

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

=====

Diplomarbeit

Durchgang langsamer Elektronen  
bis zu 200 eV  
durch Silberfolien

Die selbständige u. eigenhän-  
dige Anfertigung versichert  
an Eidesstatt

Charlottenburg, den 20.7.1953

*Walter Berger*

Walter Berger  
Matr.Nr. 1973  
Fachr. Physik

I n h a l t

§ 1	Inhaltsübersicht .....	3
§ 2	Problemstellung .....	4

V o r b e r e i t u n g e n

§ 3	Folienherstellung .....	6
§ 4	Die Versuchsanordnung .....	7
§ 5	Vorbereitung der Messungen .....	9
§ 6	Vorbemerkungen zum Meßverfahren .....	10

D u r c h l ä s s i g k e i t   d e r   F o l i e n  
f ü r   l a n g s a m e   E l e k t r o n e n

§ 7	Änderung der Folienstruktur nach Einwirkung von Quecksilberdampf .....	13
§ 8	Ermittlung geeigneter Foliendicken .....	16
§ 9	Elektronenoptische Einflüsse auf das Meßergebnis .....	18
§ 10	Durchlässigkeitsmessungen .....	21
§ 11	Diskussion der Meßfehler .....	22
§ 12	Untersuchung weiterer Folien .....	25
§ 13	Zusammenfassung der Meßergebnisse .....	27

U r s a c h e   d e r  
D u r c h l ä s s i g k e i t

§ 14	Erklärungsmöglichkeiten .....	28
§ 15	Untersuchung der Folien mit dem Elektronenmikroskop .....	29
§ 16	Ermittlung der relativen Lochfläche .....	34
§ 17	Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse .....	35

D i s k u s s i o n  
d e r   E r g e b n i s s e

§ 18	Vergleich mit den Versuchsergebnissen von KATZ .....	36
§ 19	Reproduktion einiger Ergebnisse von KATZ .....	37
§ 20	Mögliche Ursache für die höhere Durchlässigkeit der Folien von KATZ .....	40
§ 21	Folgerungen .....	41
§ 22	Zusammenfassung .....	42
	Literatur .....	44

D u r c h g a n g l a n g s a m e r E l e k t r o n e n

b i s z u 2 0 0 e V

d u r c h S i l b e r f o l i e n

§ 1 Inhaltsübersicht.

In Anlehnung an Arbeiten von KATZ (I;II;III) <sup>+)</sup>  wird die Durchlässigkeit chemisch niedergeschlagener Silberfolien für langsame Elektronen von 0 bis 200 eV untersucht, wobei es gelingt, durch weitgehende Ausschaltung systematischer Fehler zuverlässige, auch an verschiedenen Folien reproduzierbare Meßwerte zu erhalten.

Die Ursache der Durchlässigkeit wird durch Untersuchung der Folien mit dem Elektronenmikroskop ermittelt. Entgegen den bisherigen Anschauungen ergibt sich, daß die durchgelassenen Elektronen nicht durch eine homogene Folienfläche, sondern durch dicht über die gesamte Folie verstreute kleine Löcher von etwa 1000 Å Durchmesser gegangen sind.

Es wird gezeigt, daß wahrscheinlich auch bei den früheren Untersuchungen die gleiche Ursache für die Durchlässigkeit der Folien vorgelegen hat, ohne Elektronenmikroskop aber nicht erkannt werden konnte.

---

<sup>+)</sup>  Die eingeklammerten römischen Ziffern beziehen sich auf das Literaturverzeichnis am Schluß der Arbeit, wird nur auf eine ganz bestimmte Stelle Bezug genommen, so ist die betreffende Seite als arabische Zahl angefügt.

§ 2 Problemstellung.

Treffen Primärelektronen mit einer gewissen Geschwindigkeit auf Materie, so werden in ihr Sekundärelektronen ausgelöst. Für die Aufklärung der physikalischen Vorgänge bei dieser Sekundärelektronenemission ist es wichtig zu wissen, in welcher Tiefe die Sekundärelektronen ausgelöst werden und wie groß die Absorption ist, der sie bis zum Verlassen des Stoffes unterliegen. Kennt man insbesondere die Absorption von langsamen Elektronen in der entsprechenden Substanz, so kann man rückwärts auch schließen auf die Tiefe, aus der die emittierten Elektronen gekommen sind.

Die Absorption erfolgt nach dem Exponentialgesetz

$$(1) \quad N(x_1) = N(x_0) e^{-a(x_1-x_0)}$$

$N(x)$  = Zahl (Intensität) der noch nicht absorbierten Elektronen an der Stelle  $x$

$a$  = Absorptionskoeffizient

wobei der Absorptionskoeffizient  $a$  von der absorbierenden Substanz und auch von der Elektronengeschwindigkeit abhängig ist (VI;136). Zur Bestimmung seiner Größe kann man bei elektrisch leitenden Medien Elektronen homogener Geschwindigkeit senkrecht in eine Folie bekannter Dicke  $d$  eintreten lassen. Es wird dann ein Anteil  $I_a$  in der Folie absorbiert, der Rest  $I_d$  tritt rückseitig aus und wird in einem Faradaykäfing aufgefangen. Einsetzen der erhaltenen Meßwerte in Gleichung (1) ergibt

$$I_d = (I_a + I_d) e^{-ad}$$

und damit für  $a$

$$(2) \quad a = \frac{1}{d} \ln \frac{I_a + I_d}{I_d}$$

$I_a$  = in der Folie absorbierter Stromanteil

$I_d$  = von der Folie durchgelassener Stromanteil

$d$  = Dicke der Folie

Nach der Definition von Lenard (VI;137) wird in diesem Fall der "wahre Absorptionskoeffizient" gemessen, wenn nur solche Elektronen für seine Ermittlung berücksichtigt werden, die ohne Wechselwirkung mit der Materie die Folie durchquert haben.

Solche Durchlässigkeitsmessungen sind mehrfach durchgeführt worden (I;II;III;IV), doch zeigen die veröffentlichten Meßresultate noch sehr große Unterschiede, so daß die Absorptionskoeffizienten für langsame Elektronen nur äußerst ungenau bekannt sind. Die bisher ausführlichsten Untersuchungen stammen von KATZ (I;II;III). Er erhält für chemisch niedergeschlagene Silberfolien <sup>+</sup>) eine unerwartet hohe Durchlässigkeit für Elektronen von 0 bis 200 eV, die von ihm auf eine besondere Kristallstruktur der Folien zurückgeführt wird. Elektronen mit Geschwindigkeiten um 12 eV werden nach KATZ bevorzugt ohne Energie- und Richtungsänderung durchgelassen (Abb.1).

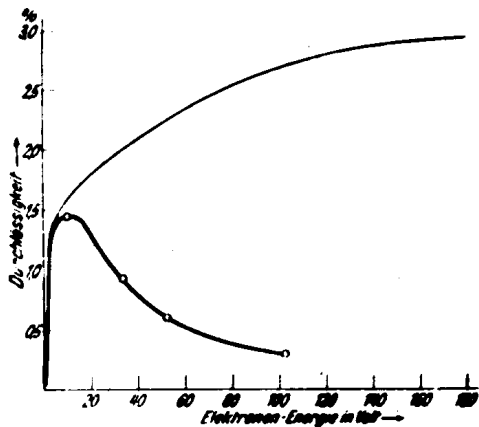


Abb.1 Ergebnis der Durchlässigkeitsmessungen von KATZ an einer 1100 Å dicken Silberfolie.

Abb.6. Insgesamt (—) und ohne Beeinflussung (---) durch die Folie gehende Elektronenmenge

Es ist nun die Aufgabe der vorliegenden Diplomarbeit, die Untersuchungen von KATZ mit verfeinerten Meßmethoden zu wiederholen und das eigenartige Verhalten der chemisch niedergeschlagenen Silberfolien weiter aufzuklären.

<sup>+</sup>) Nach Angaben von KATZ blieben entsprechende Untersuchungen an Aufdampffolien ergebnislos, sie waren zuerst undurchlässig und wurden bei Elektronenbeschuß stets durch Ribildung zerstört (II;167).

## V o r b e r e i t u n g e n

### § 3 Folienherstellung.

Die zu untersuchenden Folien werden nach dem gleichen Verfahren hergestellt, das auch KATZ angegeben hat (II;160). Ein gründlich gereinigtes Becherglas wird nach dem Rezept von BRASHEAR (IX;62) innen versilbert. Dabei wird die Silberlösung in schneller Bewegung gehalten, um einen möglichst gleichmäßigen und fehlerfreien Niederschlag zu erzielen. Ist die gewünschte Foliendicke erreicht - nach einiger Übung ist die vorhandene Dicke in der Durchsicht leicht abzuschätzen - so wird unterbrochen und gut mit destilliertem Wasser gespült.

Die von KATZ angegebene Ablösung der Folien durch einfaches Stehenlassen in destilliertem Wasser gelang hier mit einiger Sicherheit nur bis zu Foliendicken von etwa 700 Å, während Folien von mehr als 900 Å Dicke im allgemeinen auch nach tagelangem Stehen nicht abzulösen waren. Wurde Leitungswasser verwendet, so lösten sich zwar auch die dickeren Folien bald vom Glas ab, doch waren sie dann sehr porös und boten bei Durchleuchtung im Lichtmikroskop einen Anblick wie die Milchstraße am Nachthimmel.

Erst nach einer größeren Anzahl von Versuchsreihen und Mißerfolgen gelang es, auch dickere Folien gleichmäßig und lochfrei abzulösen. Hierzu wird das destillierte Wasser durch eine Spur Salpetersäure (1 Tropfen auf 1 Liter) verunreinigt. Sobald sich die Folie ablösen läßt, im allgemeinen nach etwa 30 min, wird mit Ammoniak neutralisiert und nach weiteren 5 min das Wasser abgegossen. Jeweils ein kleines Stück der Folie wird dann im Alkoholbad (Methanol) von der Glaswand abgezogen und auf einen Folienträger gebracht (Abb.2). Dort trocknet es an der Luft freitragend und festhaftend auf.

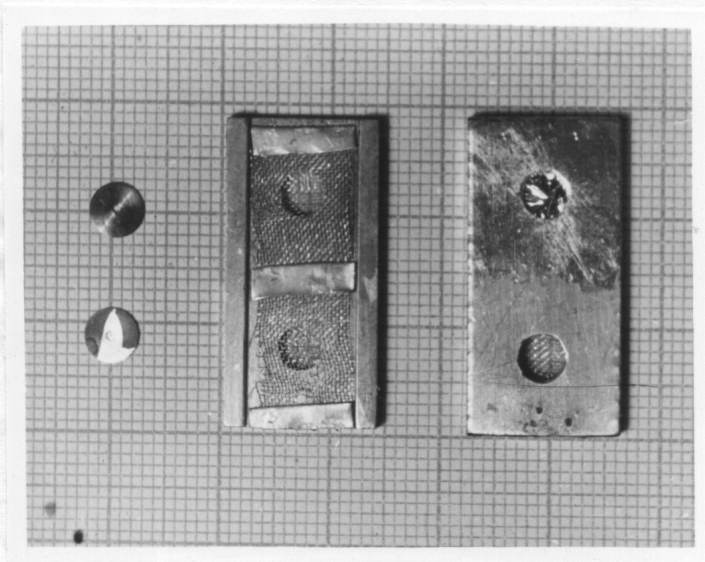


Abb.2 Folienträger mit aufgebracht Folien.

Links (klein, rund) Träger für Elektronenmikroskop, rechts für Versuchsanordnung, Vorder- und Rückansicht.

schwächeren HF-Generator leicht glühen läßt (Es stand nur ein

Der nicht verbrauchte Rest der abgelösten Folie wird durch Schütteln des Alkohols vom Glas entfernt, in einem Porzellanfilter aufgefangen, getrocknet und gewogen. In Verbindung mit der ausgemessenen Folienfläche kann so die Masse der Folie pro Flächeneinheit ermittelt werden, aus der sich unter Voraussetzung homogener Massenverteilung die Foliendicke errechnen läßt.

Die Prüfung der Folien auf Gleichmäßigkeit und Lochfreiheit erfolgt unter dem Mikroskop, sie sind stark lichtabsorbierend, aber noch durchsichtig. Etwa 95 % der aufgebracht Folien zeigen bei dieser Prüfung trotz vorsichtigster Herstellung und Behandlung kleine Einrisse oder andere Fehler und sind deshalb für die Durchlässigkeitsmessungen nicht zu verwenden.

