Zeitschrift: Prisma : illustrierte Monatsschrift für Natur, Forschung und Technik
Band: 3 (1948)
Heft: 12

Artikel: Elektronenmikroskop und Elektronenbild
Autor: Induni, Giovanni
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-654404

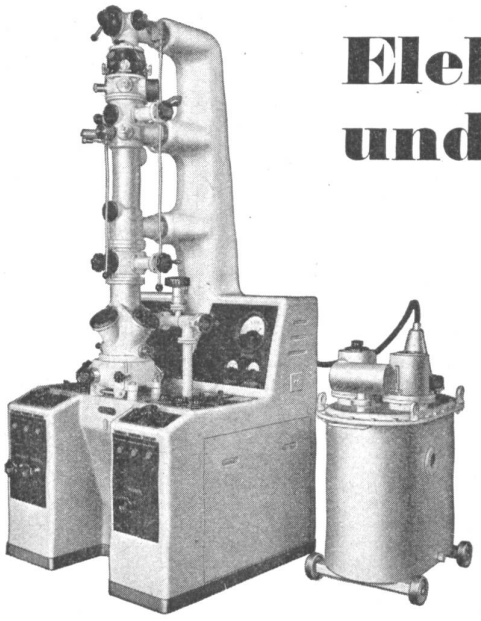
Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch



Elektronenmikroskop und Elektronenbild

Von Giovanni Induni

Bild 1: *Ansicht des schweizerischen Elektronenmikroskopes der Firma Trüb-Täuber, Zürich.*

Aus den vielen Beschreibungen des Elektronenmikroskopes hat man oft den Eindruck, daß dieses Instrument dem Lichtmikroskop sehr ähnlich und nur seine Leistung größer sei. Aber trotz der scheinbaren Ähnlichkeit ist der Unterschied beträchtlich. Strahlengang und Bildentstehung sind sehr kompliziert und außerhalb der Spezialliteratur wenig beschrieben. Damit sich unsere Leser ein Bild vom Aufbau eines solchen Instrumentes machen können, ist auf Abbildung 1 das schweizerische Elektronenmikroskop in einer Außenansicht und auf Abbildung 2 im Längsschnitt wiedergegeben.

In einem System von vertikal stehenden, vakuumdicht aufeinander gebauten Elementen ist das eigentliche Elektronenmikroskop eingebaut. Dieses System wird mit Hilfe einer mechanischen Molekularpumpe und einer Vorvakuumpumpe möglichst luftleer gemacht. Das ist notwendig, damit die Elektronen sich ungehindert bewegen können. Im obersten Teil befindet sich, wie die Legende angibt, die Elektronenstrahlquelle. Durch Anlegen von Hochspannung (50 000 Volt) schießt aus dieser ein sehr feiner Elektronenstrahl mit rund einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit. Der Strahl passiert eine feine Blende, eine Sammellinse als Kondensor und das Objekt in der Objektpatrone bei der Objektschleuse, um dann durch die beiden Elektronenlinsen des Objektivs und des Projektivs ein Elektronenbild auf dem Leuchtschirm oder der photographischen Platte zu entwerfen. Das Elektronenmikroskop besitzt also seine Lichtquelle oben und die Beobachtungsstelle unten. Diese ungewöhnliche Umkehrung rührt von der Zeit her, als seine Vorgänger, die Hochspannungsoszillographen, noch mit ungeschützten Hochspannungszuführungen versehen waren, und man diese daher berührungssicher nach oben versetzt hat.

