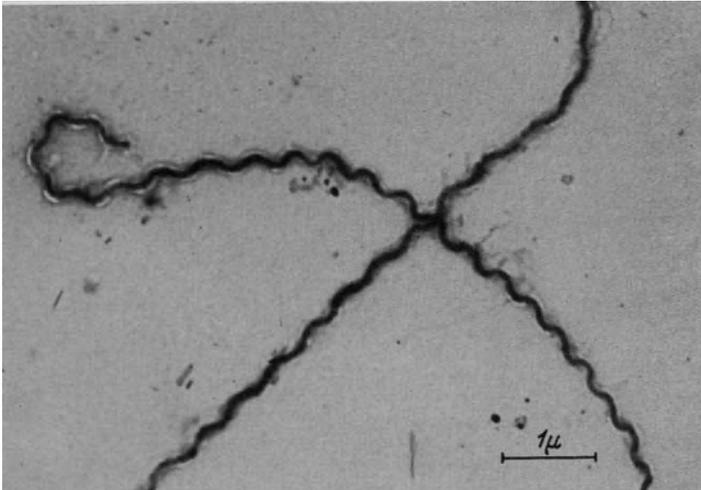
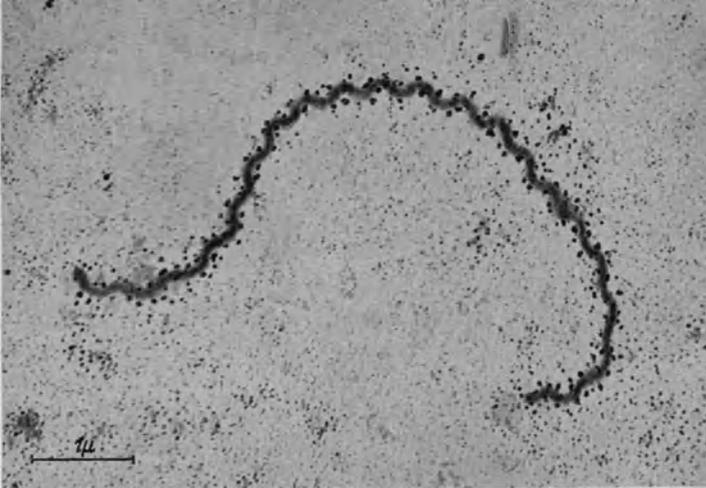
Die untersuchte Leichmanienart ist der Erreger der Kala-Azar, einer gefürchteten Tropenkrankheit. Die Leichmanien sind Einzeller mit einem Körper, der auf der oberen Aufnahme hohlräumartige Aufhellungen zeigt und einer auf der unteren Aufnahme gut sichtbaren stumpfen Geißel.

Jakob und Mahl [154]

Elektr. Aufn.

Vergr.: 3000- bzw. 4000 fach.

Medizin: Spirochaeten.



Wasser-Spirochaeten.

Spirochaeten sind korkzieherartig gewundene Einzeller. Zu ihnen gehören die harmlosen Wasser-Spirochaeten, aber auch die Erreger der Syphilis, des Rückfallfiebers und anderer schwerer Krankheiten.

Gözl und Jakob.

Jakob und Mahl [103].

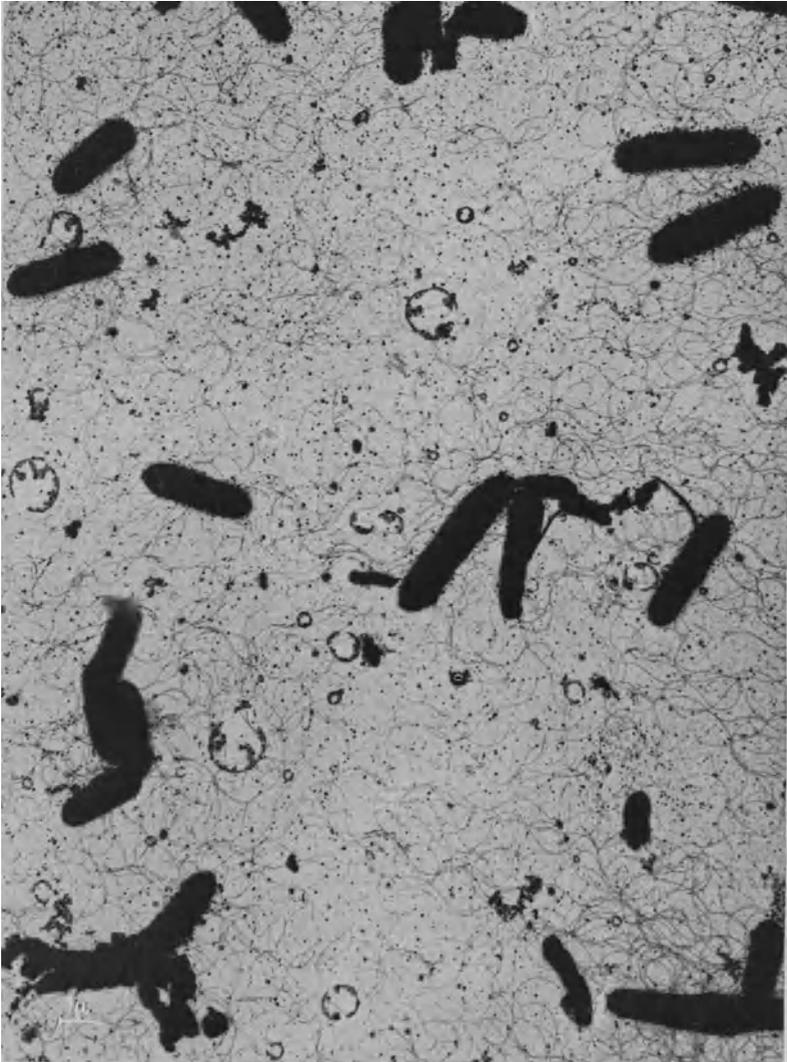
Elektr. Aufn.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 14 000 fach.

Vergr.: 13 000 fach.

Medizin: Bakterien.



Bakterien mit Geißeln.

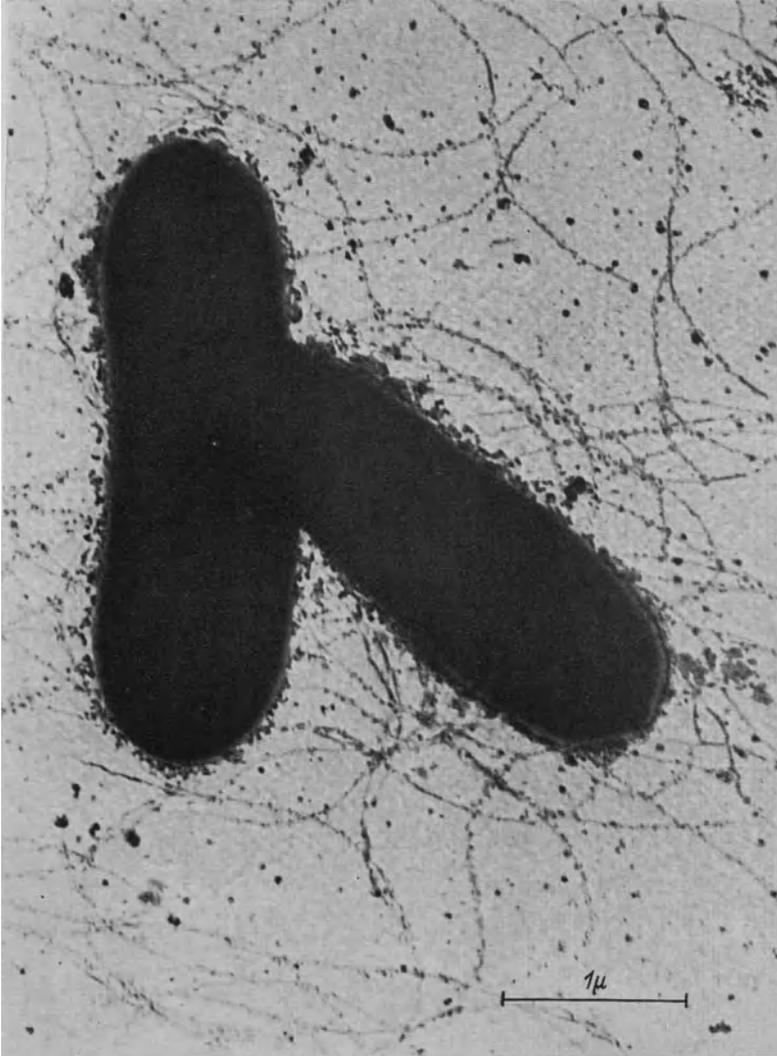
Bei dieser Übersichtsaufnahme von Tetanomorphus-Bakterien sind die Geißeln, deren Abbildung ohne besondere Präparierung im Lichtmikroskop nicht mehr gelingt, besonders gut zu erkennen.

Jakob und Mahl [119].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 4500 fach.

Medizin: Bakterien.



Einzelne Bakterien mit Geißeln.

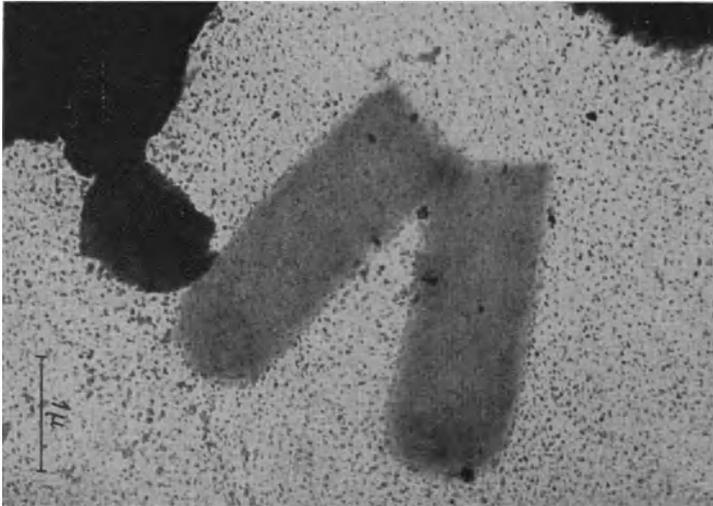
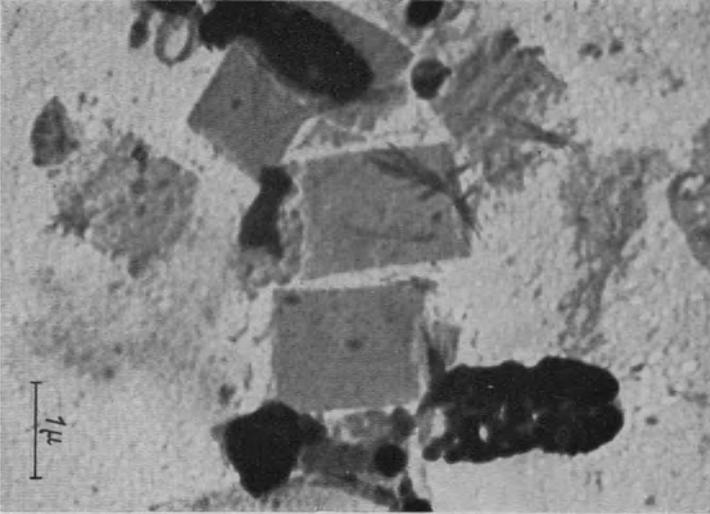
Dieselben Bakterien wie bei dem Bild auf der Gegenseite. Bemerkenswert sind außer den Geißeln die kleinen Begleikörper, die in der Nähe der Bakterien besonders dicht gelagert sind.