#### § 4 Die Versuchsanordnung.

Die Versuchsanordnung wurde zwar im Prinzip, nicht aber in den Einzelheiten von KATZ (I;171) übernommen.

So wird als Elektronenquelle nicht ein Glühdraht, sondern eine indirekt geheizte Oxydkathode verwendet, weil sie in Verbindung mit dem Wehneltzylinder allein in der Lage ist, einen gut definierten Strahl von Elektronen einheitlicher Geschwindigkeit zu liefern. Außerdem wird die BRÜCHESche Hütchenanode (X;103) zwischen Kathode und Folie geschaltet, um alle irgendwie schief laufenden Elektronen nach Möglichkeit aus dem Strahl auszu-sondern.



Da man nun aber bei langsamen Elektronen nie ganz sicher sein kann, ob sie auch wirklich den gewünschten Strahlengang einhalten, ist der Folienträger nicht starr, sondern verschiebbar angeordnet worden. Auf diese Weise können in Differenzmessungen auch die Elektronen ausgeschieden werden, die trotz aller Vorsichtsmaßnahmen doch noch unter Umgehung der Folie auf den Träger gelangt sind. Der verschiebbare Folienträger hat außerdem auch den Vorteil, daß die Folie jederzeit herausgeschoben und eingehend mit der Lupe betrachtet werden kann.

Als Elektrodenmaterial ist vorwiegend dünnes Molybdänblech verwendet worden, weil dieses Metall sich auch mit einem schwächeren HF-Generator leicht glühen läßt (Es stand nur ein HF-Generator mit der Maximalleistung von 1,5 kW zu Verfügung). Nur der Folienträger wurde aus einem stärkeren Kupferstück angefertigt, um die empfindliche Folie beim Ausglühen vor der Zerstörung zu bewahren.

Die verwendete Versuchsanordnung ist in Abb.3 schematisch dargestellt, Abb.4 zeigt zum Vergleich die Anordnung von KATZ.

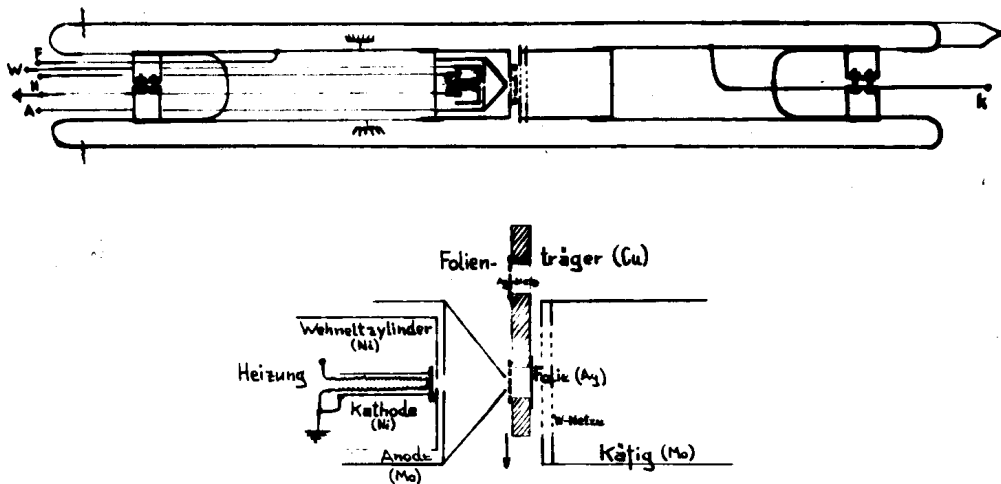


Abb.3 Versuchsanordnung

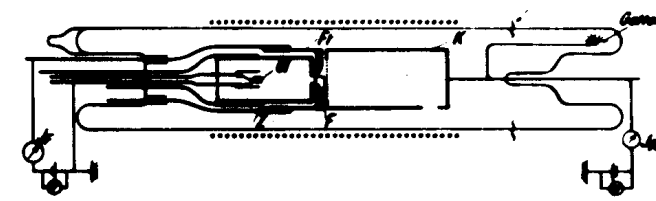


Abb.4 Anordnung von KATZ zum Vergleich

## § 5 Vorbereitung der Messungen.

Zur Vorbereitung einer Folienuntersuchung waren im allgemeinen folgende Arbeitsgänge erforderlich:

1. Die Kathode wird neu mit Oxydpaste versehen.
2. Darauf werden die Elektroden nachjustiert und mit Benzin und Alkohol von etwa vorhandenen Fingerabdrücken befreit.
3. Eine Folie, die nach der Beschreibung von § 3 hergestellt und auf eine der beiden Öffnungen des Folienträgers gebracht ist (Abb.2), wird unter dem Mikroskop nochmals gründlich auf irgendwelche Fehler überprüft.
4. Der Folienträger wird mit der Folie in die dazu vorgesehene Führungsschiene des Folienhalters eingesetzt.
5. Das Versuchsrohr wird zusammengeblasen. Dabei ist die Folie seitlich aus dem Folienhalter herausgeschoben und wird so von Druckänderungen nicht beeinflusst.
6. Das Versuchsrohr wird an die Pumpe angesetzt und bei sofortigem Ansatz von flüssiger Luft vorsichtig evakuiert (Schäden bei Einwirkung von Quecksilberdampf: § 7).
7. Das evakuierte Rohr wird bei laufender Pumpe in einem elektrischen Ofen (Temperatur etwa  $350^{\circ}$  C) je nach Foliendicke 1 bis 3 Stunden ausgeheizt. Längere Heizung zerstört die Folien, wobei die dünnsten Folien am empfindlichsten sind.
8. Nach Entfernung des Ofens werden die Metallteile mehrmals geglüht.
9. Zwischendurch wird die Kathode formiert und ihre Emission geprüft.
10. Das Versuchsrohr wird von der Pumpe abgeschmolzen und leicht gegettert.
11. Nach Abkühlung werden die Elektrodendurchführungen mit Chromschwefelsäure gereinigt, um Kriechströme über den Glassockel zu vermeiden.
12. Vor Beginn der Messungen wird nochmals gegettert und das Vakuum geprüft. Es wird als ausreichend angesehen, wenn sich

auch bei hohen Emissionsströmen keine positiven Ionen nachweisen lassen. Das ist in der Regel 24 Stunden nach dem Abschmelzen der Fall, wenn in der Zwischenzeit die Kathode etwa 12 Stunden normal geheizt wurde.

## § 6 Vorbemerkungen zum Meßverfahren.

Zwischen Oxydkathode, Folie und Auffangkäfig sind Kontaktpotentiale wirksam, die bei den Messungen berücksichtigt werden müssen. Sie werden wie folgt ermittelt:

### 1) Zwischen Kathode und Folie:

Die Anode wird auf etwa 10 V gegen Kathode gelegt, dann wird die Folienspannung von 0 bis 10 V und zurück in kleinen Abständen verändert. Der Foliestrom ist vom Folienspotential null ausgehend zunächst unmeßbar, steigt bei etwa 1,5 V plötzlich steil an und ändert sich dann nur noch wenig. Die zu dem steilen Anstieg gehörende Folienspannung kennzeichnet das vorhandene Kontaktpotential zwischen Kathode und Folie.

### 2) Zwischen Kathode und Käfig:

Wie bei 1), nur wird der Folienträger (Öffnung ohne Folie) auf Anodenpotential geschaltet und die Käfigspannung variiert.

Da die so ermittelten Kennlinien sich bei Änderung der Heizung - nicht bei Änderung des Wehnelt- oder Anodenpotentials - verschieben, muß der Heizstrom während der Messungen konstant bleiben.

Bei den Durchlässigkeitsmessungen ist es weiterhin notwendig, die Elektronen von der Auswertung auszuschließen, die auf den Folienträger und nicht die Folie gelangen, denn dieser Anteil würde ebenso wie die wirklich in der Folie absorbierten Elektronen über das Meßinstrument abfließen und so die Messungen verfälschen.

Der stark mit Silber bedampfte Folienträger (Abb.2 und 3) ist 2 mm dick. Die Elektronen treffen von der Anode kommend auf ein Silbernetz (bei einem vorher verwendeten Wolfram-Gitter

störte die Kontaktpotentialdifferenz zur Silberfolie) und treten dann in einen feldfreien Kanal von 4 mm  $\emptyset$  ein. Dabei wird ein Teil bereits von Netz und Träger aufgefangen. Der Rest erreicht die Folie und bildet den eigentlichen Folienstrom  $I_F$ , der für die Ermittlung der Foliendurchlässigkeit zugrunde-zulegen ist.

Befindet sich auf dem Träger keine Folie, so wird an den Potentialverhältnissen im Trägerkanal dann nichts geändert, wenn Träger und Auffangkäfig gleiches Potential haben. Nur werden nun alle die Elektronen, die sonst auf die Folie getroffen wären, ungehindert weiterfliegen und so in den Käfig gelangen. Dort aber können sie gemessen werden. Das Verhältnis

$$(3) \quad D^{\circ} = \frac{I_F}{I_F + I_T}$$

$I_F$  = der Stromanteil, der die Folie erreicht bzw. bei fehlender Folie in den Käfig gelangt = Folienstrom

$I_T$  = der vom Folienträger aufgefangene Anteil des Gesamtstromes

ist dann die Leerdurchlässigkeit des Folienträgers.

Entsprechend ist die Durchlässigkeit einer Folie

$$(4) \quad D = \frac{I_d}{I_a + I_d} = \frac{I_d}{I_F}$$

$I_a$  = in der Folie absorbiertes Stromanteil

$I_d$  = von der Folie durchgelassener Stromanteil

$I_a + I_d = I_F$  = Folienstrom

Der von der Folie durchgelassene Stromanteil  $I_d$  wird im Auffangkäfig gemessen. Dagegen ist der in der Folie absorbierte Anteil  $I_a$  der direkten Messung nicht zugänglich, sondern immer um den vom Träger aufgenommenen Anteil  $I_T$  des Gesamtstromes vergrößert. Bezeichnet man diesen verfälschten Meßwert mit  $\tilde{I}_a$ , so ergibt sich aus Gleichung (3)

$$I_F = D^{\circ}(I_T + I_F) = D^{\circ}(I_T + I_a + I_d) = D^{\circ}(\tilde{I}_a + I_d)$$

und damit

$$(5) \quad D = \frac{I_d}{D^{\circ}(\tilde{I}_a + I_d)}$$

wobei  $I_d$  und  $\tilde{I}_a$  der Messung zugänglich sind.

Zu Beginn einer Folienuntersuchung wird zunächst für eine gewünschte Potentialverteilung die Leerdurchlässigkeitskurve  $D^0$  aufgenommen. Bei der anschließenden Messung der Foliendurchlässigkeit<sup>+)</sup> müssen dann im Raum zwischen Kathode und Folienträger genau die gleichen elektronenoptischen Verhältnisse wie bei Ermittlung dieser Korrektionskurve vorhanden sein, so daß also jeweils nur das Potential des Auffangkäfigs geändert werden darf.

Liegt insbesondere der Auffangkäfig nur wenige Volt über Kathodenpotential, so können ihn nur noch die Elektronen erreichen, die ohne Energie- oder Richtungsänderung die Folie durchquert haben. Nach KATZ (I;184) wird die auf diese Weise gemessene Durchlässigkeit freie Durchlässigkeit ( $D_f$ ) genannt.

Ist dagegen das Potential des Auffangkäfigs so hoch (etwa 20 V über Folienpotential), daß alle Elektronen zum Käfig abgesaugt werden, die rückseitig aus der Folie austreten, so wird nach der Bezeichnungsweise von KATZ, die auch hier beibehalten werden soll, die Gesamtdurchlässigkeit der Folie gemessen.

Bei Variation des Käfigpotentials zwischen diesen beiden Randwerten wird eine Gegenspannungskurve aufgenommen, die über die Geschwindigkeitsverteilung der durch die Folie gegangenen Elektronen Aufschluß gibt.

Es sei aber schon jetzt darauf hingewiesen, daß die "Gesamtdurchlässigkeit" auch Sekundärelektronen enthält, die erst in der Folie ausgelöst und somit streng genommen nicht durchgelassen worden sind. Für die Ermittlung des Absorptionskoeffizienten ist deshalb die freie Durchlässigkeit einzusetzen.