Was weiter auffällt, ist die ungewöhnliche Länge des Instrumentes von über einem Meter. Das hat folgende Ursachen: Um die große Leistungsfähigkeit des Elektronenmikroskopes in den Bildern ausnützen zu können, macht man seine Vergrößerung entsprechend hoch (10 bis 20 mal größer als diejenige des Lichtmikroskopes). Die Elektronenlinsen werden durch die Wirkung von elektromagnetischen Feldern dargestellt und können daher nicht auf beliebig kleinen Raum zusammengedrängt werden. Man bedenke, daß zum Beispiel bei einem elektrischen Objektiv eine Spannung von 50 000 Volt auf eine Strecke von einigen Millimetern konzentriert ist, so daß es schwer hält, Linsen von kürzerer Brennweite zu konstruieren. Um eine 10 000fache Vergrößerung in zwei Stufen von 100 zu erreichen, ist die angegebene Länge erforderlich. Weil die Elektronenlinsen elektromagnetische Felder sind, zwingen sie den Konstrukteur eines Elektronenmikroskopes zu noch ganz anderen merkwürdigen Dimensionierungen im Apparat. Der Lichtmikroskopiker ist gewohnt, mit weitgeöffneten Strahlenbüscheln zu arbeiten. Das ist gestattet, weil der Optiker in der Lage ist, die Fehler am Rande der Glaslinsen unabhängig von der Mitte zu korrigieren. Die Elektronenlinsen gestatten diese Lokalkorrekturen nicht, und so ist der Elektronenoptiker gezwungen, mit sehr engen Büscheln zu arbeiten. Daher ist die Leistung eines Elektronenmikroskopes am günstigsten, wenn die

Öffnung der einfallenden Büschel zirka ein Zehntausendstel beträgt (das bedeutet, daß die äußersten Strahlen die gleiche Neigung unter sich haben wie Strahlen, unter welchen ein Meter auf 10 000 Meter Distanz gesehen wird). Da durch die Vergrößerung die Winkel eines Büschels noch abnehmen, so stellen wir fest, daß die größte Öffnung eines Büschels im Bildpunkt bei 10 000-facher Vergrößerung nur noch so groß ist, wie der Sehwinkel eines Meters aus hunderttausend Kilometer Entfernung! Die Folge davon ist eine sehr große Schärfentiefe im Elektronenmikroskop. Man sieht darin von einem Objekt sehr viele Schnittebenen praktisch gleichzeitig scharf.

Noch viel merkwürdiger ist das Verhältnis des Abstandes von Objekt bis Linse zur Wellenlänge des Lichtes. Beim Lichtmikroskop haben wir Abstände Linse-Objekt von ungefähr einem Millimeter und die Lichtwellenlänge ist zirka 0,0005 Millimeter. Das Objekt wird also in einem Abstand von 2000 Wellenlängen betrachtet. Bei den Elektronen im Elektronenmikroskop ist die zugeordnete Wellenlänge 0,05 millionstel Millimeter, die Objektdistanz ungefähr 5 mm; das Objekt wird also aus einer Distanz von ungefähr 100 Millionen Wellenlängen betrachtet. Das Elektronenmikroskop ist also im Vergleich zum Lichtmikroskop eher ein Fernrohr für kleine Objekte.

E. Kinder und A. Recknagel haben diese Verhältnisse sehr hübsch dargestellt, indem sie zeigen, daß ein getreues optisches Modell eines Elektronenmikroskopes 100 000 m lang sein müßte, und zwar mit Linsen von 100 bis 500 m Brennweite, und ein elektronisches Modell eines Lichtmikroskopes nur $^3/_{1000}$ mm Länge haben sollte, damit die Modelle genau vergleichbar wären. Wenn wir weiter vergleichen, ist es auch interessant zu erfahren, daß die Leuchtdichte der Elektronenquelle in der Raumwinkeleinheit über 10 000 Ampère pro Quadratzentimeter beträgt, das ergibt bei 50 000 Volt eine Leistung von 500 000 Kilowatt. Natürlich genügen einige zehn Watt Totalleistung um diese Dichte zu erzeugen. Beim Lichtmikroskop ist die Energiedichte nur ein zehntausendstel Watt pro Quadratzentimeter. Diese Umstände bewirken, daß die Objekte sehr hoch beansprucht werden oder außerordentlich dünn sein müssen. Man richtet die Bestrahlung nur strikte auf das Gesichtsfeld, sodaß der Elektronenstrahl zirka $^1/_{100}$ mm Durchmesser hat. Die Belastung ist immer noch so groß, daß Temperaturen von einigen hundert Grad erreicht werden. Selbstverständlich hört bei dieser intensiven Beschießung alles Leben auf; die Form von Bakterien bleibt trotzdem erhalten, wie v. Borries kürzlich nachgewiesen hat. Wenn auch die Probleme, welche sich aus diesen sehr merkwürdigen Zuständen ergeben, für den Konstrukteur schwierig sind, so sind sie doch befriedigend gelöst worden. Man beherrscht heute sowohl die Erzeugung der Hochspannung und des Vakuums, wie die leichte Ein- und Ausführung der Objekte und der photographischen Platten durch Schleusen.