Jakob und Mahl [136].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 25 000 fach.

Medizin: Bakterien.



Membranen.

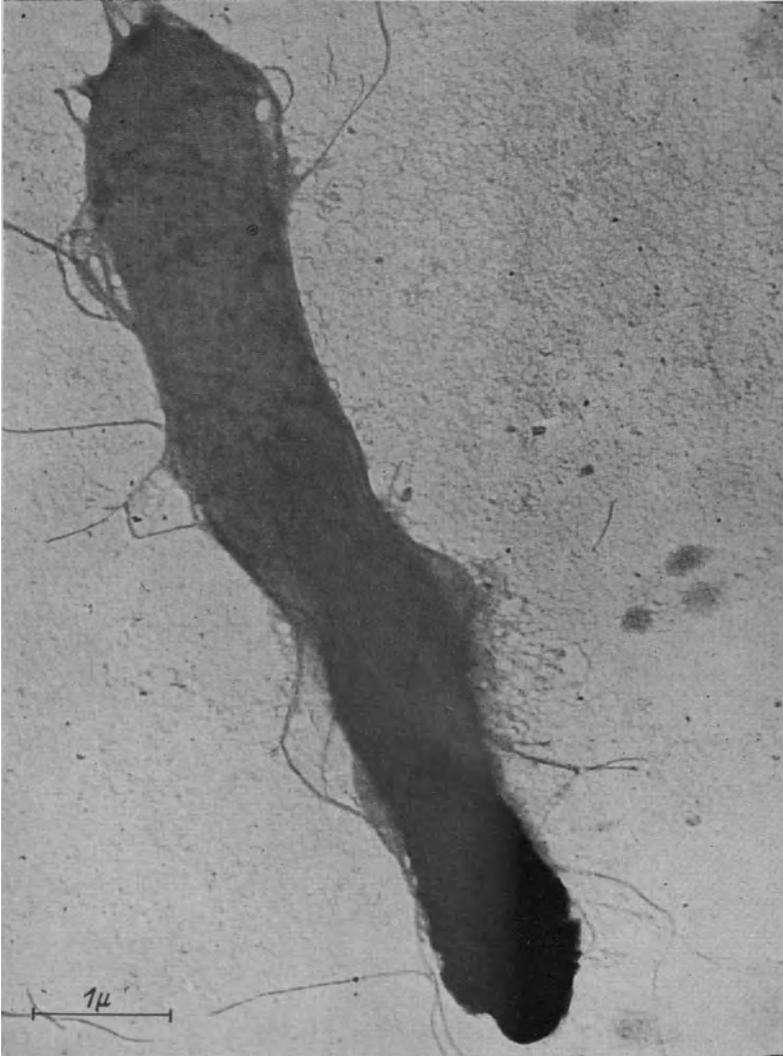
Die beiden Bilder zeigen die für manche Bakterien charakteristischen „Membranen“, die bei vielen Bakterien erst durch das Übermikroskop sichergestellt wurden. Bei obigen Aufnahmen handelt es sich um die äußerst gefährlichen Gasbrandbazillen (oberes Bild) und um Membranen von Tetanomorphus-Bazillen (unteres Bild).

Jakob und Mahl [119].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 12 500- bzw. 15 000 fach.

Medizin: Bakterien.



Bakterienkörper aus der Membran ausgetreten.

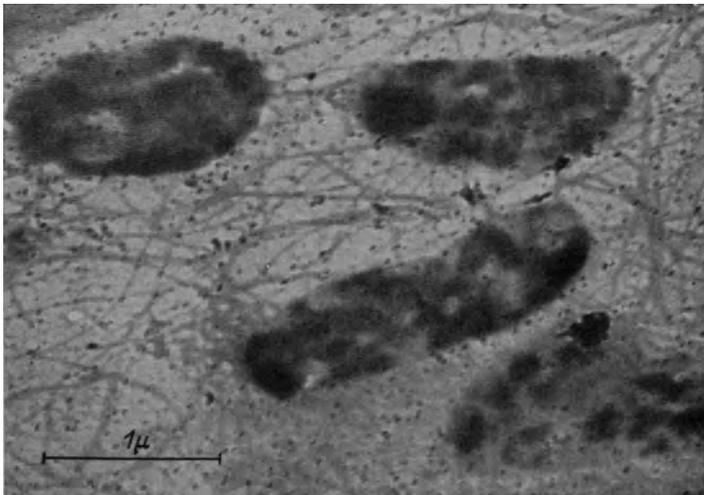
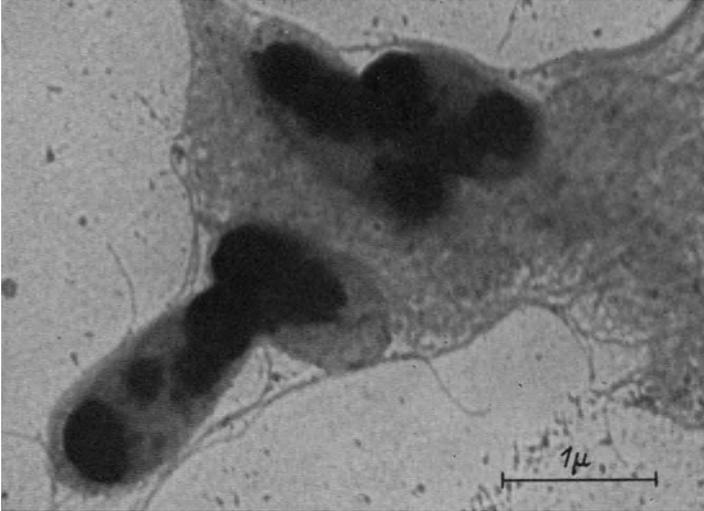
Hier ist das Stadium im Bilde festgehalten, in dem der Protoplast des Bact. tertius gerade seine Membran verlassen hat.

Jakob und Mahl [124].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 19 000 fach.

Medizin: Bakterien.



Innenstruktur.

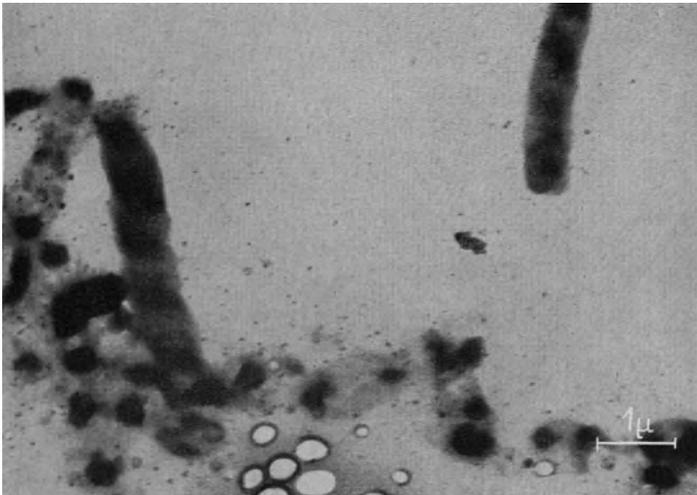
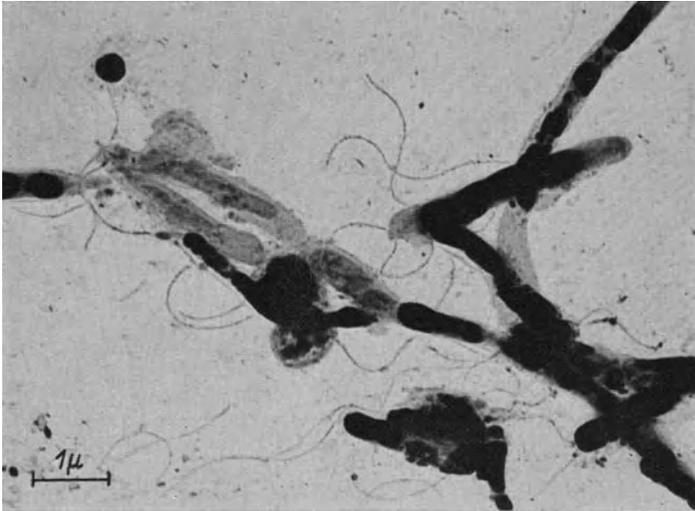
Häufig lassen Bakterien im Elektronenmikroskop eine innere Struktur erkennen, so z. B. bei *Bact. putrificus verrucosus* (oberes Bild) und den *Proteus*-Bakterien *Bact. vulgare* (unteres Bild). Derartige Innenstrukturen werden besonders bei älteren Kulturen beobachtet.

Jakob und Mahl [119].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 20 000- bzw. 23 000 fach.

Medizin: Bakterien.



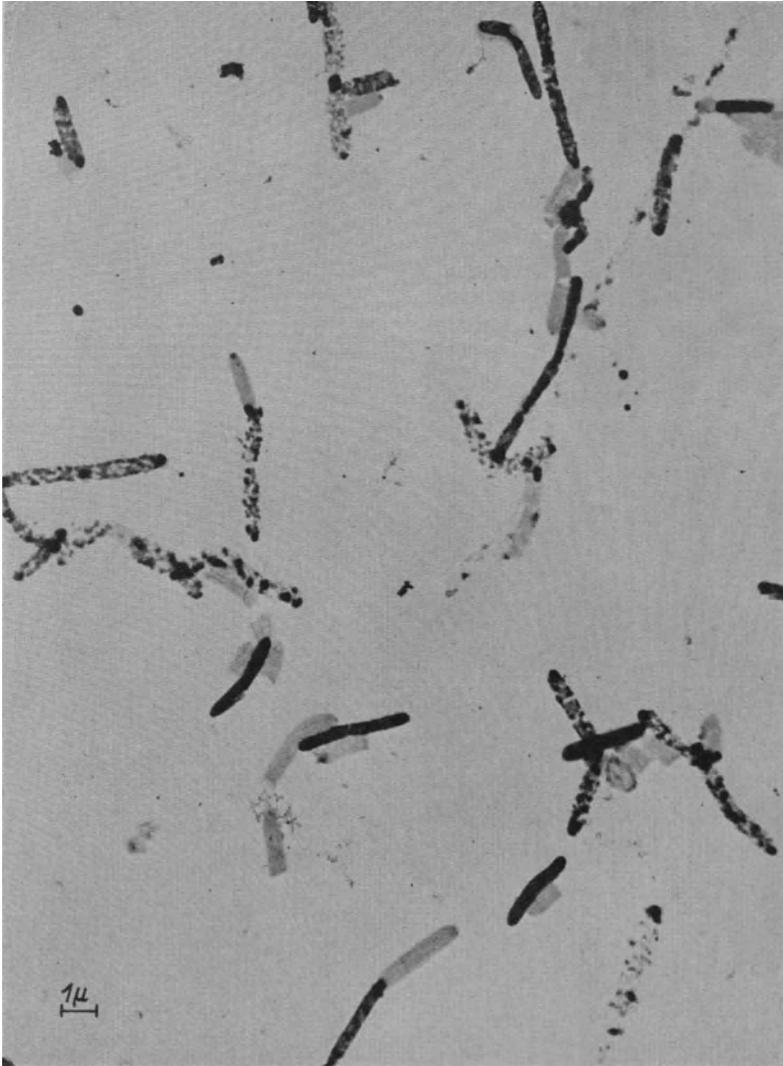
Innenstruktur.