+ ) Bei der Messung von Leer- und Foliendurchlässigkeit werden Folienströme in der Größenordnung  $I_F = 10^{-7}$  A verwendet.

Durchlässigkeit der Folien  
für langsame Elektronen

§ 7 Änderung der Folienstruktur nach Einwirkung  
von Quecksilberdampf.

Die ersten Durchlässigkeitsmessungen an der 950 Å dicken Silberfolie o471 +) werden nur in einem Geschwindigkeitsbereich bis zu 30 eV durchgeführt, weil infolge der noch vorhandenen Unvollkommenheiten bei höheren Spannungsdifferenzen zu hohe Kriechströme auftreten. Trotzdem hat die Untersuchung dieser Folie zwei wichtige Ergebnisse:

- 1) Bei Abnahme der Elektronengeschwindigkeit gegen null ist kein entsprechender Abfall der Gesamtdurchlässigkeit festzustellen, so lange überhaupt Elektronen die Folie erreichen, geht auch **ein** fast konstant bleibender Anteil von etwa 3 % hindurch.
- 2) Nach Abschluß der Messungen zeigt die aus dem Versuchsrohr genommene Folie eine völlig andere Struktur; während sie vorher bis auf geringe Verunreinigungen der Oberfläche homogen und überall gleichdick erschien (Abb.5), hat es jetzt den Anschein, als ob sich die Materie auf einer sehr dünnen Unterschicht schrumpfend zusammengezogen hätte (Abb.6 bis 8). Stellenweise ist auch die bei dünnen Schichten häufig auftretende Bildung von Ringzonen zu beobachten.

---

+ ) Bei der Folienkennzeichnung geben die ersten drei Ziffern die Herstellungsnummer an, Folien mit gleicher Herstellungsnummer sind zusammen im selben Becherglas niedergeschlagen worden. Die letzte Ziffer unterscheidet die einzelnen Folien gleicher Herkunft.

Beispiel: o471 ----> 47. Niederschlag, 1. Folie.

Da die nach 2) beobachtete Strukturänderung der Folie jede  
Diskontinuität und damit auch alle Durchlässigkeitsmessungen

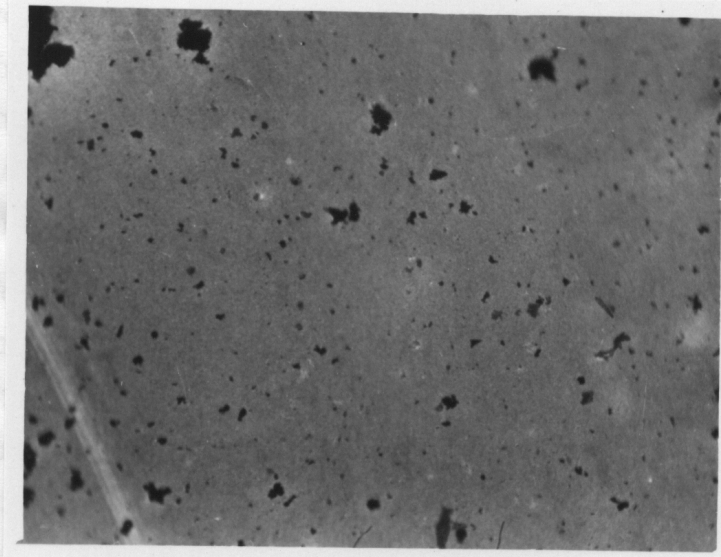


Abb.5 Folie 0471 vor den Durchlässigkeitsmessungen (Oberflächenverunreinigungen können bei später untersuchten Folien vermieden werden).

180:1

empfindlicher.

Abb.9 Folie 0577

Abb.6 Folie 0471 nach den Durchlässigkeitsmessungen. 180:1

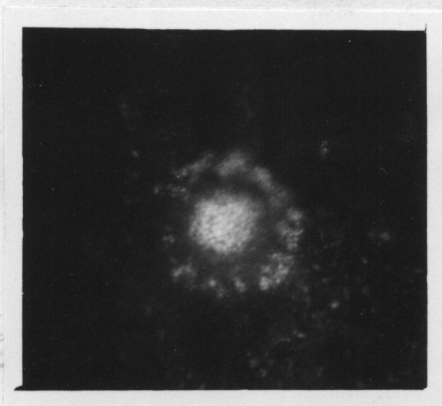


Abb.7

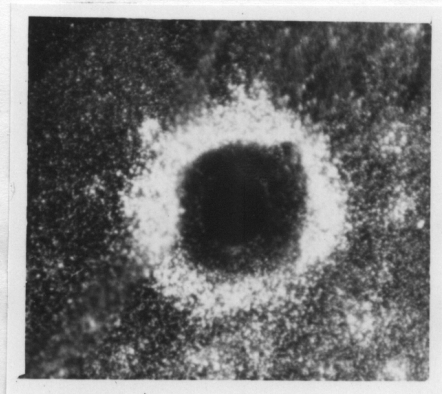


Abb.8

Ringzonen der Folie 0471 nach den Durchlässigkeitsmessungen.

450:1

Da die nach 2) beobachtete Strukturänderung der Folie jede Dickenangabe und damit auch alle Durchlässigkeitsmessungen völlig unzuverlässig macht, ist es notwendig, vor weiteren Untersuchungen die Ursachen dieser Umwandlung festzustellen. Zunächst wird vermutet, daß sich die Folienstruktur bei Ausheizung oder Elektronenbeschuß ändert. Das wird aber durch entsprechende Versuche widerlegt.

Weitere Versuchsreihen ergeben schließlich, daß die Strukturänderung der Folien schon durch eine unerwartet kurzzeitige Einwirkung von Quecksilberdampf hervorgerufen wird. So ist z. Bsp. bei einer 1000 Å dicken Folie schon eine 30 min dauernde Einwirkung mikroskopisch deutlich erkennbar, nach etwa 5 Std. ist die Folie völlig zerstört. Dünnere Folien sind noch empfindlicher.

Abb.9 Folie o577  
 $d = 900 \text{ \AA}$   
2 Std. Hg-Dampf-Einwirkung  
180:1

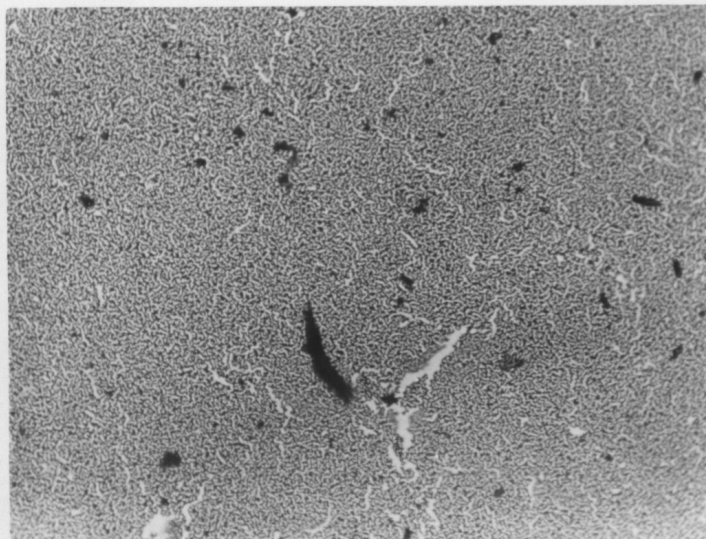
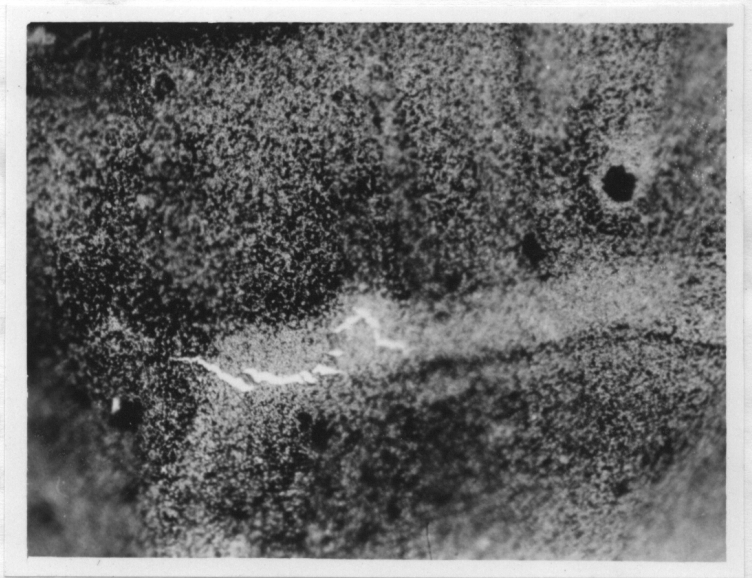


Abb.10 Folie o582  
 $d = 900 \text{ \AA}$   
4 Std. Hg-Dampf-Einwirkung. 180:1



Abb.11 Folie o773

$d = 650 \text{ \AA}$

4 Std. Hg-Dampf-Einwirkung

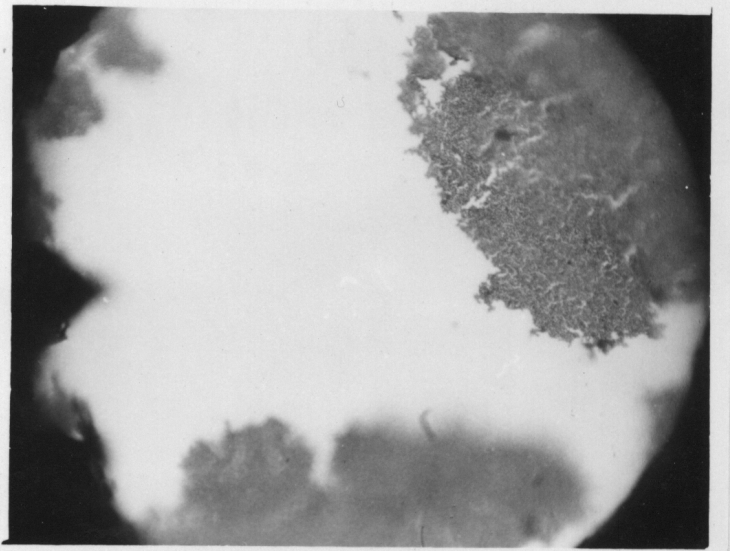
wird zoh 120:1 Ausnutzung d

des Falschstromes auf einen

jedoch führen schon sehr ge

Versuchrohr und Spule, wie

des Folienträgers nicht ver



Die Abb. 9 bis 11 zeigen Folien nach kürzerer oder längerer Einwirkung von Quecksilberdampf bis zu ihrer Zerstörung.

Bei Magnetfeldfokussierung wird ein Abfall der Durchlässigkeit für kleine Elektronengeschwindigkeiten beobachtet.

#### § 8 Ermittlung geeigneter Foliendicken.

Die anschließend untersuchte Folie o563 wird ebenso wie alle folgenden vor der Einwirkung von Quecksilberdampf bewahrt, sie ist  $1000 \text{ \AA}$  dick und hat eine freie Durchlässigkeit von nur etwa  $0,15 \%$  gegenüber  $3 \%$  bei der ersten Folie o471 und  $8 \%$  bei einer gleichdicken Folie von KATZ (I;173) für  $10 \text{ eV}$ -Elektronen. Bei dieser geringen Durchlässigkeit machen sich Verfälschungen durch vagabundierende Elektronen bemerkbar, die in einem engen Bereich und bei ungünstiger Potentialverteilung bis zu  $0,1 \%$  des Folienstromes ( $I_F$ , § 6) betragen können.

Zur Abhilfe wird versucht, die Folie nach den Angaben von KATZ (I;177) durch kräftiges Elektronenbombardement durchlässiger zu machen, doch bleiben diese Versuche bis zur Zerstörung der Folie (Rißbildung) ohne Erfolg.

Als einziges Ergebnis ist auch bei dieser Folie kein Abfall der Durchlässigkeit bei sehr kleinen Elektronengeschwindigkeiten festzustellen, obwohl in diesem Bereich Verfälschungen nicht auftreten.