Viel schwieriger ist aber die Herstellung der Präparate und die Deutung der Bilder. Die Elektronen müssen naturgemäß durch das Objekt hindurchgehen. Dabei spielen sowohl der Massencharakter als auch der Wellencharakter derselben ineinandergehende Rollen. Als Partikel können sie zum Beispiel gebremst werden, das heißt, sie ändern ihre Geschwindigkeit und somit ihre Wellenlänge. Das ist nicht erwünscht, denn die Elektronenlinsen geben keine guten Bilder mit Elektronen verschiedener Wellenlänge oder «Farbe». Eine Geschwindigkeitsverminderung von nur 0,1 Promille bedeutet schon einen Verlust an Leistung von mehreren hundert Prozent der Bestleistung. Man verlangt also eigentlich von einem Objekt, daß es für Elektronen besonders durchsichtig sein muß. Das scheint im Widerspruch mit der Forderung nach guter Sichtbarkeit. Wie entsteht also ein Elektronenbild von einem völlig durchsichtigen Objekt? Das geschieht etwa so: Elektronen sind sehr kleine, elektrisch geladene Teilchen. Die Atomkerne sind ebenfalls geladen, aber mit viel größerer Masse. Elektronen können

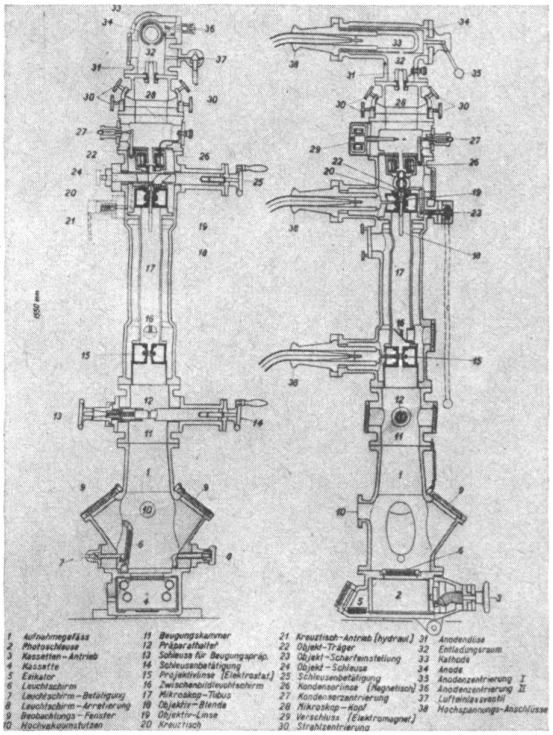
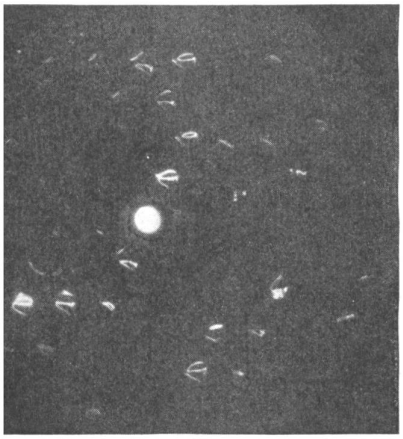
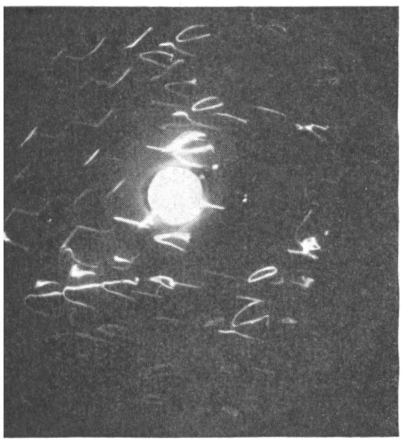
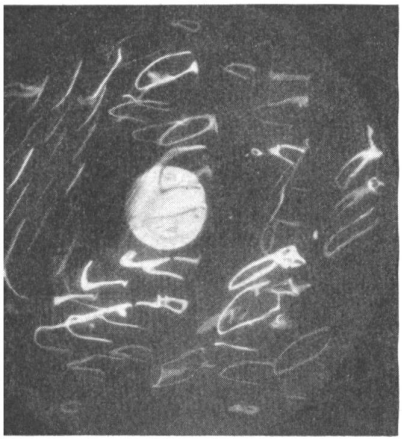