Ein weiteres Beispiel für Innenstruktur geben die Aufnahmen von *Bact. vibrio albensis* Sonnenschein (oberes Bild) und *Bact. pyocyaneus* (unteres Bild). Während das mit 50-kV-Elektronen aufgenommene obere Bild die Umrisse und Geißeln deutlich zeigt, sind bei der Aufnahme mit 135-kV-Elektronen manche Feinheiten nicht mehr erkennbar (vgl. S. 114).
Jakob und Mahl [119].
Kinder [136].

Elektr. Aufn.
Magnet. Aufn.

Vergr.: 11 000 fach.
Vergr.: 11 000 fach.

Medizin: Bakterien.



Zerfallende Bakterien (*Bact. sphenoides*).

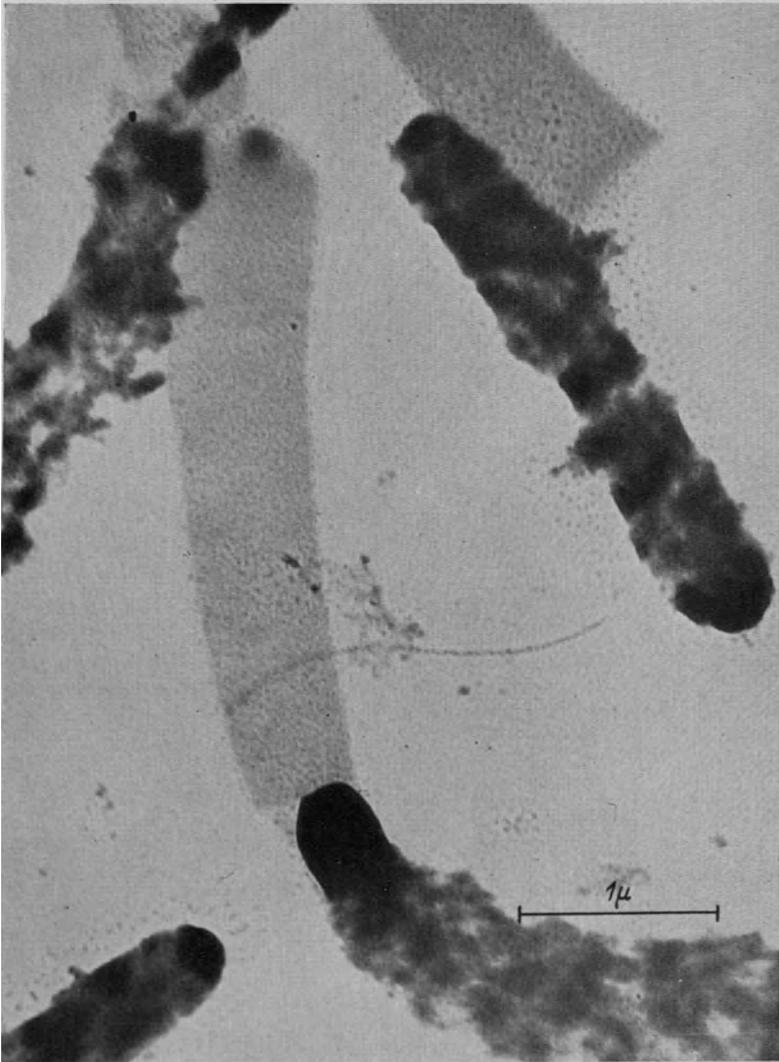
Bei den einzelnen Bakterien dieses Präparats ist der Zerfall verschieden weit fortgeschritten. Wahrscheinlich bedeutet der Zerfall den Untergang der Bakterien. Man sieht intakte Bakterien, körnige Zerfallsprodukte und Bakterienmembranen.

Jakob und Mahl [136].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 5000 fach.

Medizin: Bakterien.



Zerfallende Bakterien.

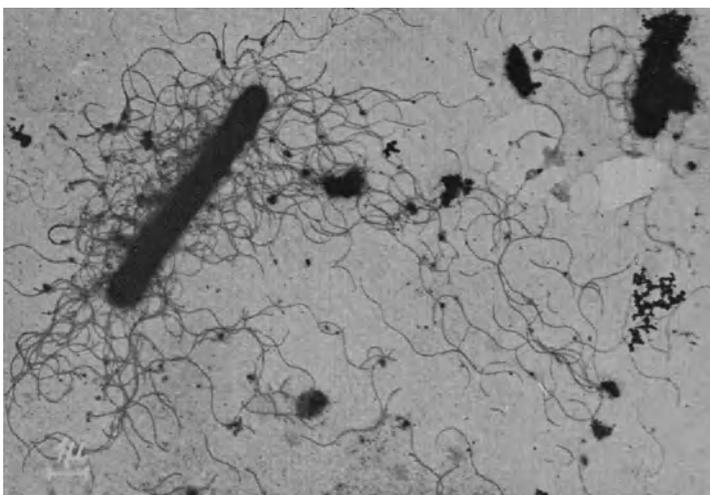
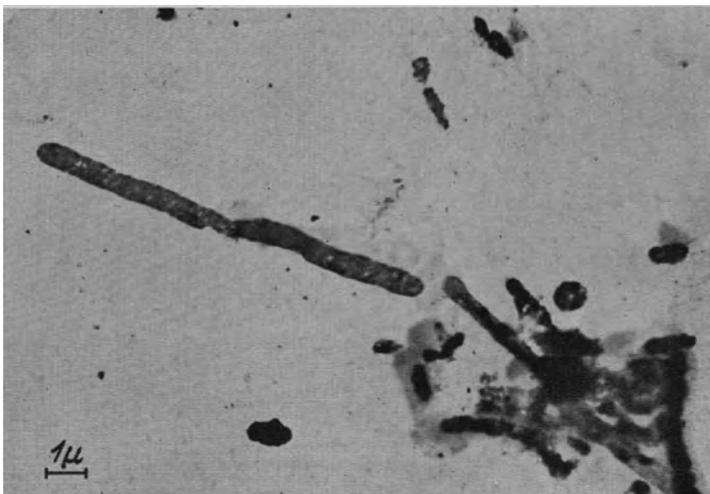
Bei der fünfmal so hohen Vergrößerung wie bei dem Übersichtsbild auf der Gegenseite erkennt man, daß die Enden der Bakterienkörper nicht so weit zerfallen sind wie die übrige Zellsubstanz. Vermutlich weisen diese „Polekörper“ eine andere, widerstandsfähigere Zusammensetzung auf.

Jakob und Mahl [136].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 27 000 fach.

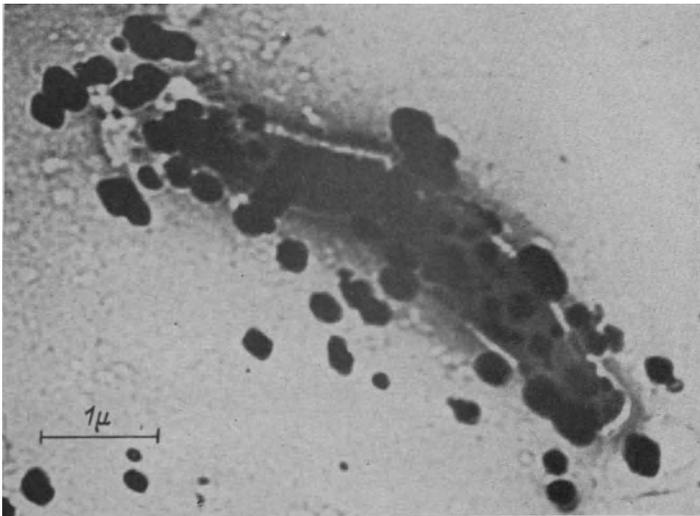
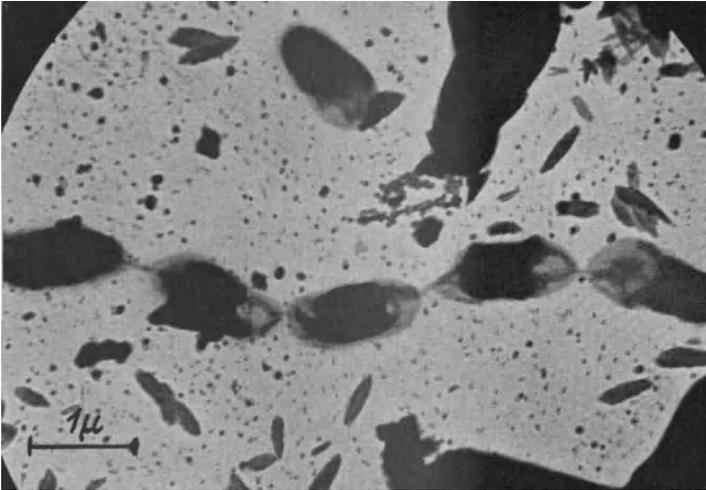
Medizin: Pathogene Bakterien.



Rauschbrand und Para-Rauschbrand.

Der Para-Rauschbrand-Bazillus (unteres Bild) ist, wie der Gasbrand (vgl. S. 206) und Novy-Bazillus (vgl. S. 36) für den Menschen sehr gefährlich. Er findet sich häufig in verschmutzten Wunden. Der Rauschbrand-Bazillus (oberes Bild) dagegen bedingt nur Tierseuchen. Der Keim wurde früher von den Norwegern als Pfeilgift beim Walfischfang benutzt. Jakob und Mahl [148]. Elektr. Aufn. Vergr.: 5000 fach.

Medizin: Pathogene Bakterien.



Lungenentzündung und Tuberkulose.

Die Bilder zeigen zwei gefährliche Krankheitserreger, und zwar Bact. pneumoniae (oberes Bild), einen Erreger der Lungenentzündung und den Tuberkelbazillus (Typus bovinus). Bei diesem unteren Bild sind die begleitenden Körner beachtenswert, die manchmal bei Tuberkelbazillen beobachtet werden.

Gözl und Volmer [148].

Elektr. Aufn.

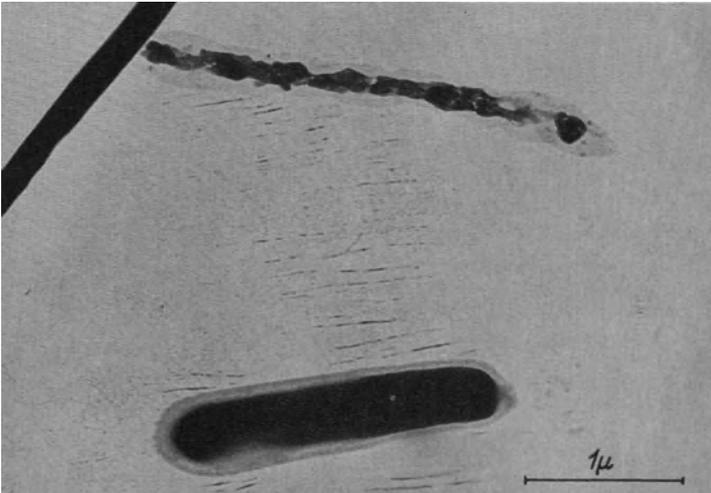
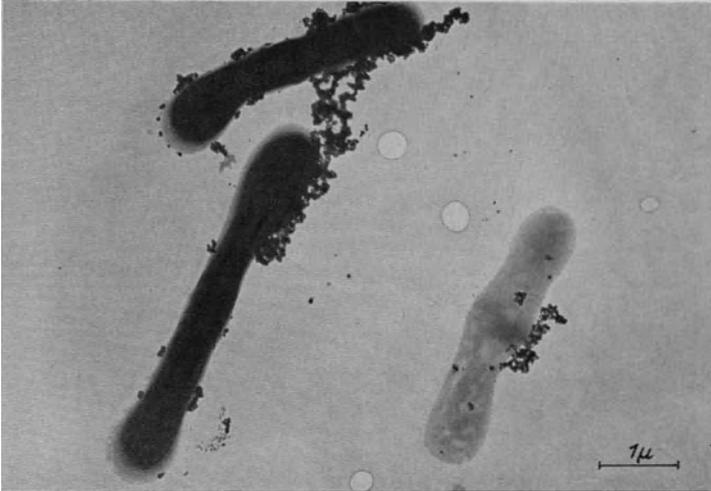
Vergr.: 14 000 fach.