Die nächste Folie o631 ist ebenfalls 1000 Å dick und hat ebenso wie o563 eine freie Durchlässigkeit von nur 0,15 % für Elektronen von 10 eV. Nach Vermeidung der durch Quecksilberdampf hervorgerufenen Strukturänderungen sind also die hier hergestellten Folien bei gleicher Dicke anscheinend allgemein weniger durchlässig als die von KATZ.

Durch Magnetfeldfokussierung mit einer langen Spule (I;172) wird zehnfache Ausnutzung der Gesamtemission und Herabsetzung des Falschstromes auf einen vernachlässigbaren Wert erreicht, jedoch führen schon sehr geringe Lageänderungen zwischen Versuchsrohr und Spule, wie sie sich z.Bsp. bei Verschiebung des Folienträgers nicht vermeiden lassen, schon zu großen Änderungen der Meßwerte, so daß die gemessenen Durchlässigkeitskurven nicht ausreichend reproduzierbar sind.

Bei Magnetfeldfokussierung wird ein Abfall der Durchlässigkeit für kleine Elektronengeschwindigkeiten beobachtet.

Es ist nun die Frage zu klären, ob zur Vermeidung der aufgetretenen Fehler eine Verbesserung der Meßanordnung oder aber eine Vergrößerung der Foliendurchlässigkeit angestrebt werden soll. Eine Änderung der Versuchsanordnung verursacht Kosten und Zeitverlust. Deshalb wird zunächst versucht, die Foliendurchlässigkeit so zu vergrößern, daß die aufgetretenen geringen Falschströme vernachlässigt werden können.

Der Versuch, die Foliendurchlässigkeit durch Elektronenbombardement zu vergrößern, war erfolglos geblieben. Dieser Weg ist aber auch schon deshalb nicht ratsam, weil auch bei Erfolg die Folie zumindest nicht mehr in dem ursprünglichen Zustand vorliegt.

Da die Absorption der Elektronen in der Folie nach einem Exponentialgesetz verläuft, kann die Durchlässigkeit auch durch Verringerung der Foliendicke beträchtlich vergrößert werden, es muß nur gelingen, genügend dünne Folien herzustellen. Für den Absorptionskoeffizienten  $a$  ergibt sich aus Gl.(2), § 2, und Gl.(4), § 6 ,

$$(6) \quad a = \frac{1}{d} \ln \frac{1}{D}$$

$d$ = Foliendicke
$D$ = Foliendurchlässigkeit (einsetzen ist die freie Durchlässigkeit)

Mit den bisherigen Meßergebnissen  $d = 1000 \text{ \AA}$  und  $D = 0,15 \%$  wird

$$a = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}^{-1}$$

Setzt man diesen Wert ein, so errechnen sich in Abhängigkeit von der Foliendicke  $d$  folgende zu erwartende Durchlässigkeiten:

$a \text{ (\AA)}$	350	500	600	650	800	1000
$D \text{ (\%)}$	10	4	2	1,5	0,55	0,15

Eingehende Untersuchungen ergeben, daß Folien von etwa  $600 \text{ \AA}$  Dicke gerade noch freitragend über eine Öffnung von  $4 \text{ mm } \varnothing$  gespannt werden können. Dünnere Folien reißen während des Auftrocknens meist am Rand, manchmal aber auch auf der freien Fläche, weil sich die Foliensfläche beim Trocknen etwas verkleinert. Die zunächst etwas durchhängenden Folien werden dabei straff gespannt und reißen, wenn sie nicht eine genügende Festigkeit besitzen. Sie werden also nicht durch ihr eigenes Gewicht oder durch das der zunächst anhaftenden Flüssigkeit zerstört.

### § 9 Elektronenoptische Einflüsse auf das Meßergebnis.

Nach diesen mehr vorbereitenden Untersuchungen können die eigentlichen Durchlässigkeitsmessungen begonnen werden. Es gelingt, eine  $600 \text{ \AA}$  dicke Folie fehlerfrei herzustellen und, wie die spätere Betrachtung unter dem Mikroskop ergibt, bis zum Abschluß der Messungen auch unversehrt zu erhalten.

Diese Folie 0681 zeigt bei einer ersten Überprüfung in Übereinstimmung mit der vorher durchgeführten Rechnung die erwartete höhere Durchlässigkeit von etwa  $2 \%$ , so daß also jetzt die bisher aufgetretenen Fehler (maximal  $0,1 \%$  des Foliensstromes, § 8) vernachlässigt werden können, wenn die Saugspannung zwischen Folie und Käfig niedrig gehalten wird.

KATZ hatte die Durchlässigkeitsmessungen so durchgeführt, daß er der Anode ein Potential um  $12 \text{ V}$  gab und nur die Folienspannung variierte (I;172). Deshalb wurde zunächst auch hier versucht, die Durchlässigkeit nach diesem Prinzip zu bestimmen. Hätte sich dann bei Änderung des Anodenpotentials zwar eine andere Leerdurchlässigkeitskurve, jedoch die gleiche (korrigierte)

Foliendurchlässigkeit ergeben, so hätten die Messungen als einwandfrei angesehen werden können. Das war jedoch nicht der Fall.

Die verwendete Versuchsanordnung stellt ein komplizierteres elektronenoptisches System dar. Bleibt das Anodenpotential konstant, so ändern sich bei Variation der Folienspannung die elektronenoptischen Verhältnisse im Raum vor dem Folienträger und die Leerdurchlässigkeitskurve zeigt ausgesprochene Maxima und Minima. Aber auch die Foliendurchlässigkeitskurve wird stark von der jeweiligen Elektronenoptik abhängig, die Kurven sind zwar recht gut reproduzierbar, weichen aber bei Variation der Potentialverteilung stark voneinander ab und können deshalb keine reale Bedeutung haben.

Die Kurven 2), 3) und 4) in Abb.12 zeigen den Verlauf der so gemessenen Folien- und der zugehörigen Leerdurchlässigkeit bei verschiedenen Potentialverteilungen. Anscheinend tritt infolge Änderung des Durchgriffs durch das Netz des Folienträgers bei Einbringen der Folie eine Verschiebung der Leerdurchlässigkeitskurve ein, so daß die Messungen verfälscht werden. Außerdem kann es sich auch unterschiedlich auswirken, ob die auftreffenden Elektronen die gesamte Folie gleichmäßig überstreuen oder aber auf einen Punkt konzentriert sind.

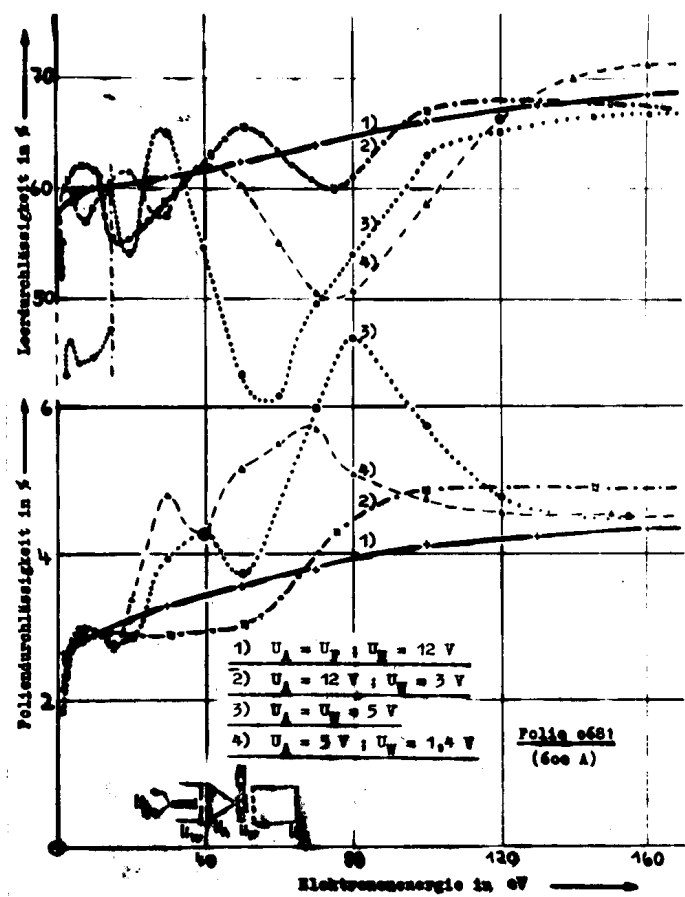


Abb.12 Elektronenoptische Einflüsse auf das Meßergebnis.

Ist auch der Raum vor dem Folienträger feldfrei, so behalten die angenähert parallel aus der Hütchenanode tretenden Elektronen diese Bewegung bis zur Folie bei. Dort treffen sie in etwa gleichmäßiger Verteilung auf eine größere Folienfläche, und zwar unabhängig von der Elektronengeschwindigkeit. Dies zeigt sich in dem horizontalen Verlauf der Leerdurchlässigkeitskurve 1) in Abb.12.

Auch die zu 1) gehörende Foliendurchlässigkeit verhält sich vernünftig, doch ist sie nicht als fehlerfrei anzusehen, denn die auftreffenden Elektronen lösen an der Eintrittsseite Sekundärelektronen aus, die sich von der Folie wegbewegen und zum Teil den Trägerkanal durch das Drahtnetz verlassen. Befindet sich nun vor dem Folienträger ein feldfreier Raum, so können Sekundärelektronen zur Anode gelangen und auf diese Weise der Messung verlorengelassen. Um das zu vermeiden, muß eine Saugspannung zwischen Anode und Folie bestehen, die so groß ist, daß einerseits fast alle Sekundärelektronen zur Folie zurückgetrieben werden, andererseits aber eine elektronenoptisch bedingte Verfälschung der Messungen noch vermieden wird.

Nun zeigen die Gegenspannungskurven (Abb.14), daß bei fast allen rückseitig austretenden Sekundärelektronen die Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Folie kleiner als 5 eV ist. Dann ist aber auch für die an der Einfallsseite ausgelösten Sekundärelektronen eine ähnliche Geschwindigkeitsverteilung zu erwarten. Zur Sicherheit wird jedoch zwischen Anode und Folie eine Spannungsdifferenz von mindestens 8 V gelegt.

§ 10 Durchlässigkeitsmessungen.

Gemessen wird zunächst im feldfreien Raum. Die so ermittelten Durchlässigkeitskurven werden Leitkurven genannt. Dann wird eine Spannungsdifferenz von 8 V zwischen Anode und Folie gelegt und erneut gemessen. Ergäben sich nun Abweichungen von dem stetigen Verlauf der Leitkurven (z.Bsp. wie vorher Abb.12), so müßten elektronenoptische Verfälschungen vermutet werden. Solche Abweichungen treten aber nicht mehr auf.

Bei Elektronengeschwindigkeiten unter 8 eV kann diese Methode nicht angewandt werden, weil die Mitchenanode dann negativ gegenüber Kathode ist und infolgedessen keine Elektronen mehr durchläßt. Nun wird aber in diesem Bereich auch die Sekundärelektronenemission sehr gering, so daß schon bei etwa 12 eV die beiden Durchlässigkeitskurven nahe zusammenfallen.

Alle Meßwerte sind sehr gut reproduzierbar, zu verschiedenen Zeiten und auch bei verschiedenen Intensitäten gemessene Kurven stimmen fast genau überein. Es muß aber noch geprüft werden, ob wirklich alle Fehler vermieden worden sind. Das soll in einer kritischen Betrachtung der Meßergebnisse geschehen.