Bild 2: *Zwei Längsschnitte durch das schweizerische Elektronenmikroskop.*



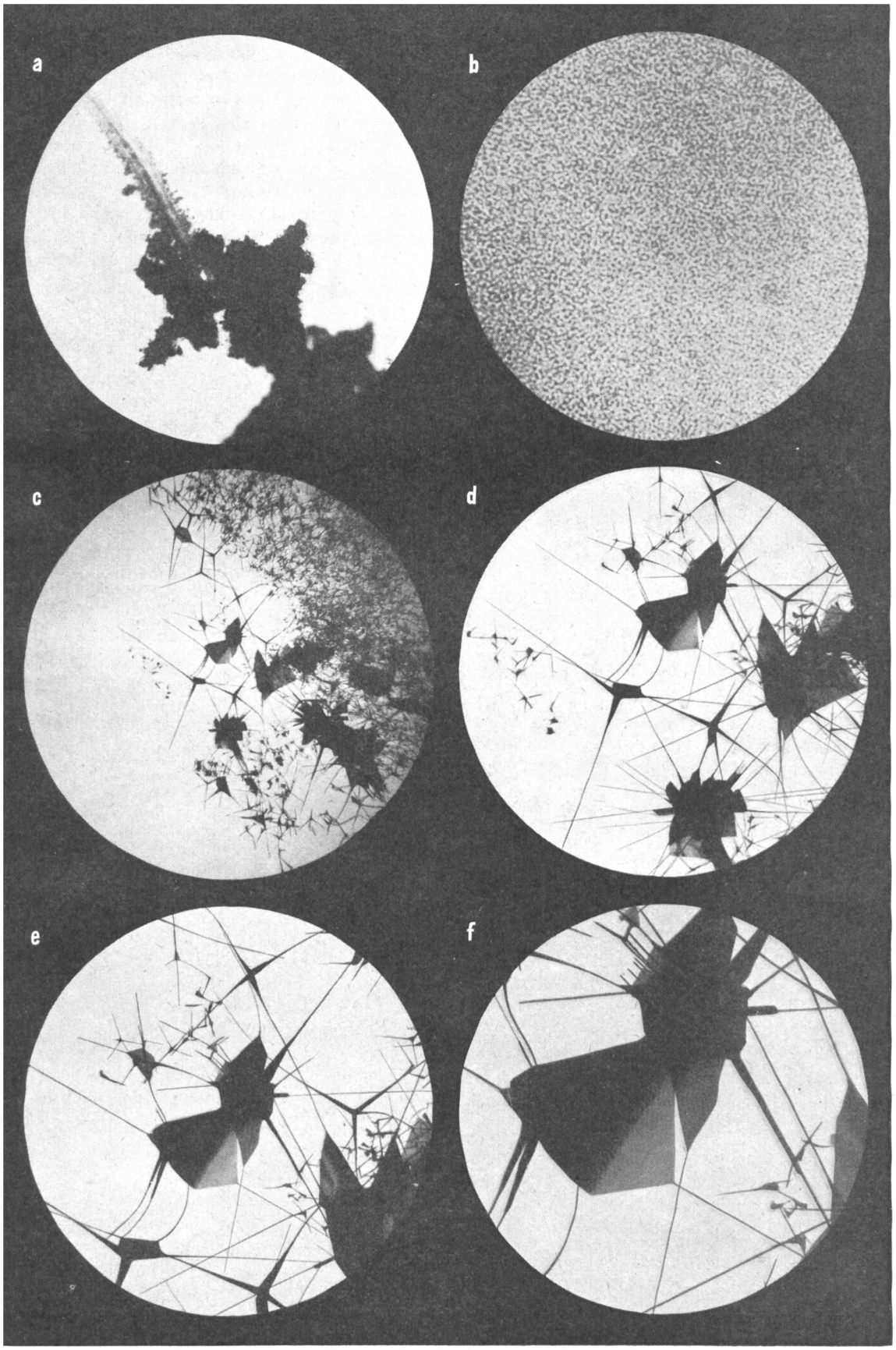




Atomkerne kaum stören, aber letztere wohl die Elektronen. Diese werden abgelenkt und fallen schief in die Linse, so daß sie nicht mehr gut an den bildseitigen Punkt gelenkt werden. Es entsteht dort ein Manko an Elektronen, somit eine dunkle Stelle. Bloß gebremste Elektronen (bei dicken Objekten) ändern wohl ihre Geschwindigkeit, aber nicht unbedingt ihre Richtung, und kommen trotzdem in die Linse, werden schlecht fokussiert und erzeugen einen diffusen Untergrund. Die Ablenkung geschieht dagegen ohne Geschwindigkeitsverlust und ist um so größer, je schwerer das ablenkende Atom ist. Die Ablenkwirkung von Goldatomen ist beispielsweise rund 16 mal so groß wie die Ablenkwirkung von Kohlenstoffatomen. Da die meisten Objekte aus C- und H-reichen Verbindungen bestehen, und die Trägerfolien auch, benützt man diese Eigenschaft, um die Objekte mit der sogenannten Goldbeschattung besser von der Folie abzuheben. Über solche Kontrastverfahren wird an anderer Stelle in dieser Zeitschrift berichtet. Die Wechselwirkung von Elektronen mit Materie ist wie bei Röntgenstrahlen ein atomarer Vorgang. Benützt man diese atomaren Erscheinungen zur Bilderzeugung, dann muß man folgendes erwarten: Jedes Atom eines Objektes liefert einen Streustrahlungsbeitrag zu einem bestimmten Bildpunkt und alle Bildpunkte erhalten einen gewissen Beitrag Streustrahlung von einem bestimmten Atom des Objektes. Diese doppelt unendliche Mannigfaltigkeit von Beiträgen kann unter Umständen Bilder liefern, welche mit dem Gegenstand nichts mehr gemeinsam haben. Um solche Erscheinungen frappant darzustellen, ist es interessant zum voraus zu wissen, wie die Atome in der Materie verteilt sind. Das ist der Fall bei Kristallen. Sehr dünne Kristalle von einigen