Jakob und Mahl [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 16 000 fach.

Medizin: Pathogene Bakterien.



Cholera und Fleischvergiftung.

Der Cholera-Vibrio (oberes Bild), von Robert Koch entdeckt, ist in den warmen Ländern ein gefährlicher Seuchenerreger. — Die Fleischvergiftung wird unter anderem durch den Botulinus-Bazillus (unteres Bild) bedingt, der durch sein schweres Gift oft tödlich wirkt.

Gözl und Volmer [148].

Elektr. Aufn.

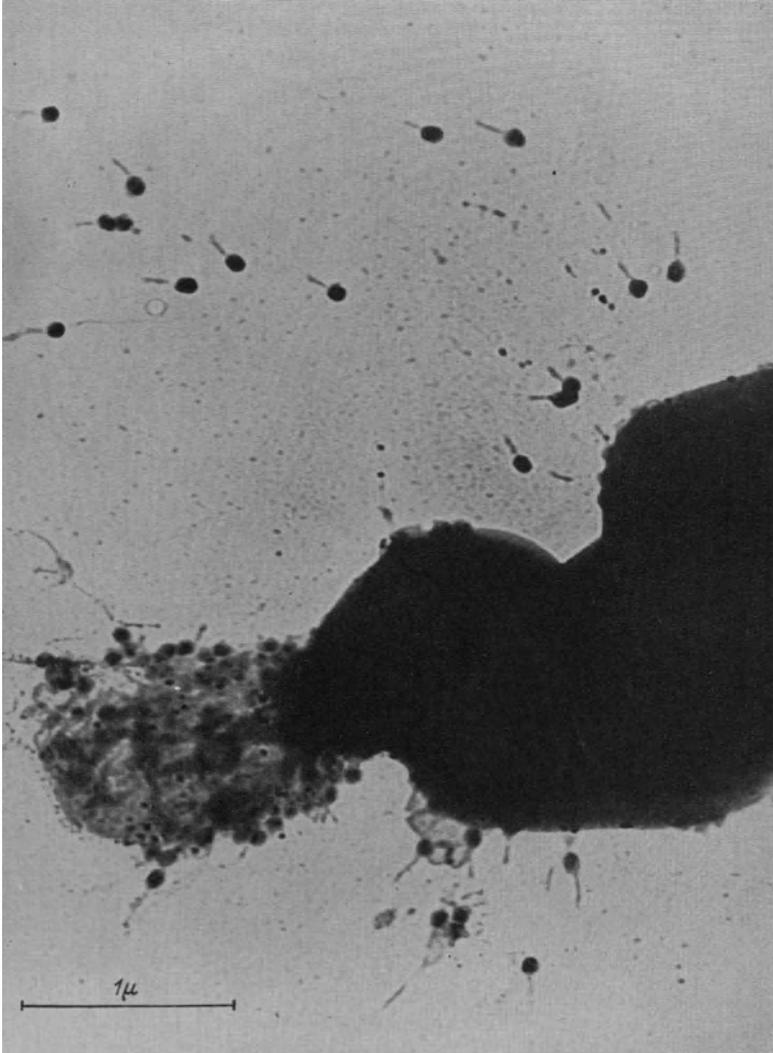
Vergr.: 10 000 fach.

Jakob und Kinder [148].

Magnet. Aufn.

Vergr.: 20 000 fach.

Medizin: Bakteriophagen.



Ruhrbakterien mit Bakteriophagen.

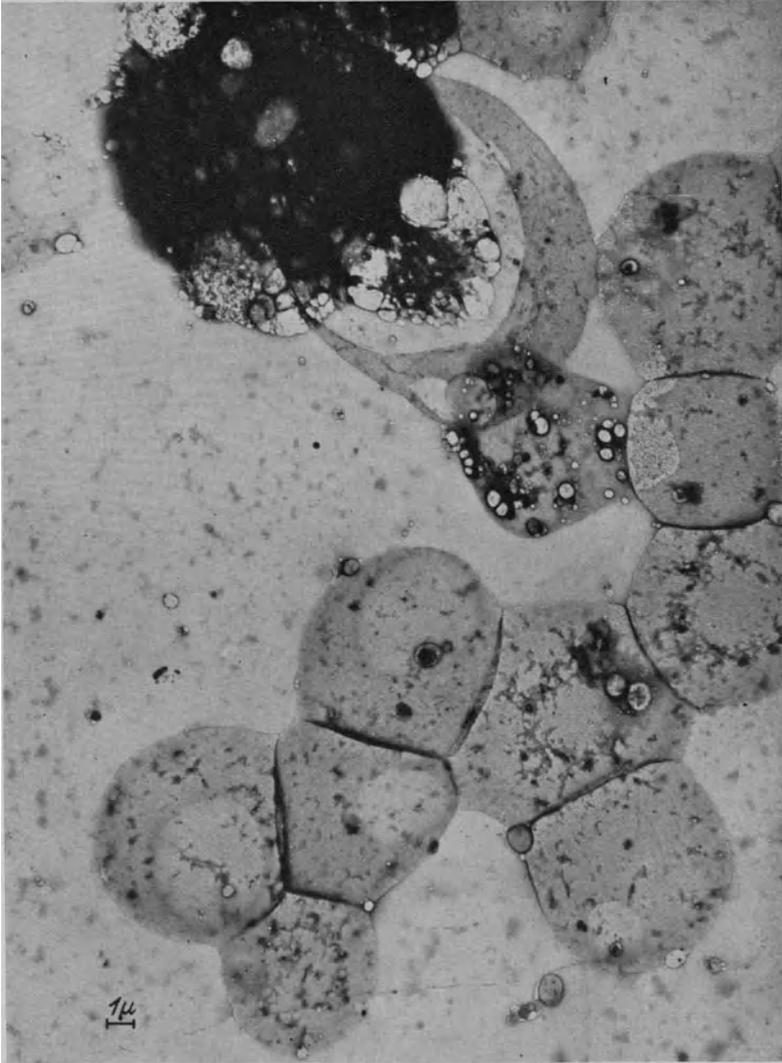
Ruhr ist eine beim Menschen häufig auftretende Infektionskrankheit. In neuerer Zeit werden zur Bekämpfung der Ruhr mit Erfolg Bakteriophagen verwendet, die sich im Übermikroskop als kleine ovale Körperchen mit einem strichartigen Schwanz erweisen. Sie greifen, wie es das Bild zeigt, die Ruhrkeime an und vermögen sie zu zerstören.

Jakob und Mahl [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 28 000 fach.

Medizin: Blutkörperchen.



Blutkörperchen.

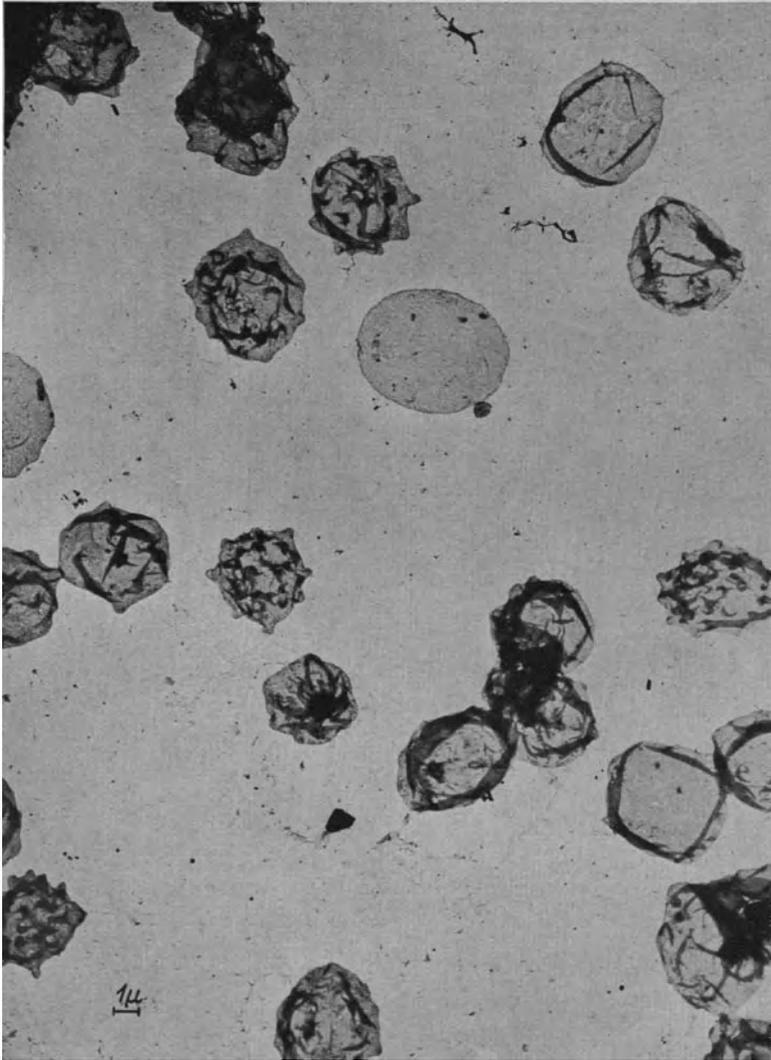
Weisse Blutkörperchen treten bei der Myeloischen Leukämie, einer sehr schweren Blutkrankheit, in viel zu großer Zahl im Blutstrom auf. Auf dem Bild ist oberhalb der roten Blutkörperchen eines Leukämiekranken, die durch Hämolyse ausgelaugt sind, ein weißes Blutkörperchen zu erkennen, das mit seiner kammerartigen Architektur den Krebszellen etwas ähnlich ist (vgl. S. 218).

Jakob und Mahl [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 4000 fach.

Medizin: Blutkörperchen.



Blutkörperchen von Stechapfelform.