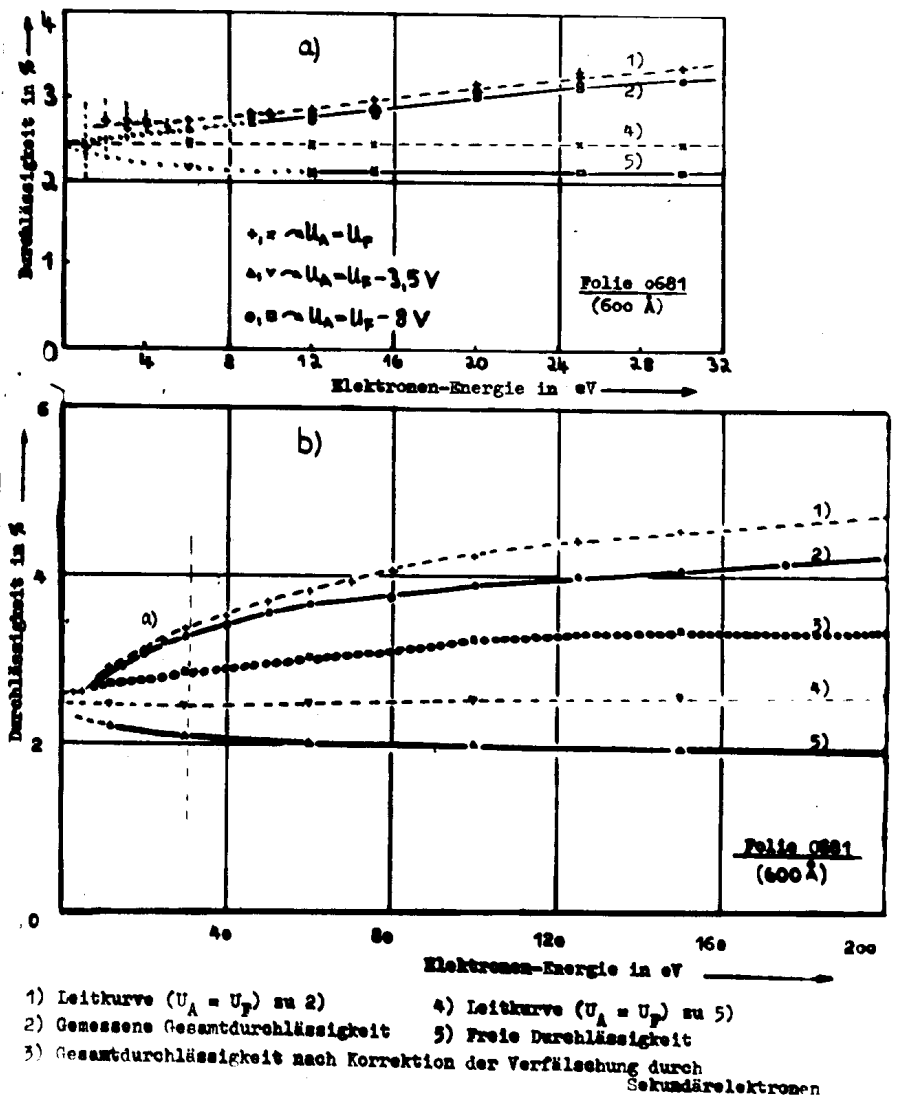


Abb.13 Durchlässigkeit der Folie o681

§ 11 Diskussion der Meßfehler.

Wie bereits in § 9 ausgeführt, ist der Fehler der Leitkurven (Abb.13, Kurven 1) und 4) dadurch gegeben, daß Sekundärelektronen von der Folie zur Anode gelangen. Dadurch wird der in der Folie absorbierte Stromanteil zu klein und die Durchlässigkeit zu groß ermittelt.

In der Gesamtdurchlässigkeit (Def. § 6)(Abb.13, Kurve 2) ist dieser Fehler nicht mehr enthalten. Auch eine elektronenoptische Verfälschung kann auf Grund eines Vergleichs mit der Leitkurve ausgeschlossen werden. Möglich und wahrscheinlich ist aber eine Verfälschung durch eintrittsseitig ausgelöste Sekundärelektronen, die sich zunächst von der Folie weg, dann in dem rüktreibenden Feld zwischen Anode und Folie zu ihr zurück bewegt haben und dabei zu dem ihrer Geschwindigkeit entsprechenden Prozentsatz durchgelassen worden sein können. Da der Sekundäremissionskoeffizient der Metalloberfläche in dem untersuchten Geschwindigkeitsbereich von der Größenordnung 1 ist, kann eine solche Verfälschung recht erheblich sein.

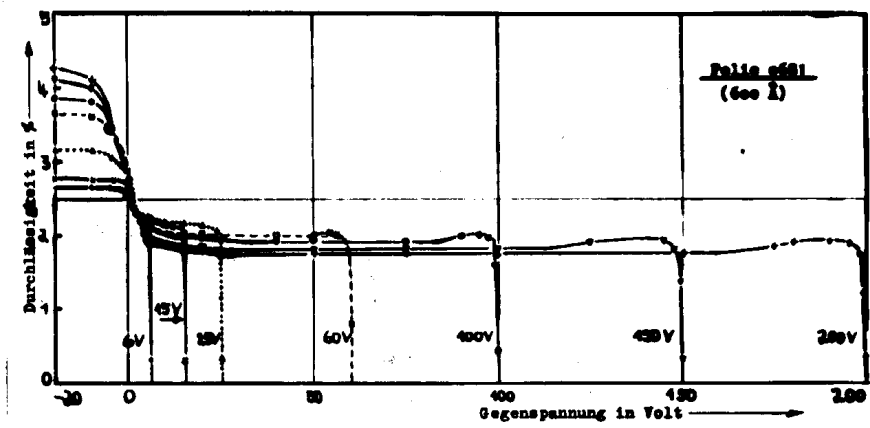


Abb.14  
Gegenspannungskurven  
für Folie 0681

Auch die Gegenspannungskurven (Abb.14) sind nicht fehlerfrei. Bei größeren Elektronengeschwindigkeiten lösen die unbeeinflußt durch die Folie gegangenen Elektronen im Auffangkäfig Sekundärelektronen aus, von denen einige aus dem Käfig und im Gegenfeld zur Folie gelangen können. Diese Verfälschung tritt aber nur in einem mittleren Bereich auf, weil bei höherer Gegenspannung die Restenergie der Primärelektronen nicht mehr zur Sekundärelektronenablösung ausreicht. Das Maximum der Durchlässigkeit kurz vor Erreichen der vollen Gegenspannung ist also nicht mit einem Fehler behaftet.

Damit ist aber auch die aus diesen Werten ermittelte freie Durchlässigkeit (Abb.13, Kurve 5) als fehlerfrei zu betrachten. Gibt man jedoch nach dem Vorgang von KATZ (I;175) die Gegen-  
spannungskurven relativ, d.h. jeweils bezogen auf den zugehörigen Wert der Gesamtdurchlässigkeit an (Abb.34), so sind sie zusätzlich mit einem eventuellen Fehler dieser Größe behaftet.

Die Verfälschung der Gesamtdurchlässigkeit kann man durch eine geeignete Kombination der Meßwerte und ihrer Fehler abschätzen. Dabei sollen folgende Abkürzungen verwendet werden:

- $I_a$  = in der Folie absorbiertes Stromanteil
- $I_d$  = von der Folie durchgelassener Stromanteil
- $I_{dmax}$  = Maximalwert bei Ermittlung der Gesamtdurchlässigkeit
- $I_f = I_a + I_d$  = Folienstrom
- $D = \frac{I_d}{I_a + I_d}$  = Durchlässigkeit der Folie
- $D_f$  = freie Durchlässigkeit
- $D_g$  = Gesamtdurchlässigkeit
- $M = \frac{D_f}{D_g}$  = Durchlässigkeitsverhältnis
- $U_g$  = Gegenspannung am Auffangkäfig
- $\bar{v}$  = mittlere Elektronengeschwindigkeit
- $x, y$  = durch Sekundärelektronen verursachte Meßfehler
- $\overset{\sim}{\phantom{x}}$  bedeutet: Meßwert bezieht sich auf die Leitkurve
- $\overset{\sim}{\sim}$  bedeutet: Meßwert ist mit einem Fehler behaftet

Nach Gl.(4), § 6, ist der korrigierte Wert der Durchlässigkeit gebildet aus

$$D = \frac{I_d}{I_a + I_d} = \frac{I_d}{I_f}$$

Die dort durchgeführte Korrektur bezieht sich jedoch nur auf den Stromanteil, der vom Folienträger aufgenommen wird und die Folie nicht erreicht. Eventuelle Verfälschungen durch Sekundärelektronen sind in der Korrektur noch nicht berücksichtigt und müssen somit gesondert untersucht werden.

Bei der Leitkurve gelangen Sekundärelektronen von der Folie zur Anode, die Meßwerte sind also  $\overset{\sim}{I}_a = I_a - x$  und  $I_d$ . Der Fehler  $x$  ändert sich bei Anlegen einer Gegenspannung an den Käfig nicht. Bildet man also das Verhältnis



$$(7) \quad M^+ = \frac{D_3^+}{D_3^+} = \frac{\frac{I_d(u_0 - \bar{v})}{I_a + I_d - x}}{\frac{I_{d \max}}{I_a + I_d - x}} = \frac{I_d(u_0 - \bar{v})}{I_{d \max}}$$

so erhält man es fehlerfrei.

Bei den eigentlichen Durchlässigkeitskurven dagegen ist die Verfälschung durch Sekundärelektronen komplizierter. Während die freie Durchlässigkeit keinen Fehler enthält, ist in der Gesamtdurchlässigkeit der Fehler  $\gamma$  in beiden Meßwerten enthalten. Von den eintrittsseitig ausgelösten Sekundärelektronen durchquert der Anteil  $\gamma$  die Folie, verkleinert also  $I_a$  und vergrößert  $I_d$ . Bildet man wieder

$$(8) \quad \tilde{M} = \frac{D_3}{\tilde{D}_3} = \frac{\frac{I_d(u_0 - \bar{v})}{I_a + I_d}}{\frac{I_{d \max} + \gamma}{(I_a - \gamma) + (I_d + \gamma)}} = \frac{I_d(u_0 - \bar{v})}{I_{d \max} + \gamma} = \frac{M^+}{1 + \frac{\gamma}{I_{d \max}}}$$

so kann man den Fehler  $\gamma$  eliminieren zu  $\gamma = I_{d \max} \left( \frac{M^+}{\tilde{M}} - 1 \right)$ .

Damit ist aber zunächst wenig gewonnen, weil nicht  $I_{d \max}$ , sondern  $\tilde{I}_{d \max} = I_{d \max} + \gamma$  gemessen wird. In Abhängigkeit von den Meßwerten ergibt sich also über

$$\gamma + \gamma \left( \frac{M^+}{\tilde{M}} - 1 \right) = (I_{d \max} + \gamma) \left( \frac{M^+}{\tilde{M}} - 1 \right) = \tilde{I}_{d \max} \left( \frac{M^+}{\tilde{M}} - 1 \right)$$

$$(9) \quad \gamma = \left( 1 - \frac{\tilde{M}}{M^+} \right) \tilde{I}_{d \max} = \Delta \tilde{I}_{d \max}$$

und daraus der Fehler der Gesamtdurchlässigkeit zufolge

$$\tilde{D}_3 = \frac{\tilde{I}_{d \max}}{\tilde{I}_a + \tilde{I}_d} = \frac{\tilde{I}_{d \max}}{I_a + I_d} = \frac{\tilde{I}_{d \max}}{I_F} \quad \text{und} \quad \frac{\Delta \tilde{D}_3}{\tilde{D}_3} = \frac{\Delta \tilde{I}_{d \max}}{\tilde{I}_{d \max}} = 1 - \frac{\tilde{M}}{M^+} \quad \text{zu}$$

$$(10) \quad \Delta \tilde{D}_3 = \tilde{D}_3 \left( 1 - \frac{\tilde{M}}{M^+} \right)$$

Da es sich um einen systematischen Fehler handelt, ist das Vorzeichen durch den physikalischen Sachverhalt festgelegt.

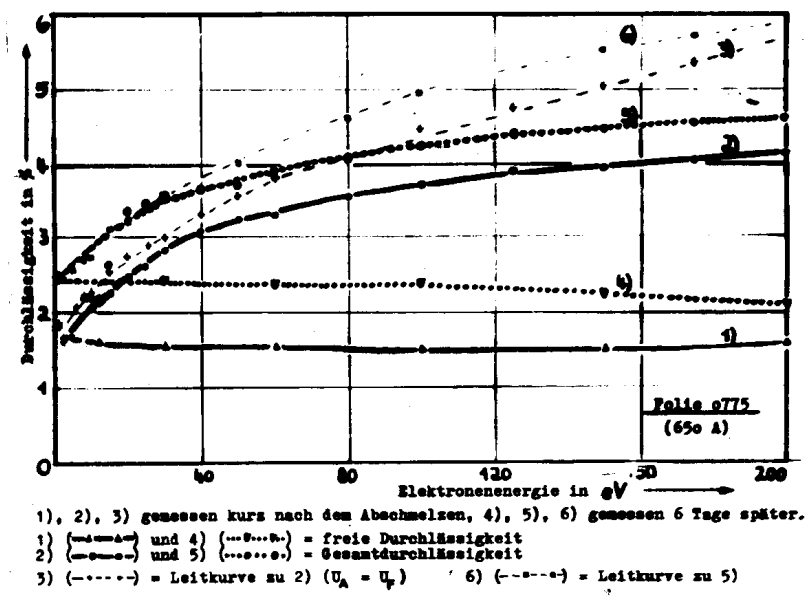
Korrigiert man die Durchlässigkeitskurve 2) (Abb. 13) nach dieser Abschätzung, so erhält man die Kurve 3). Es zeigt sich, daß die Verfälschung der Messungen durch Sekundärelektronen unerwartet hoch ist und deshalb auf keinen Fall vernachlässigt werden darf.