hundert Atomlagen Dicke erzeugen bei Durchstrahlung mit einem feinen Elektronenstrahl ein regelmäßiges System von Streustrahlen, welche auf der photographischen Platte ein System von Punkten ergeben (vergleiche Bild 3). Wenn man nun mit einer Elektronenlinse von immer steigender Brechkraft den kleinen bestrahlten Bereich beobachtet, so sieht man, daß jedem Punkt ein Bereich oder eine Linie im Kristall zugeordnet ist, längs welcher die Elektronen aus dem Kristall in die Richtung der jeweiligen Ablenkung austreten. Die im Hellfeldbild des Kristalls in der Mitte sichtbaren dunkeln Linien entsprechen nicht absorbierenden Strukturen im Objekt, sondern im Gegenteil, sie sind besonders durchsichtig und die Elektronen aus diesen Stellen sind vom Kristall so kräftig abgelenkt worden, daß die Linse sie nicht mehr an die zugehörigen Punkte im Bilde hinzulenken vermag. Das ist genau gesprochen die Feinstruktur der sogenannten Kikuchi-Punkte, welche uns ziemlich viel Licht über die Natur des Elektronenbildes vermitteln kann. Nebenbei sei nur bemerkt, daß eine höhere Spannung diese dunklen Linien nicht durchstrahlen kann, weil dieselben, wie gezeigt, ohnehin in hohem Maße für Elektronen schon durchsichtig sind. Bei nichtkristallinen Objekten sind die Verhältnisse noch viel komplizierter. Bei der Ausarbeitung von geeigneten Präparationsmethoden muß auf alle diese Erscheinungen besonders Rücksicht genommen werden. Solange die Präparationstechnik sich noch in voller Entwicklung befindet, ist eine Zusammenarbeit des Physikers mit dem Elektronenmikroskopiker fast unerläßlich. Trotzdem erlaubt uns das Elektronenmikroskop sofort, eine ganz neue Welt in einem neuen Licht zu sehen. Gut präparierte Objekte lassen sich sogar verhältnismäßig leicht transportieren und unter verschiedenen Forschern austauschen. Als Beispiel dient Bild 5, eine Aufnahme von