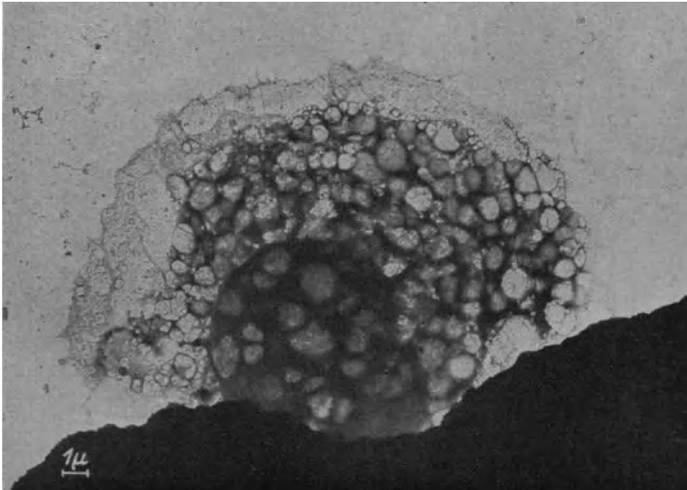
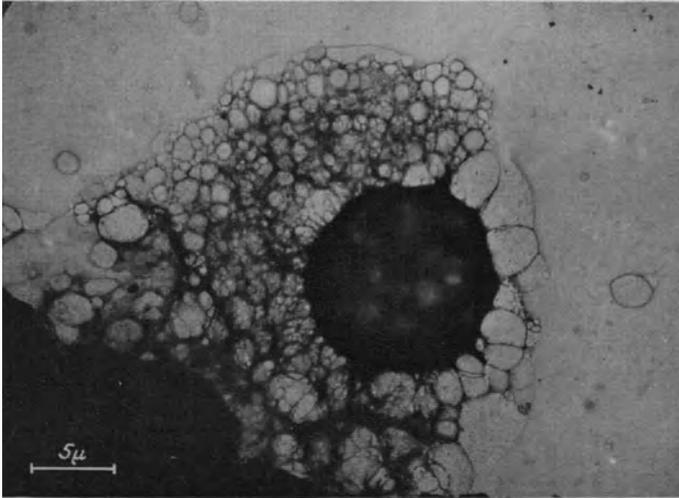
Wenn normale rote Blutkörperchen eingreifenden äußeren Einflüssen ausgesetzt werden, bildet sich die Stechapfelform, die in einer Faltung der Blutkörpermembran (Hülle) besteht. Bemerkenswert ist, daß die roten Blutkörperchen bei der hier vorgenommenen Haemolyse (Auslaugung) fast nie platzen, wie man es früher annahm.

Jakob und Mahl [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 3000 fach.

Medizin: Zellen.



Krebszellen.

Die Bilder zeigen Krebszellen aus dem Exsudat einer mit Ehrlich'schem Asziteskarzinom infizierten Maus. Der runde Kern ist von einem weitverzweigten bienenwabenartigen Vakuolensystem umgeben, das Protoplasma genannt wird.

Gözl und Jakob.

Jakob und Mahl [140].

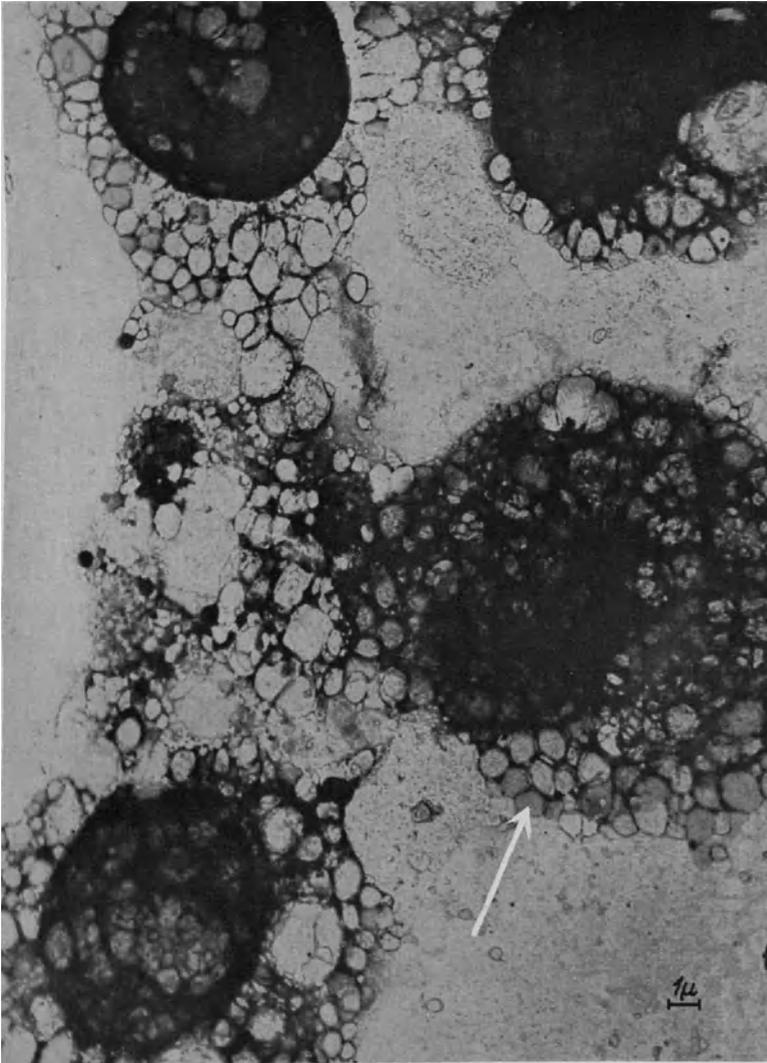
Elektr. Aufn.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 2000 fach.

Vergr.: 3000 fach.

Medizin: Zellen.



Krebszellen.

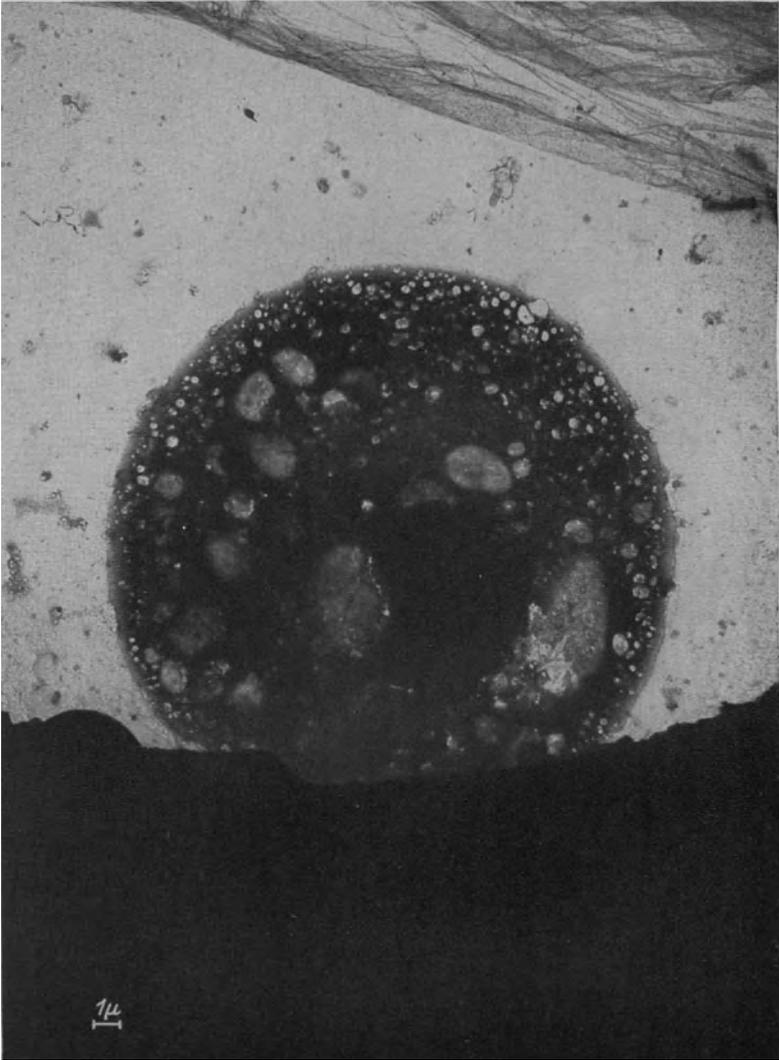
Wie auf der Gegenseite sind hier Exsudatzellen wiedergegeben. An mehreren Stellen der Aufnahme glaubt man eine flache sechseckige Kammer zu erkennen (s. Pfeil). An den Rändern dieser Kammern spielen sich wahrscheinlich die für das Leben wichtigen Vorgänge ab.

Jakob und Mahl.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 4000 fach.

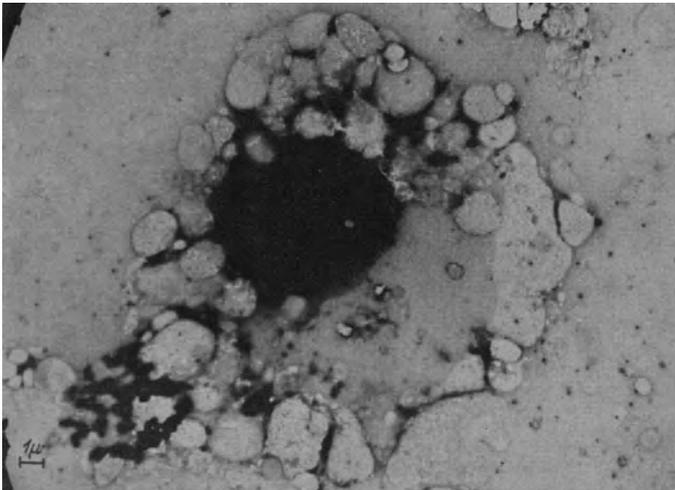
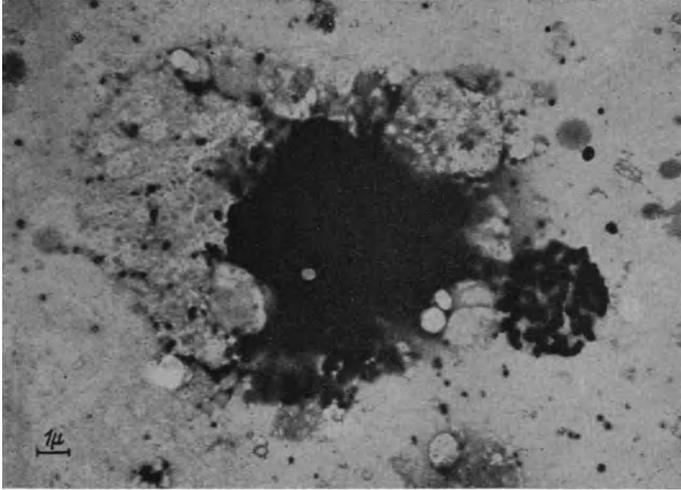
Medizin: Zellen.



Normale Exsudatzelle.

Solche Zellen findet man im Exsudat der Bauchhöhle von krebserkrankten und krebisfreien Mäusen. Die Annahme liegt daher nahe, daß es sich um eine normale Exsudatzelle handelt und nicht um eine Krebszelle. Protoplasma und Kern der Zelle, die in ihrer Gesamtheit von einer Zellmembran umgeben zu sein scheinen, sind nicht sicher getrennt zu erkennen. Götz und Jakob [148]. Elektr. Aufn. Vergr.: 3500 fach.

Medizin: Zellen.



Zellen und Kokken.