Bei sehr kleinen Elektronengeschwindigkeiten unterhalb 5 eV sind die Meßwerte etwas ungenau, weil bei der verwendeten Meßmethode die zur Verfügung stehenden Intensitäten klein werden. Es ist zwar möglich, durch eine positive Saugspannung am Wehneltzylinder die Emission der Kathode wesentlich zu erhöhen, doch wird dann die Leerdurchlässigkeit sehr gering und unsicher, so daß im Endergebnis eine noch größere Ungenauigkeit zu erwarten ist. In Abb.13 (a) ist die maximale Fehlergrenze der ermittelten Meßwerte durch senkrechte gestrichelte Linien angedeutet.

§ 12 Untersuchung weiterer Folien.

Durchlässigkeitsmessungen an zwei weiteren Folien führen im wesentlichen zu dem gleichen Ergebnis.

Abb.15  
Durchlässigkeit der  
Folie o775

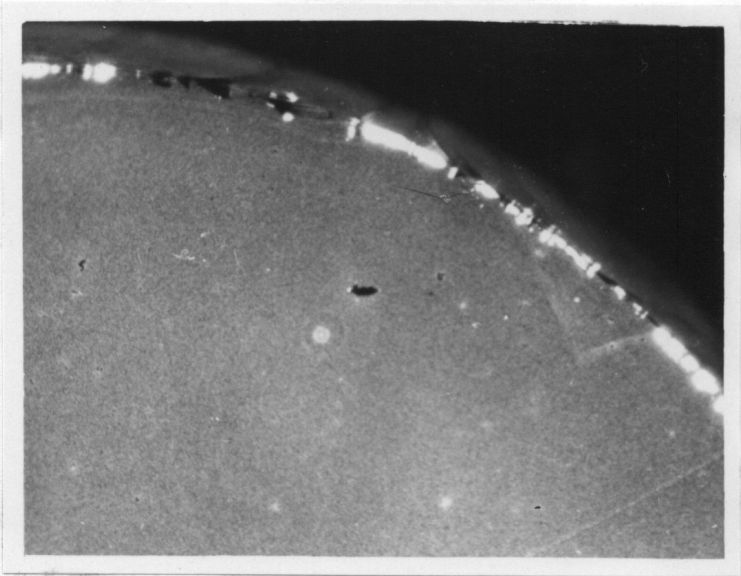


Die 650 Å dicke Folie o775 zeigt bei den ersten Meßreihen im Vergleich zu o681 eine etwas geringere freie Durchlässigkeit (Abb.25, Kurve 1). Ihre Gesamtdurchlässigkeit steigt mit Zunahme der Elektronengeschwindigkeit steiler an, so daß sie oberhalb 50 eV die von o681 übertrifft (Kurve 2). Das könnte auf eine besonders hohe Sekundärelektronenemission zurückzuführen sein.

Die Abweichungen zwischen den Folien sind nicht größer, als sie nach einem bei der U möglichen Dickenunterschied

§ 13 Zusammenfassung

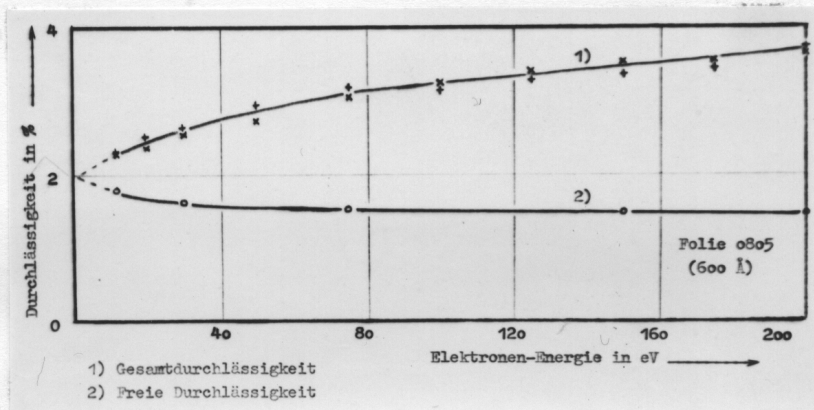
Abb. 16 Berücksichtigung der Randablösung der Folie o775 während der Messungen. 55:1



Kontrollmessungen, die eine Woche später durchgeführt werden, ergeben eine angenähert parallele Verschiebung aller Kurven nach größerer Durchlässigkeit, die für langsamste Elektronen am größten ist (Abb. 15, Kurven 4,5,6). Erklärt wird diese Verschiebung durch eine später festgestellte teilweise Randablösung der Folie (Abb. 16). Langsamste Elektronen streben am meisten auseinander und können deshalb am Rande gelegene Löcher bevorzugt passieren. Elektronen, wogegen die zweite aus sehr

langsamsten Sekundärelektronen besteht. Die freie Durchlässigkeit und die (gemessene) Gesamtdurchlässigkeit der ebenfalls 600 Å dicken Folie o805 sind in Abb. 17 dargestellt. Die Werte liegen nur unwesentlich unter den entsprechenden der Folie o681. Auch die übrigen Durchlässigkeits- und die Gegenspannungskurven zu o805 gleichen im Verlauf völlig denen von o681, so daß auf ihre Darstellung verzichtet werden kann. Elektronengeschwindigkeit ist zwar vorhanden, doch ist

Abb. 17 Durchlässigkeit der Folie o805



Die Abweichungen zwischen den Folien sind nicht größer, als sie nach einem bei der Ungenauigkeit der Dickenbestimmung möglichen Dickenunterschied zu erwarten wären.

### § 13 Zusammenfassung der Meßergebnisse.

Nach Berücksichtigung aller Fehlermöglichkeiten kann das Gesamtergebnis für die Folien 0681, 0775 und 0805 in Übereinstimmung mit früheren Messungen an anderen Folien wie folgt zusammengefaßt werden:

- 1) Auch für kleinste Elektronengeschwindigkeiten bis herab zu 0,5 eV ist kein Abfall der Durchlässigkeit gegen null festzustellen. So lange überhaupt ein Strom zur Folie fließt, geht auch ein fast konstant bleibender Anteil hindurch.
- 2) Die durchgelassenen Elektronen setzen sich im wesentlichen zusammen aus zwei Gruppen: die erste enthält alle frei, also ohne Änderung von Energie oder Bewegungsrichtung durchgelassenen Elektronen, wogegen die zweite aus sehr langsamen Sekundärelektronen besteht.

Elektronen, die in der Folie ihre Bewegungsrichtung geändert oder nur einen Teil ihrer Energie verloren haben, lassen sich nicht nachweisen.

- 3) Die freie Durchlässigkeit bleibt im gesamten Meßbereich nahezu konstant. Ein geringer Abfall mit zunehmender Elektronengeschwindigkeit ist zwar vorhanden, doch ist er bei weitem nicht so stark ausgeprägt, wie er nach den Ergebnissen von KATZ zu erwarten wäre.

U r s a c h e   d e r   D u r c h l ä s s i g k e i t

§ 14 Erklärungsmöglichkeiten.

Es ergibt sich nun die Frage nach Art und Ursache der beobachteten Durchlässigkeit. Da auch für verschieden dicke Folien sich stets der gleiche Wert ergibt, könnte man annehmen, daß der Absorptionskoeffizient für langsame Elektronen in Silber konstant etwa

$$a_S = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}^{-1} = 6,5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$$

beträgt. Trifft das zu, so müssen die Elektronen gleichmäßig durch die gesamte Folienfläche hindurchtreten.

Andererseits könnte man aber aus den Meßergebnissen auch schließen, daß ein gewisser Teil der Folienfläche den Elektronen keinen nennenswerten Widerstand bietet. Das wäre zu realisieren im einfachsten Fall durch Löcher, unter Umständen aber auch durch eine besondere Kristallstruktur der durchlässigen Stellen. Für eine solche Annahme spricht insbesondere auch die Tatsache, daß keine Elektronen nachgewiesen werden können, die in der Folie ihren Bewegungszustand geändert haben, wie es bei normaler Absorption zu erwarten wäre.

Es ist aber schwer einzusehen, aus welchem Grunde durchlässige Flächenanteile nach einem Exponentialgesetz mit der Foliendicke abnehmen sollten. Außerdem spricht auch die gleichmäßige Lochfreiheit der Folie bei Betrachtung unter dem Mikroskop gegen das Vorhandensein von Löchern **oder** durchlässigen Stellen. Sind sie jedoch trotzdem vorhanden, so werden sie die Eigenschaft einer besonderen Durchlässigkeit sicherlich nicht nur für langsame, sondern für Elektronen aller Geschwindigkeiten besitzen. Damit ist nun aber eine Prüfungsmöglichkeit gegeben, die bei früher durchgeführten Folienuntersuchungen nicht bestand.

§ 15 Untersuchung der Folien mit dem Elektronenmikroskop.

Durchstrahlt man eine Folie im Elektronenmikroskop, so kann man beobachten, ob die Elektronen gleichmäßig über die gesamte Foliensfläche verteilt oder aber an gewissen Stellen bevorzugt durch die Folie hindurchtreten. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist eindeutig. Es stellt sich heraus, daß die gesamte Foliensfläche dicht mit kleinen "durchlässigen Stellen" von etwa  $1000 \text{ \AA}$   $\varnothing$  überstreut ist. In etwa gleicher Ausdehnung und Dichte werden außerdem "dünne Stellen" beobachtet, die für die schnellen Elektronen im Mikroskop eine gewisse Durchlässigkeit zeigen. Bei verschiedener Foliendicke ändert sich nur die Zahl, nicht aber die Größe der durchlässigen Stellen.

Im Lichtmikroskop ist diese Struktur der Folien nicht zu erkennen, weil die Einzelheiten kleiner sind als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes. In den folgenden Abbildungen sind licht- und elektronenmikroskopische Aufnahmen gegenübergestellt:

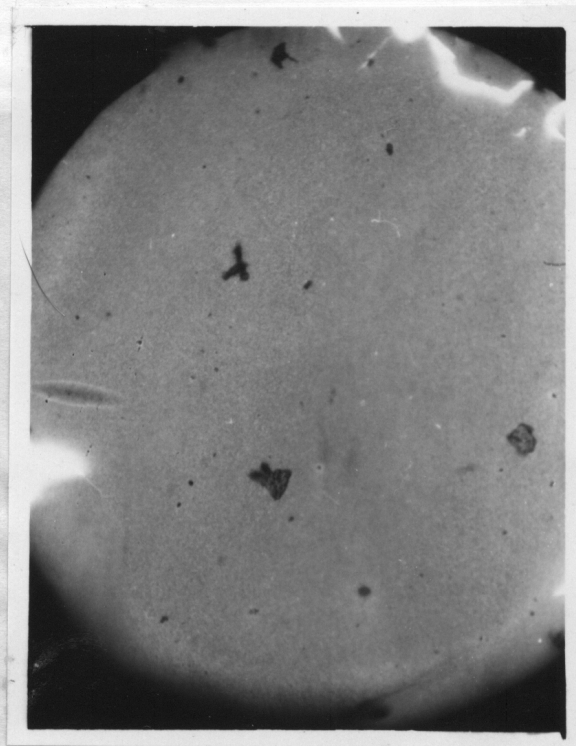
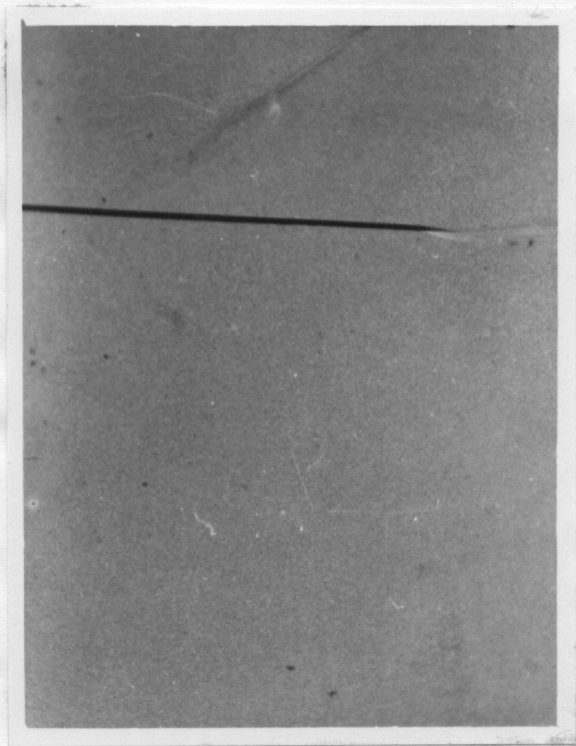