Bild 3 links: *Bei der Durchstrahlung eines Kristallgitters mittels Elektronen erhält man ein regelmäßiges System von Streustrahlen* (oberes Bild). *Die drei anderen Aufnahmen sind entstanden durch Verwendung verschieden stark brechender Elektronenlinsen.*

Bild 4 rechts: a. *Ein Klumpen Zinkoxyd unter der Lupe 12:1*; b. *Fein verteiltes Zinkoxyd unter dem Mikroskop 600:1. Auch die Oelimmersion zeigt nur ein scheinbar formloses Pulver;* c. bis f. *Das Zinkoxyd unter dem Elektronenmikroskop bei verschiedenen Vergrößerungen:* c. *1500:1.* d. *3000:1.* e. *6000:1.* f. *12000:1.*


a
b
c
d
e
f

Bakterienzellulose. Das Präparat wurde von Dr. Mühlethaler in den USA. hergestellt und nach Europa gebracht. Unsere Aufnahme wurde mit dem schweizerischen Elektronenmikroskop gemacht und stellt sein hohes Auflösungsvermögen unter Beweis.

Wir sehen mit dem Licht verschiedene Formen und vermuten gar nicht, was in diesen Formen für Urformen stecken. Das Elektronenmikroskop zeigt uns diese. Niemand könnte zum Beispiel vermuten, daß die opalisierende Wolke von Zinkoxyd oder das Bild einer schwammigen Masse, welches das Lichtmikroskop uns liefert, Formen von höchster Geometrie enthält. Erst das Elektronenmikroskop zeigt uns an diesem Objekt, daß im mikroskopischen Bau sich die wunderbare Ordnung der Atome auswirkt und eine eigene Formenwelt beherrscht. So ist es mit vielen anderen Objekten. Wenn das Elektronenmikroskop anhand dieser Beispiele uns lehrt, daß die Analogie vom Makroskopischen zum Mikroskopischen sehr fruchtbar, aber auch sehr gefährlich sein kann, dann hat es am Anfang der submikroskopischen Welt seine Aufgabe richtig begonnen.