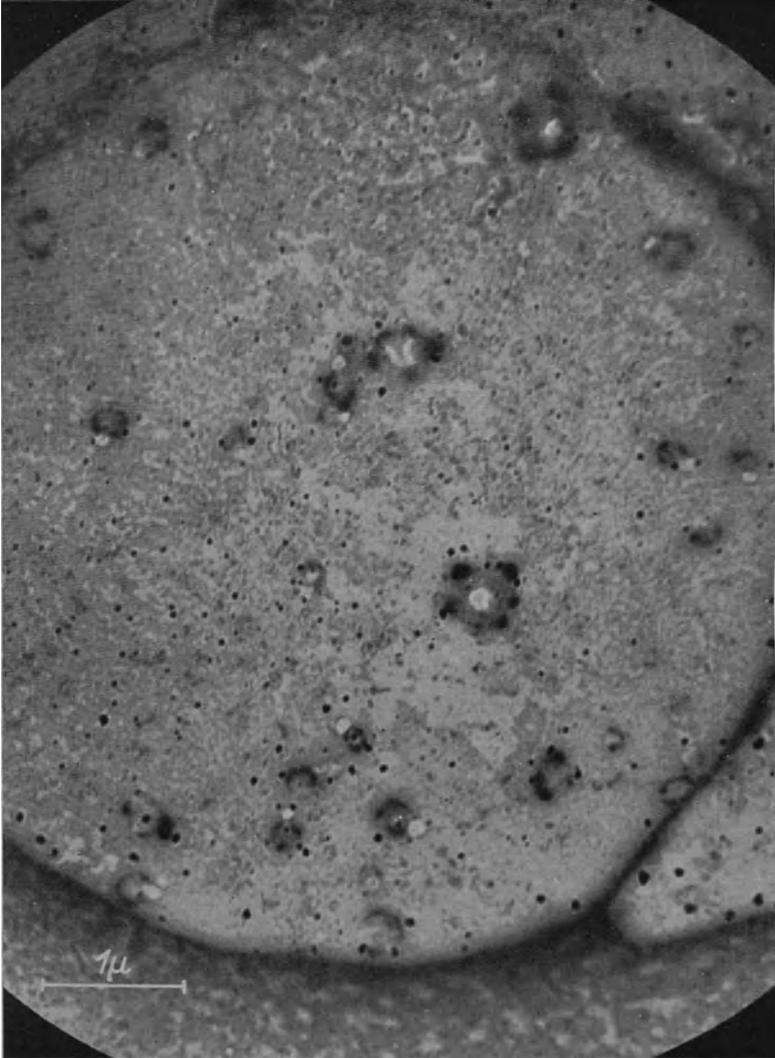
Die Zellen stammen von einer an Bauchfellentzündung durch Pneumokokken erkrankten Maus. Am Rande der Zelle ist auf beiden Bildern eine Kokkenkolonie erkennbar. Es scheint, daß auch in die Gänge zwischen den Kammern, die den Zellkern umgeben, einzelne Kokken vorgedrungen sind.

Gözl und Jakob.

Elektr. Aufn.

Vergr.: 4000- bzw. 3000 fach.

Medizin: Virusarten.



Pocken-Virus-Präparat.

Das Präparat wurde aus der Augenhornhaut eines Kaninchens gewonnen, das mit Variola-Vakzine-Virus (Pocken-Virus) infiziert war. Das Präparat weist zahlreiche Gebilde auf, die als Elementarkörperchen (Viruskörperchen) gedeutet wurden.

Haagen und Volmer [148].

Elektr. Aufn.

Vergr.: 20 000 fach.

IX. Veröffentlichungen.

Unsere Buch-Veröffentlichungen über geometrische Elektronenoptik.

1934

Geometrische Elektronenoptik¹⁾.

E. Brüche u. O. Scherzer.

Springer-Verlag. 332 Seiten.

Aus dem Vorwort:

„Selbst die grundlegende Arbeit von Busch, die den mathematischen Existenzbeweis der magnetischen Linse brachte, führte noch nicht unmittelbar zum Ausbau der geometrischen Elektronenoptik, wenn sie zweifellos auch Fundament und Antrieb der neueren Entwicklung darstellt. Den nächsten Schritt vorwärts bedeutete die Erkenntnis, daß man brauchbare Elektronenlinsen ebenfalls mit elektrischen Feldern herzustellen vermag. ... So trat der magnetischen Elektronenoptik mit ihren Eigentümlichkeiten hinsichtlich Konstanz der Elektronengeschwindigkeit, Bahnverschraubung und Bildverdrehung die elektrische Elektronenoptik als eigentliches Analogon zur geometrischen Lichtoptik an die Seite.

Doch auch diese engere Analogie hätte kaum zum weiteren Ausbau der geometrischen Elektronenoptik veranlassen können, wenn nicht erstens experimentell gezeigt worden wäre, daß — was kaum zu erwarten war — die Erzielung einwandfreier Abbildungen mit Elektronen nicht an sekundären Effekten scheitert, und wenn nicht zweitens die ferne Hoffnung auf die Überschreitung der Auflösungsgrenze des Mikroskops bestanden hätte ... Wir stehen zur Zeit auf jener Stufe, wo die erste stürmische Entwicklung in die ruhigen Bahnen systematischer Feinarbeit übergehen muß. Die Verfasser glauben, daß eine organische Darstellung, die eine Übersicht über das bereits Erreichte, über die großen Zusammenhänge dieses Gebietes und die nächsten Aufgaben ermöglicht, einen merklichen Impuls für die Weiterentwicklung geben kann ...

So möge denn diese Monographie der Weiterentwicklung der Mikroskopie, der Metallurgie, der Massenspektrographie, dem Fernsehen und anderen Disziplinen, die von der Entwicklung der geometrischen Elektronenoptik berührt werden, von Nutzen sein! Möge sie neue physikalische Arbeiten und technische Entwicklungen anregen helfen und so auch einen bescheidenen Anteil an der Lösung größerer Fragen haben!“

¹⁾ Dieser Monographie folgte in der Literatur erst nach 5 Jahren das zweite Buch über das gleiche Gebiet. Heute gibt es mehrere deutsche und ausländische Darstellungen über geometrische Elektronenoptik.

1937

Beiträge zur Elektronenoptik.

Vorträge von der Physikertagung 1936

sowie ergänzende Beiträge

herausgegeben von

H. Busch und E. Brüche.

Verlag: Johann Ambrosius Barth. 156 Seiten.

Aus dem Vorwort:

„Das vorliegende Buch verdankt seine Entstehung der Physiker-Tagung 1936 in Bad Salzbrunn, wo die geometrische Elektronenoptik Gegenstand des ersten Hauptthemas war. Der an uns als die Einführenden ergangenen Anregung des Verlages, die im Rahmen dieses Hauptthemas gehaltenen Vorträge in Buchform herauszugeben, sind wir trotz einiger anfänglicher Bedenken gern nachgekommen. Denn einmal schien uns bei dem schnellen Entwicklungstempo der Elektronenoptik und ihrer wachsenden technischen Bedeutung ein Bedürfnis zu bestehen, über die seit Erscheinen der Monographie von Brüche und Scherzer erreichten Fortschritte einen auch einem weiteren Leserkreise leicht zugänglichen Überblick zu geben, zum anderen ergab sich so eine erwünschte Gelegenheit, diejenigen Salzbrunner Vorträge, die aus äußeren Gründen nicht in den Tagungsheften der wissenschaftlichen Zeitschriften erscheinen konnten, zum Abdruck zu bringen.“

Aus dem Forschungs-Institut der AEG stammen folgende Beiträge:

E. Brüche, Experimentelle Elektronenoptik und ihre Anwendung.

A. Recknagel, Elektronenspiegel und Elektronenlinse.

H. Mahl, Das elektronenoptische Strukturbild und seine Anwendung.

W. Schaffernicht u. H. Katz, Der elektronenoptische Bildwandler.

1941

Elektronengeräte¹⁾.

E. Brüche u. A. Recknagel.

Springer-Verlag. 447 Seiten.

In den sechs Jahren, die seit Erscheinen des ersten Buches über die geometrische Elektronenoptik vergangen sind, hat sich das junge Gebiet kräftig weiterentwickelt. Die Theorie ist ausgebaut worden und die neue Auffassung der Elektronenbewegung hat erfreuliche praktische Konsequenzen gezeitigt. So ist z. B. die Braunsche Röhre unter Mitwirkung der Elektronenoptik zu der Form der lang erstrebten Hochvakuumröhre gelangt, die heute bereits einen hohen technischen Stand hat; so ist ferner das Übermikroskop verwirklicht und schon fast als Gebrauchsgerät anzusprechen. Wie lebhaft die Entwicklung allein bei diesen beiden Entwicklungszweigen war, zeigt die Tatsache, daß inzwischen ausführliche Darstellungen in Buchform über diese Themen erschienen sind.

¹⁾ Neuauflage des zweiten Teils: „Anwendungen“ des vorstehend genannten Buches von Brüche und Scherzer.

Bei dieser Sachlage schien es zweckmäßig zu sein, die in der Erstaufgabe bereits vorhandene Hauptunterteilung in Grundlagen und Anwendungen durch Zerlegen des ursprünglichen Werkes in zwei Bücher zu erweitern. Während die reine geometrische Elektronenoptik später eine lehrbuchartige Behandlung finden soll, sei zunächst die angewandte geometrische Elektronenoptik in neuer Fassung vorgelegt.

Für die Neuauflage dieses zweiten Teiles war zu berücksichtigen, daß es nun nicht mehr, wie bei der Erstaufgabe, genügte, an den drei Beispielen Braunsche Röhre, Elektronenmikroskop und Materiespektrograph die elektronenoptische Auffassung zu erläutern. Vielmehr sollte danach gestrebt werden, die Mannigfaltigkeit der Elektronengeräte, d. h. der Geräte, für die die Bewegung von freien Elektronen charakteristisch ist, unter elektronenoptischen Gesichtspunkten zu behandeln. Dabei mußte der Elektronenoptik das Schicksal zuteil werden, das allen anregenden Ideen beschieden ist. Sie müssen gegenüber dem, was sie geleistet haben, zurücktreten. So entstand praktisch ein neues Buch: „Die Elektronengeräte.“

Zehn Jahre Elektronenmikroskopie.

Ein Selbstbericht des AEG Forschungs-Instituts.

Herausgegeben von Prof. Dr. C. Ramsauer.

Springer-Verlag. 128 Seiten.

Die kleine Schrift soll über den engen Kreis der Fachleute hinaus der Allgemeinheit einen Einblick in unsere nunmehr zehnjährige Arbeit auf dem Gebiete der Elektronenmikroskopie geben.

1942

Elektronenmikroskopie.

Bericht über die Arbeiten des AEG Forschungs-Instituts 1930—1941.

Herausgegeben von Prof. Dr. C. Ramsauer.

Zweite vermehrte Auflage des Selbstberichtes

„Zehn Jahre Elektronenmikroskopie“.

Springer-Verlag. 176 Seiten.

Geometrische Elektronenoptik.

Dargestellt unter besonderer Berücksichtigung
des Elektronen- und Übermikroskops.

Herausgeber: Der Studentische Kulturaustausch und die
Universität Heidelberg.

Unter Mitarbeit von: Dr. E. Brüche, Prof. Dr. H. Cramer, Prof. Dr. E. Haagen,
Dr. J.-G. Helmcke, Dr. A. Jakob, Dr. H. Mahl, Prof. Dr. C. Ramsauer.

Unsere Veröffentlichungen über geometrische Elektronenoptik.

(Titel gekürzt.)