Abb. 18 Folie o805

$d = 600 \text{ \AA}$

Lichtbild 55:1

Abb. 19 Folie o689

$d = 600 \text{ \AA}$

Lichtbild 120:1



Abb.20 Folie 0691,  $d = 500 \text{ \AA}$   
Zur Hälfte Doppellage  
Elektronenbild 4000:1

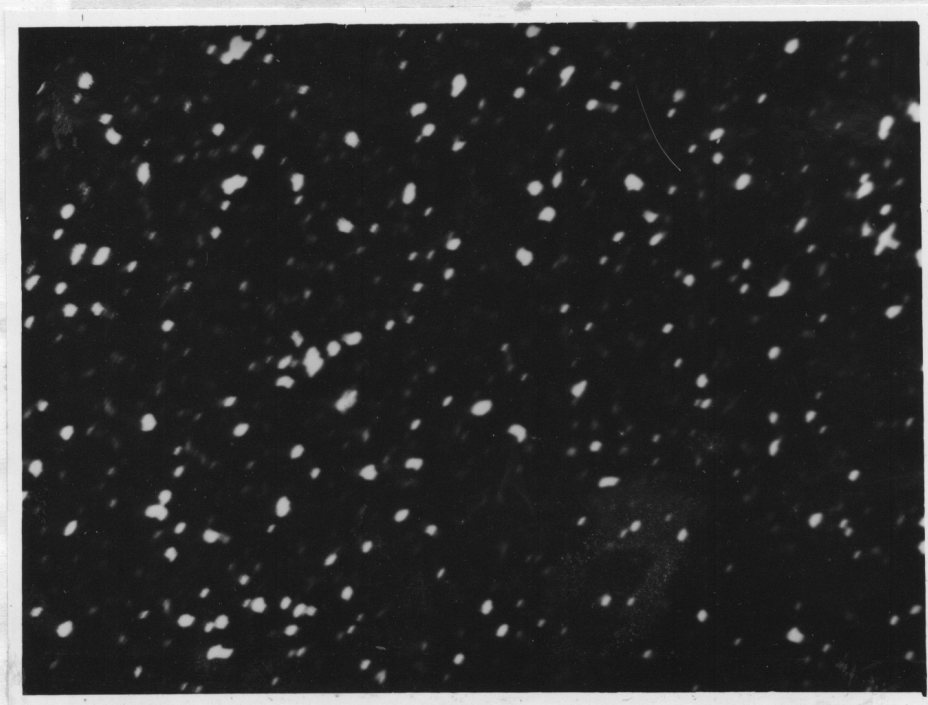


Abb.21 Folie 0691,  $d = 500 \text{ \AA}$   
Elektronenbild 14000:1

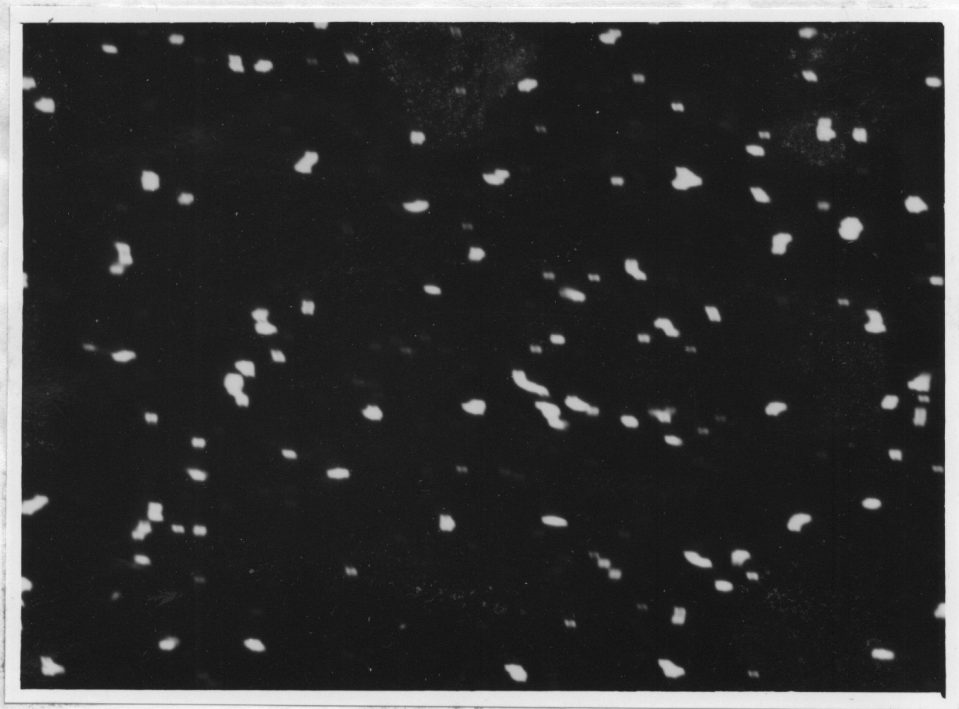


Abb.22 Folie o8o7,  $d = 600 \text{ \AA}$   
Elektronenbild 14000:1

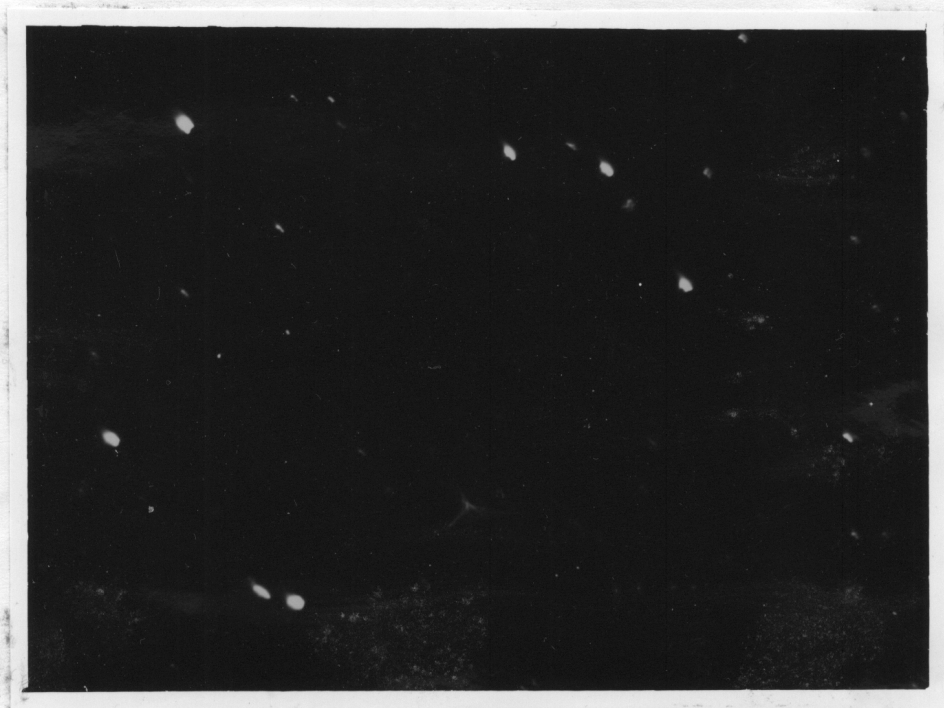


Abb.23 Folie o7o2,  $d = 1050 \text{ \AA}$   
Elektronenbild 14000:1

(Größere Folienstruktur mit zunehmender Dicke)



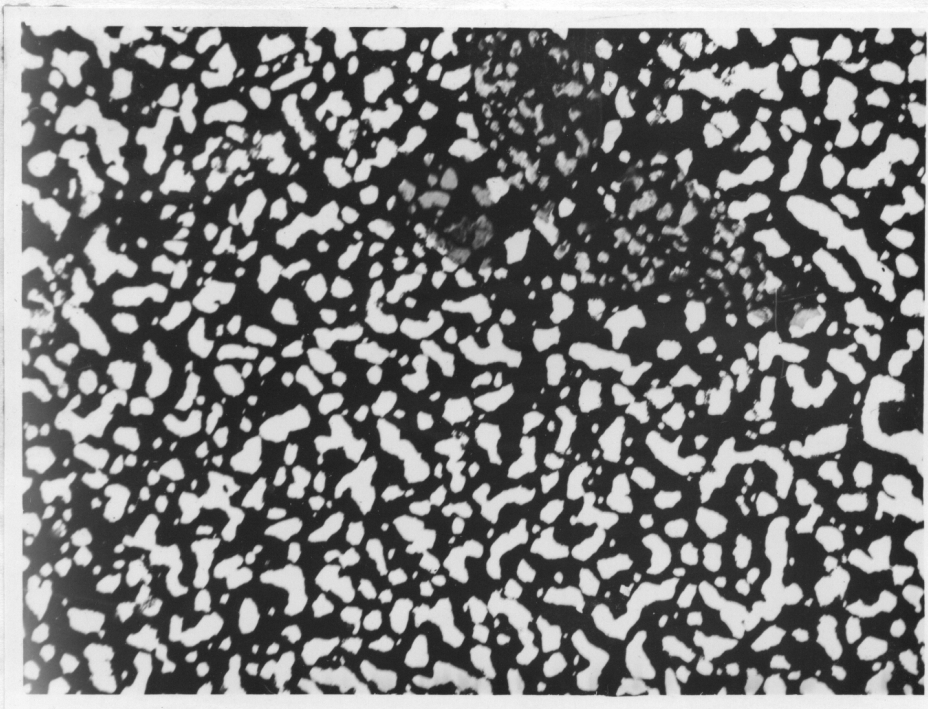


Abb.24 Folie o731,  $d = 550 \text{ \AA}$   
Etwa 3 Std. Hg-Dampf-Einwirkung  
Elektronenbild 4000:1  
(Lichtbild hierzu etwa Abb.10, S.15)

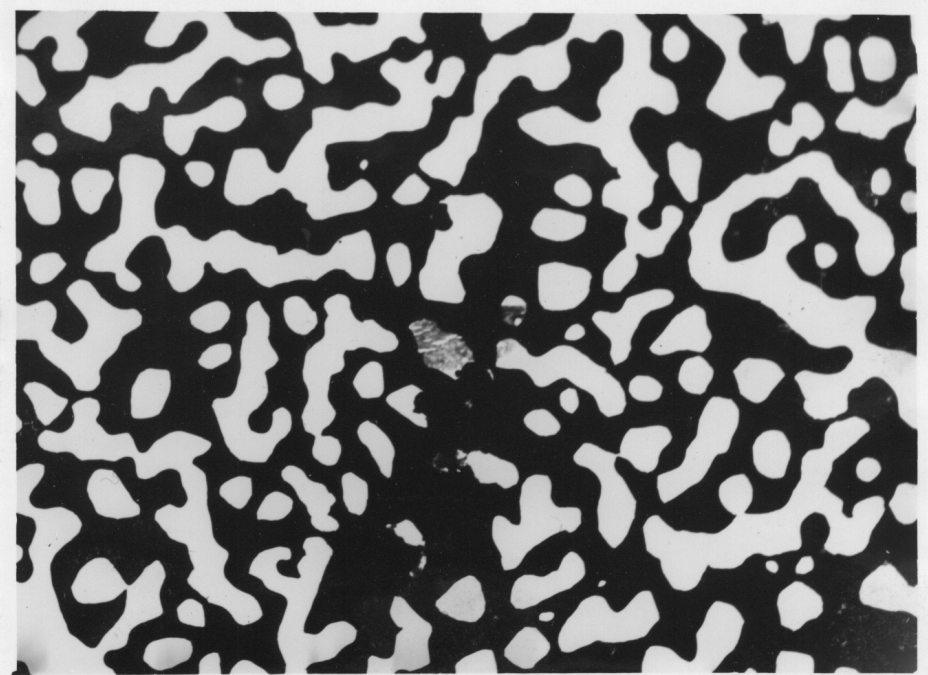


Abb.25 Folie o752,  $d = 700 \text{ \AA}$   
Etwa 4 Std. Hg-Dampf-Einwirkung  
Elektronenbild 4000:1  
(Größere Folienstruktur mit zunehmender Dicke)

Erscheinungsbild für Löcher und "Durchlässige Stellen" ergibt.  
Ein Unregelmäßigkeiten in der flächenhaften Ausdehnung.