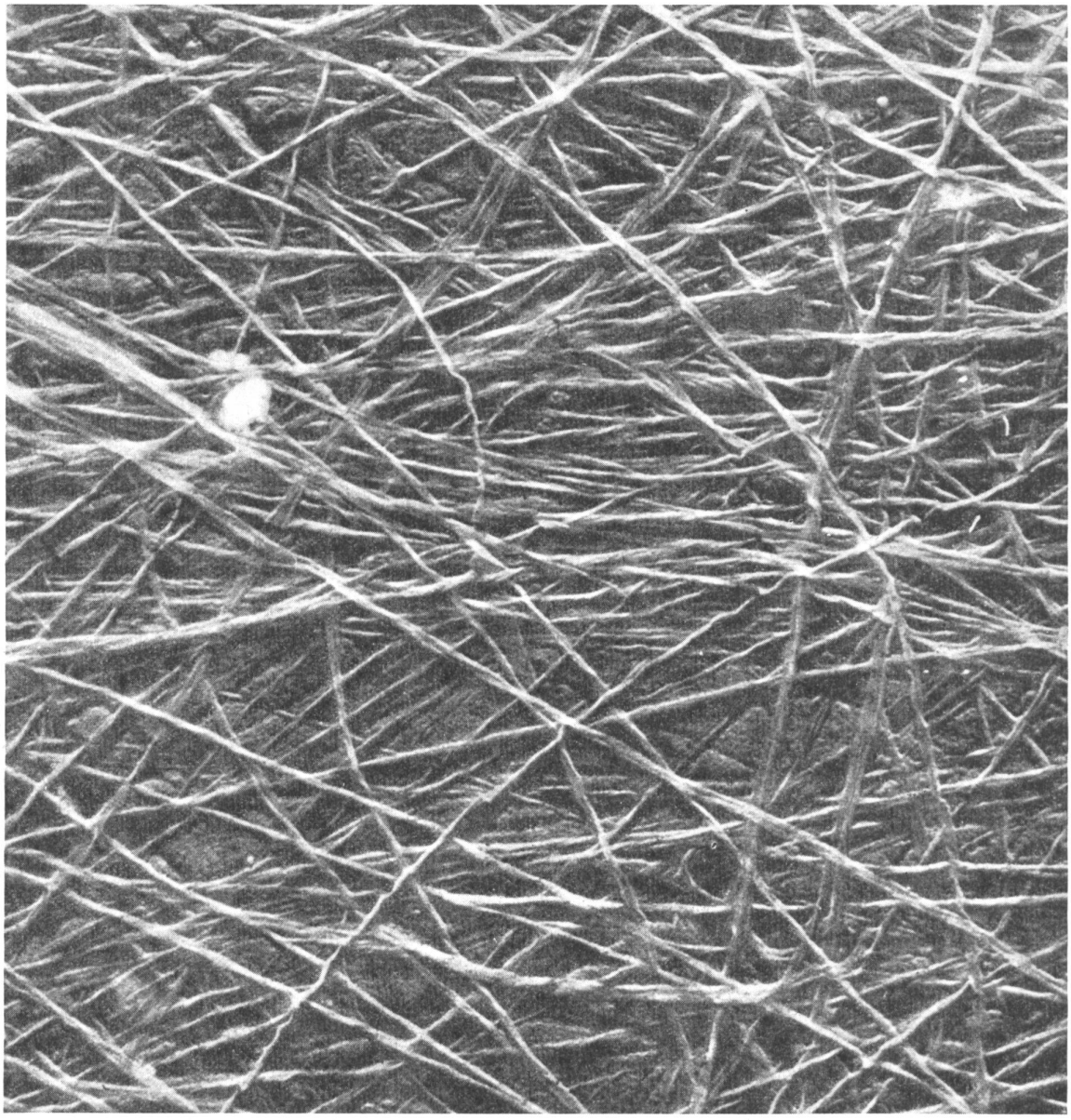


Bild 5: *Aufnahme von Bakterienzellulose, nach einem Präparat, das in den USA. von Dr. H. Mühlethaler hergestellt und in der Schweiz photographiert wurde.*