			1930	Bd.	S.
1	Brüche	Strahlen langsamer Elektronen	Petersen, Forschg. und Technik	—	24
1932					
2	Brüche	Elektronenmikroskop	Naturwiss.	20	49
3	Brüche u. Johannson	Elektronenoptik und Elektronenmikroskop	Naturwiss.	20	353
4	Dobke	Eine neue Braunsche Röhre	Z. techn. Phys.	13	432
5	Brüche	Geometrie d. Beschleunigungsfeldes	Z. Phys.	78	26
6	Brüche u. Johannson	Kinematogr. Elektronenmikroskopie	Ann. Phys.	15	145
7	Schulz	Abbildung durch geschichtete Medien	Z. Phys.	78	17
8	Brüche u. Johannson	Einige neue Kathodenuntersuchungen	Phys. Z.	33	898
1933					
9	Johannson u. Scherzer	Über die elektr. Elektronensammellinse	Z. Phys.	80	183
10	Scherzer	Theorie elektronenopt. Linsenfehler	Z. Phys.	80	193
11	Brüche	Grundlagen der Elektronenoptik	Z. techn. Phys.	14	49
12	Brüche	Optik der Braunschen Röhre	Arch. Elektrot.	27	266
13	Brüche	Geometrische Elektronenoptik	Jb. AEG-Forschg.	3	111
14	Brüche	Braunsche Röhre als Synchronoskop	Arch. Elektrot.	27	609
15	Brüche u. Johannson	Barium-Aufdampfkathode	Z. Phys.	84	56
16	Johannson	Immersionsobjektiv d. Elektronenoptik	Ann. Phys.	18	385
17	Johannson u. Knecht	Kombinierte Benutzung von Elektronenlinsen	Z. Phys.	86	367
18	Brüche	Abbildung mit lichtelektr. Elektronen	Z. Phys.	86	448
19	Richter	Emissionssubstanz auf Kathoden	Z. Phys.	86	697
20	Brüche u. Scherzer	Braunsche Röhre als elektronenoptisches Problem	Z. techn. Phys.	14	464
21	Brüche u. Johannson	Kristallographische Untersuchungen	Z. techn. Phys.	14	487
22	Henneberg	Massenspektrographie I	Ann. Phys.	19	335
1934					
23	Henneberg	Massenspektrographie II	Ann. Phys.	20	1
24	Knecht	Komb. Licht- u. Elektronenmikroskop	Ann. Phys.	20	161
25	Brüche	Braunsche Röhre als Problem der Elektronenoptik	Arch. Elektrot.	28	384
26	Brüche u. Scherzer	Geometrische Elektronenoptik	Buch (Springer)	—	—
27	Henneberg	Achromatische elektr. Elektronenlinsen	Z. Phys.	90	742
28	Johannson	Immersionssystem als System der Braunschen Röhre	Z. Phys.	90	748
29	Brüche	Zu zwei Veröffentl. ü. Elektronenoptik	Z. Phys.	92	215
30	Johannson	Immersionsobjektiv II	Ann. Phys.	21	274
31	Henneberg	Massenspektrographie III	Ann. Phys.	21	390
32	Brüche u. Knecht	Eisenumwandlung	Z. techn. Phys.	15	461
33	Heß	Immersionslinse I	Z. Phys.	92	274
34	Pohl	Lichtelektrische Abbildung	Z. techn. Phys.	15	579
35	Fünfer	Voltmeter a. elektronenoptischer Grundlage	Z. techn. Phys.	15	582
36	Brüche u. Knecht	Auflösung des Immersionsobjektivs	Z. Phys.	92	462
37	Brüche	Schichtenuntersuchung	Kolloid-Z.	69	389

1935			Bd.	S.
38	Brüche	Grundlagen d. angew. Elektronenoptik	Arch. Elektrot.	29 79
39	Henneberg	Low-Voltage Electron Microscope	J. E. E.	76 111
40	Mahl	Abbildung von Mineralien	Mineral. M.	46 289
41	Henneberg	Potential von Schlitz- u. Lochblende	Z. Phys.	94 22
42	Schaffernicht	Umwandlung von Licht- in Elektronenbilder	Z. Phys.	93 762
43	Brüche u. Knecht	Eisenumwandlung	Z. techn. Phys.	16 95
44	Henneberg	Das Elektronenmikroskop	ETZ	56 853
45	Brüche	Zur Braunschen Hochvakuumröhre	Arch. Elektrot.	29 642
46	Schenk	Emissionsverteilung a. kristalliner Kathode	Ann. Phys.	23 240
47	Henneberg	Auflösung des Elektronenmikroskops	Z. Instr. K.	55 300
48	Henneberg u. Recknagel	Chromatischer Fehler b. Bildwandler	Z. techn. Phys.	16 230
49	Mahl u. Pohl	Lichtelektrische Abbildungen	Z. techn. Phys.	16 219
50	Stabenow	Magnetische Linse ohne Bild Drehung	Z. Phys.	96 634
51	Glaser u. Henneberg	Potential von Schlitz- u. Lochblende	Z. techn. Phys.	16 222
52	Brüche u. Schaffernicht	Elektronenopt. Fragen auf dem Fernsehgeb.	ENT	12 381
53	Brüche	Elektronenoptisches Strukturbild	Z. Phys.	98 77
54	Henneberg u. Recknagel	Elektr.-Linse, Elektr.-Spiegel und Steuerung	Z. techn. Phys.	16 621
55	Brüche u. Mahl	Thorierte Wolfram und Molybdän I	Z. techn. Phys.	16 623
56	Recknagel	Emissionskonstanten von Ein- und Vielkristallen	Z. Phys.	98 355
57	Mahl	Abbildung von emittierenden Drähten	Z. Phys.	98 321
1936				
58	Brüche (Schaffernicht)	Fortschritte der Elektronenoptik	Jb. AEG-Forschg.	4 25
59	Schenk	Glühemissionsbild von Nickel	Z. Phys.	98 753
60	Brüche u. Mahl	Abbildung von thoriertem Wolfram II	Z. techn. Phys.	17 81
61	Brüche u. Recknagel	Modelle elektr. und magnet. Felder	Z. techn. Phys.	17 126
62	Behne	Immersionsobjektiv für schnelle Elektronen	Ann. Phys.	26 372
63	Behne	Folienabbildung	Ann. Phys.	26 385
64	Mahl u. Schenk	Einfluß der Gleitebenen Spuren	Z. techn. Phys.	101 117
65	Boersch	Prim. u. sekund. Bild im Elektronenmikr. I	Ann. Phys.	26 631
66	Brüche u. Recknagel	Dimensionsbeziehung I	Z. techn. Phys.	17 241
67	Brüche u. Mahl	Thoriertes Wolfram und Molybdän III	Z. techn. Phys.	17 262
68	Boersch	Prim. u. sekund. Bild im Elektronenmikr. II	Ann. Phys.	27 75
69	Behne	Zur Kenntnis der Immersionslinse II	Z. Phys.	101 521
70	Hottenroth	Über Elektronenspiegel	Z. Phys.	103 460
71	Brüche u. Henneberg	Geometrische Elektronenoptik	Erg. exakt. Nat.	15 365
72	Recknagel	Zur Theorie des Elektronenspiegels	Z. techn. Phys.	17 643
73	Mahl	Sauerstoffeinfluß auf die Glühemission	Z. techn. Phys.	17 653
74	Brüche	Exper. Elektronenoptik und Anwendung	Z. techn. Phys.	17 588
75	Brüche	Ausstellung Elektronenoptik	Z. techn. Phys.	17 622
76	Schaffernicht	Der elektronenoptische Bildwandler	Z. techn. Phys.	17 596
1937				
77	Recknagel	Zur Theorie des Elektronenspiegels	Z. Phys.	104 381
78	Recknagel	Elektronenspiegel und Elektronenlinse	Beitr. Elekt.-Optik	— 42
79	Mahl	Das elektronenoptische Strukturbild	Beitr. Elekt.-Optik	— 73
80	Brüche	Geometrische Elektronenoptik	Schröter: Ferns.	— 87
81	Brüche u. Recknagel	Dimensionsbeziehung II	Z. techn. Phys.	18 139
82	Mahl	Feldemission geschichteter Kathoden	Naturwiss.	25 459
83	Hottenroth	Untersuchungen über Elektronenspiegel	Ann. Phys.	30 689
84	Boersch	Abbildung von Dampfstrahlen	Z. Phys.	107 493
85	Katz	Elektronendurchgang durch Metallfolien	Z. techn. Phys.	18 555
86	Mahl	Feldemission a. geschichteten Kathoden I	Z. techn. Phys.	18 559
87	Mrowka	Kristallgitterstruktur und Glühemission	Z. techn. Phys.	18 572
88	Boersch	Bänder bei Elektronenbeugung	Z. techn. Phys.	18 574

1938			Bd.	S.	
89	Recknagel	Intensitätssteuerung v. Elektronenströmen	Hochfr. Elektroak.	51	66
90	Mahl	Elektronenopt. Kathodenabbild. in einer Gasentladung	Ann. Phys.	31	425
91	Brüche	Elektronenbewegung	Jb. AEG-Forschg.	5	27
92	Schaffernicht u. Steudel	Elektronengeräte	Jb. AEG-Forschg.	5	66
93	Mahl	Ionen- und Elektronenemission	Z. Phys.	108	771
94	Katz	Durchgang v. Elektronen durch Folien I	Ann. Phys.	33	160
95	Katz	Durchgang v. Elektronen durch Folien II	Ann. Phys.	33	169
96	Mahl	Feldemission a. geschichteten Kathoden II	Z. techn. Phys.	19	313
97	Boersch	Zur Bilderzeugung im Mikroskop	Z. techn. Phys.	19	337
1939					
98	Mahl	Aufnahmen mit dem elektr. Übermikroskop	Naturwiss.	27	417
99	Boersch	Schattenmikroskop, ein neues Übermikr.	Naturwiss.	27	418
100	Recknagel	Elektronenlinse mit Laufzeiterscheinungen	Jb. AEG-Forschg.	6	78
101	Neßlinger	Über Achromasie von Elektronenlinsen	Jb. AEG-Forschg.	6	83
102	Mahl	Elektrostat. Elektr.-Mikroskop hoher Auflös.	Z. techn. Phys.	20	316
103	Brüche u. Haagen	Übermikroskop in der Bakteriologie	Naturwiss.	27	809
104	Boersch	Das Elektronen-Schattenmikroskop	Z. techn. Phys.	20	346
1940					
105	Brüche	Verwendung elektr. und magnet. Felder	TFT	29	1
106	Mahl	Metallkundliche Untersuchungen	Z. techn. Phys.	21	17
107	Mahl	Stereoskopische Aufnahmen	Naturwiss.	28	264
108	Ramsauer	Entwicklung des Übermikroskops	Jb. AEG-Forschg.	7	1
109	Brüche	10 Jahre Entwicklung	Jb. AEG-Forschg.	7	2
110	Brüche	Zweipolssystem als Ziel rein elektr. Abbildungsgeräte	Jb. AEG-Forschg.	7	9
111	Recknagel	Fehler von Elektronenlinsen	Jb. AEG-Forschg.	7	15
112	Kinder u. Pendzich	Neue magnetische Linse kleiner Brennweite	Jb. AEG-Forschg.	7	23
113	Boersch	Problem der Bildentstehung	Jb. AEG-Forschg.	7	27
114	Boersch	Elektronen-Schattenmikroskop	Jb. AEG-Forschg.	7	34
115	Mahl	Das elektrostatische Übermikroskop	Jb. AEG-Forschg.	7	43
116	Gözl	Spannungsfestigkeit der Elektrodenmetalle für die Linse des Übermikroskops	Jb. AEG-Forschg.	7	57
117	Brüche u. Gözl	Einschleusung von Objekt und Platte	Jb. AEG-Forschg.	7	60
118	Mahl	Übermikroskop in Kolloidchemie und Metallurgie	Jb. AEG-Forschg.	7	67
119	Jakob u. Mahl	Übermikroskop in der Bakteriologie	Jb. AEG-Forschg.		77
120	Mahl	Das elektrostat. Elektronen-Übermikroskop und Anwendungen in der Kolloidchemie	Kolloid-Z.	19	105
121	Mahl	Plastisches Abdruckverfahren	Metallwirtschaft	91	7
122	Döring u. Mayer	Geschwindigkeitsgesteuerte Laufzeitröhren	ETZ	61	488
123	Henneberg	Übermikroskop mit elektrostat. Linsen	ETZ	61	685
124	Jakob u. Mahi	Kapseldarstellung bei Anaerobiern	Arch. Zellforschg.	61	713
126	Kinder	Übermikroskopie mit höheren Spannungen	Z. techn. Phys.	61	773
127	Boersch	Fresnelsche Elektronenbeugung	Naturwiss.	24	87
128	Boersch	Fresnelsche Beugungerscheinungen im Übermikroskop	Z. techn. Phys.	21	222
129	Mahl	Orientierungsbestimmung v. Aluminium-Einzelkristallen a. übermikroskopischem Wege	Naturwiss.	28	709
130	Recknagel	Sphärische Aberration bei elektronenopt. Abbildung	Naturwiss.	28	711
131	Mahl	Übermikroskop. Elektronenbilder von durchstrahlten Objekten	Metallwirtschaft	19	1082
132	Brüche	10 Jahre Elektronenmikroskopie bei d. AEG	Z. Phys.	117	67
			Z. angew. Photographie	2	58
			AEG-Mittlg.	—	302

1941			Bd.	S.	
133	Mahl	Oxydische Oberflächenfilme	Korrosion u. Metallschutz	17	1
134	Kinder	Beobachtungen an Magnesiumoxyd-kristallen	Z. techn. Phys.	22	21
135	Brüche u. Recknagel	Elektronengeräte	Buch (Springer)	—	—
136	Ramsauer	10 Jahre Elektronenmikroskopie	Buch (Springer)	—	—
137	Brüche	Entwicklung des Elektronen-Übermikroskops	VDJ-ZS.	85	221
138	Mahl	Plastisches Abdruckverfahren bei Oberflächen	Z. techn. Phys.	22	33
139	Mahl	Neue Ergebnisse auf metallurgischem Gebiet	Z. f. Metallkunde	33	68
140	Jakob	Tumor-Asciteszellen	Klin. Wochenschr.	20	719
141	Kinder	Jochlinsen-Übermikroskop. Anwendungen in der Kolloidchemie	Kolloid-ZS.	95	326
142	Mahl	Elektronenstrahlsschäden bei Zellulosefasern	Kolloid-ZS.	96	7
143	Henneberg	Elektronenmikroskop, Übermikroskop u. Metallforschung	Stahl u. Eisen	61	769
144	Mahl	Metallkundliche Untersuchungen	D. Chem. Fabrik	14	279
145	Recknagel	Theorie des Elektronenmikroskops für Selbststrahler	Z. Phys.	117	689
146	Mahl	Aluminium-Ätzstrukturen	Zentralbl. f. Mineralogie Abt. A	—	182
147	Mahl	Nachweis von Ausscheidungen	Metallwirtschaft	20	983
1942					
148	Ramsauer	Elektronenmikroskopie	Buch (Springer)	—	—
149	Mahl	Emissionsmikroskopie u. elektrost. Linsen	Z. techn. Phys.	23	117
150	Mahl	Übermikroskop. Oberflächendarstellung mit dem Abdruckverfahren	Naturwiss.	30	207
151	Mahl u. Stranski	Ätzfiguren an Al-Kristallflächen I	Z. f. phys. Chem.	51	319
152	Arnold u. Götz	ZnO-Untersuchungen	Kautschuk	18	39
153	Jakob	Untersuchungen über die Struktur der Tumorasцитезelle . . . ein Beitrag zur Morphologie der Zelle	Z. f. Krebsforsch.	52	412
154	Emmel, Jakob u. Götz	Elektronenopt. Unters. a Malaria-Sporozoitien und Leishmania donovani I	Dtsch. Tropenmed. Z.	46	254
155	Duffek u. Mahl	Übermikroskop. Oberflächenabb. von Metallen nach dem Abdruckverfahren ohne Beschädigung der Probenoberfläche	Arch. f. Eisenhüttenwesen	16	73
156	Ramsauer, Brüche, Steudel u. a.	Elektronenstrahl-Oszillographie	Jb. AEG-Forsch.	8	129
157	Ramsauer, Brüche, Mahl u. a.	Geometrische Elektronenoptik	Europäische Studienmappe	—	—
158	Brüche	Auflösungsgrenze des Emissionsmikroskops	Kolloid-Z.	100	192
159	Mahl	Thermische Oxydation von Al	Kolloid-Z.	100	219
160	Kinder	Emissions-Übermikroskopie mit magnetischen Linsen	Naturwiss.	30	591
161	Recknagel	Theorie d. Elektronenmikroskops für Selbststrahler	Jb. AEG-Forsch.	9	1
162	Mahl u. Pawlek	Übermikr. Unters. an Al-Legierungen	Z. f. Metallkunde	34	232
163	Mecklenburg	Elektrostat. Emissions-Übermikroskop.	Z. f. Phys.	120	21
164	Mahl u. Stranski	Ätzfiguren an Al-Kristalloberflächen II	Z. f. phys. Chem.	52	257
165	Mahl u. Pawlek	Übermikr. Unters. an Stahl I	Arch. f. Eisenhüttenwesen	16	219
166	Henneberg u. Brüche	Begriffe und Bezeichnungen der Elektronenoptik	ATM Lfg. 138	—	—
167	Emmel, Götz u. Jakob	Elektronenoptische Untersuchungen an Malaria-Sporozoitien II	Dez. 1942. J 834-3 Dtsch. Tropenmed. Z.	46	573

Geometrische Elektronenoptik.

Grundlagen und Anwendungen.

Von E. Brüche und O. Scherzer.

Mit einem Titelbild und 403 Abbildungen. XII, 332 Seiten. 1934.

Geheftet RM 26,—.

Aus dem Inhalt:

Teil A. Grundlagen.

Allgemeine Grundlagen der Elektronenoptik: — Welle und Korpuskel. — Zur Analogie zwischen Licht und Elektron. — Geometrische Licht- und Elektronenoptik. — Die brechenden Medien der Elektronenoptik: — Allgemeines über elektronenoptische Medien. — Elektrische Potentialfelder. — Magnetische Felder. — Die Brechungselemente der Elektronenoptik: — Elektrische Linsen. — Magnetische und kombinierte Linsen. — Ablenkelemente und Zylinderlinsen. — Raumladungsfelder: — Gaskonzentration. — Elektronenoptische Wirkungen des Kathodenfalls.

Teil B. Anwendungen.

Die Braunsche Röhre: — Braunsche Röhre und Elektronenoptik. — Braunsche Röhre mit ruhender Optik. — Braunsche Röhre mit bewegter Optik. — Neuere Entwicklung der Braunschen Röhre. — Das Elektronenmikroskop: — Die elektronenmikroskopischen Systeme. — Methodisches zur elektronenmikroskopischen Abbildung. — Elektronenmikroskopie von Glühkathoden. — Ausbau der Elektronenmikroskopie. — Der Spektrograph: — Spektrographie von Materiestrahlen. — Spektrographie einparametrischer Strahlung. — Spektrographie zweiparametrischer Strahlung.

Aus den Besprechungen:

Professor K. W. Wagner in der „Elektrischen Nachrichtentechnik“: Für die Herausgabe der ersten systematischen Darstellung dieses Gebietes gebührt den Verfassern der Dank der Fachwelt.

Professor Sommerfeld in der „Elektrotechnischen Zeitschrift“: Ein wertvolles, fesselnd geschriebenes Buch mit reichem Inhalt.

Professor Joos in der „Physikalischen Zeitschrift“: Dieses aus dem Forschungs-Laboratorium der AEG hervorgegangene prächtige Werk steht wissenschaftlich auf einem so hohen Niveau, daß mancher „reine“ Physiker neiderfüllt zu ihm aufblicken mag.

Professor Mark in der „Metallwirtschaft“: Das ganze Buch wirkt durch die Durchdringung von Experiment und Theorie besonders anziehend. Saubere und wohlgedachte Abbildungen vermitteln das Verständnis in ungewöhnlich anschaulicher Weise.

Professor Gehrts in der „Zeitschrift für technische Physik“: Daß die Elektronenoptik eine derartige Bedeutung für die technische Physik in so kurzer Zeit erreichen konnte, verdankt sie vornehmlich der rastlosen Arbeit der Verfasser und ihrer Mitarbeiter.

Z u b e z i e h e n d u r c h j e d e B u c h h a n d l u n g

Elektronengeräte.

Prinzipien und Systematik.

Von Dr.-Ing. habil E. B r ü c h e ,
unter Mitarbeit von Dr. phil. A. R e c k n a g e l.

(Neuaufgabe des zweiten Teils, „Anwendungen“, von Brüche - Scherzer,
Geometrische Elektronenoptik.)

Mit 597 Abbildungen und 10 Großbildern. XVI, 447 Seiten.
Geheftet RM 45,—, Ganzleinen RM 48,—

Aus dem Inhalt:

I. Teil. Die Elektronenbewegung unter technischen Gesichtspunkten:

Die Elektronenbewegung im statischen Feld. — Die Elektronenbewegung im Hochfrequenzfeld. — Prinzipielle Fragen. — Kunstgriffe der Strahlführung. — Aufbauelemente.

II. Teil. Aufbau der Geräte:

Intensitätsgeräte. — Lenard- und Röntgenröhre. — Strahlgeräte. — Abbildungsgeräte. — Laufzeit-Geräte. — Spektralgeräte.

Aus den Besprechungen:

Professor Kossel in der „Elektrotechnischen Zeitschrift“: Der Leser wird nicht etwa nur über ausgeführte Apparate unterrichtet, sondern trägt den Nutzen langer Erfahrung und vielen Nachdenkens mit davon. So darf man sich von diesem Buch starke und dankenswerte Wirkung auf die Arbeit in unseren Instituten und Entwicklungslaboratorien versprechen.

Professor Rajewsky im „Zentralblatt für die gesamte Radiologie“: Die Darstellungsform ist in gleicher Weise einfach wie ernst. Die Hoffnung der Verfasser, „daß das Buch der Weiterentwicklung der Elektronik in physikalischer und technischer Beziehung von Nutzen sein und einen Anteil an der Lösung der großen technischen Aufgaben unserer Zeit haben wird“, kann als Gewißheit gelten.

Professor Joos in der „Zeitschrift für technische Physik“: So bedeutet das Erscheinen des glänzend geschriebenen, vorzüglich ausgestatteten Werks mitten im Krieg eine Leistung, zu der man Verfasser wie Verlag gleichermaßen beglückwünschen kann.

Z u b e z i e h e n d u r c h j e d e B u c h h a n d l u n g