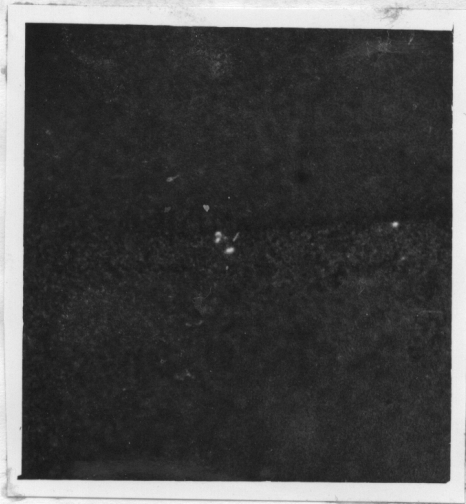


Abb.26 Folie o8o7  
 $d = 600 \text{ \AA}$   
Lichtbild 175:1

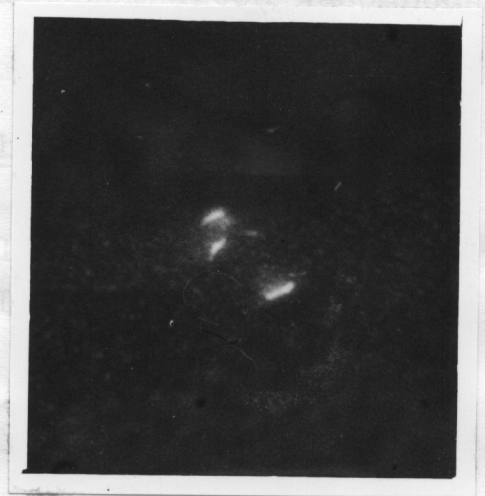


Abb.27 Folie o8o7  
 $d = 600 \text{ \AA}$   
Lichtbild 85o:1

von Löcher Größe wie die freie Durchlässigkeit so wird man  
nur die Löcher für die Durchlässigkeit der Folie verantwortlich  
machen können. Es gibt sie sich dagegen kleiner so wird man auch  
eine Durchlässigkeit der übrigen Foliensfläche, insbesondere der  
"dünneren Stellen" annehmen müssen.

Zur Ermittlung  
mikroskopisch  
maßstab  
einen Licht  
gelegt.  
zählen.  
Natürlich  
wirklich  
anwenden,  
 $80 = \beta$   
die untere  
im Elektro  
benachbart



Abb.28 Folie o8o7,  $d = 600 \text{ \AA}$   
Elektronenbild 4000:1

Auf Grund der sehr gleichmäßigen Verteilung der Löcher über  
Bei den durchlässigen Stellen werden sofort Löcher vermutet.  
Zur Prüfung wird ein Folienstück elektronenmikroskopisch unter-  
sucht, das drei dicht beieinanderliegende im Lichtmikroskop  
deutlich als solche erkennbare Löcher enthält (Abb.26,27,28).  
So ist ein Vergleich möglich, der eindeutig das gleiche

Erscheinungsbild für Löcher und "Durchlässige Stellen" ergibt. Ein Unterschied besteht nur in der flächenhaften Ausdehnung.

§ 16 Ermittlung der relativen Lochfläche.

Löcher sind sicher für Elektronen aller Geschwindigkeiten frei durchlässig. Ist also die relative Lochfläche

$$L = \frac{\text{Lochfläche}}{\text{Gesamtfolienfläche}}$$

von gleicher Größe wie die freie Durchlässigkeit, so wird man nur die Löcher für die Durchlässigkeit der Folie verantwortlich machen können, ergibt sie sich dagegen kleiner, so wird man auch eine Durchlässigkeit der übrigen Folienfläche, insbesondere der "dünnen Stellen" annehmen müssen.

Zur Ermittlung der relativen Lochfläche L wird die elektronenmikroskopische Aufnahme so nachvergrößert, daß der Abbildungsmaßstab etwa 20 000 : 1 ist. Dieses vergrößerte Bild wird auf einen Lichtkasten und darüber durchsichtiges Millimeterpapier gelegt. Dann kann man mit einer Lupe das Verhältnis L auszählen.

Natürlich ist dieses Verfahren nicht exakt. Wollte man es wirklich auf die gesamte untersuchte Folienfläche von 4 mm  $\emptyset$  anwenden, so müßte man eine kreisförmige Aufnahmefläche von 80 m  $\emptyset$  auf diese Weise auswerten. In Wirklichkeit kann aber die untersuchte Folie selbst wegen ihrer Größe überhaupt nicht im Elektronenmikroskop betrachtet werden, sondern immer nur ein benachbartes Folienstück der gleichen Herstellung auf einem besonderen Träger. Außerdem ist auch die Ermittlung der Lochfläche durch Auszählung der Kästchen recht ungenau.

Auf Grund der sehr gleichmäßigen Verteilung der Löcher über die gesamte Folienfläche kann man aber annehmen, daß der ermittelte Wert von L dem tatsächlich vorhandenen Mittelwert recht nahe kommt und zumindest nicht mehr als um ein Drittel abweicht.

§ 17 Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse.

Das Ergebnis der Folienuntersuchungen ist in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt:

Folie Nr.	Dicke [Å]	$D_f^{\text{rechn}}$ [%]	$D_f$ [%]	L [%]	Anmerkungen
0692	500	4,0	-	6,9	
0681	600	2,0	1,9	-	
0689	600	2,0	-	2,16	
0805	600	2,0	1,5	-	
0807	600	2,0	-	2,08	
0775	650	1,5	1,5	-	
0772	650	1,5	-	1,25	
0661	800	0,55	-	0,5	
0723	900	0,28	-	0,21	
0471	950	0,19	2,5-3,5	-	
0691	2.500	0,15	-	0,8	
0631	1000	0,15	0,15	-	
0563	1000	0,15	0,15	-	
0701	1050	0,11	-	=0,19	
$D_f$ = freie Durchlässigkeit (gemessen)				L = $\frac{\text{Lochfläche}}{\text{Gesamtfläche}}$ = relative Lochfläche	
$D_f^{\text{rechn}}$ ist aus der Gleichung $D_f^{\text{rechn}} = e^{-ad}$ mit $a = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ Å}^{-1}$ errechnet.					

Bei der Folienkennzeichnung geben die ersten 3 Ziffern die Herstellungsnummer an. Folien mit gleicher Herstellungsnummer sind zusammen in selben Becherglas niedergeschlagen worden. Die letzte Ziffer unterscheidet die einzelnen Folien gleicher Herkunft.

Beispiel: 0471  $\rightarrow$  47, Niederschlag, 1. Folie

Es zeigt sich, daß die aus dem Absorptionsgesetz errechnete freie Durchlässigkeit  $D_f^{\text{rechn}}$  recht gut mit der wirklich gemessenen  $D_f$  übereinstimmt, obwohl die jetzt ermittelte Ursache der Durchlässigkeit mit Absorption überhaupt nichts zu tun hat.

Die relative Lochfläche L ist allgemein von gleicher Größenordnung aber etwas größer als die freie Durchlässigkeit  $D_f$ . Daraus kann man schließen, daß die Folienfläche einschließlich der "dünnen Stellen" wahrscheinlich undurchlässig, zumindest aber sehr viel weniger durchlässig für langsame Elektronen bis zu 200 eV sein wird, als bisher angenommen wurde.

D i s k u s s i o n   d e r   E r g e b n i s s e

§ 18 Vergleich mit den Versuchsergebnissen von KATZ.

Die hier erhaltenen Versuchsergebnisse widersprechen den Folgerungen, die KATZ aus seinen Messungen gezogen hat. Es ist deshalb zu prüfen, ob er wirklich grundsätzlich andere lochfreie Folien besonders durchlässiger Kristallstruktur untersuchte, oder ob seine Meßergebnisse auch mit der hier gefundenen Art der Durchlässigkeit durch kleine Löcher erklärt werden können.

Da die Folien nach dem gleichen Verfahren hergestellt wurden, kann man erwarten, daß ihre Kristallstrukturen nicht wesentlich voneinander abweichen. Hätte also KATZ lochfreie Folien erhalten, so müßten sie weniger durchlässig sein. Das Gegenteil ist aber der Fall. Bei gleicher Dicke haben seine Folien eine mehr als 50 mal so große Durchlässigkeit wie die hier verwendeten:

Abb.29  
Durchlässigkeit  
einer 1000 Å dicken  
Silberfolie von  
KATZ.

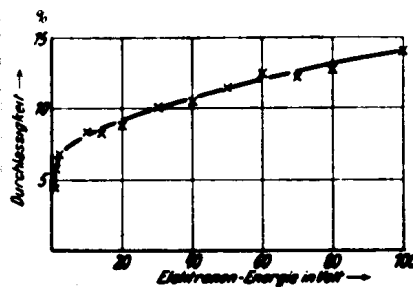


Abb. 2. Gesamtdurchlässigkeit  
einer 1000 Å dicken Silberfolie  
für Elektronen (0—100 Volt)

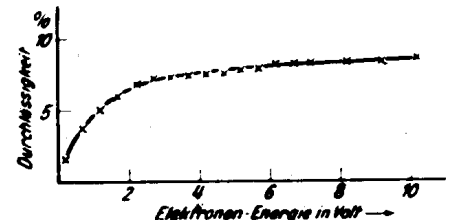


Abb. 3. Durchlässigkeit einer 1000 Å  
dicken Silberfolie für Elektronen  
(0—10 Volt)

Abb.30  
Gesamtdurchlässigkeit  
einer 1100 Å dicken  
Silberfolie von KATZ.

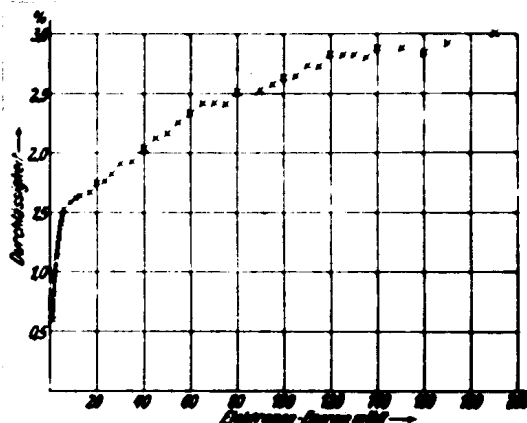


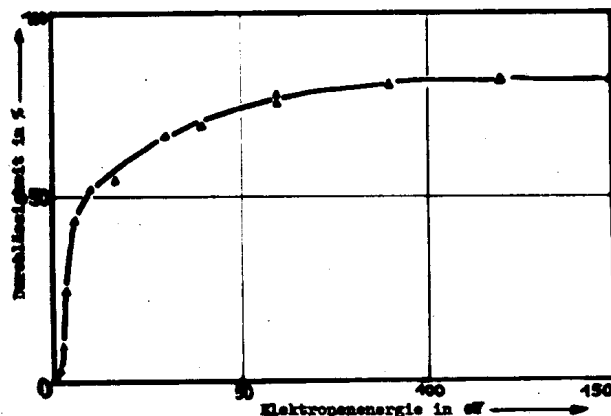
Abb. 4. Durchlässigkeit einer Silberfolie  
für Elektronen (0—200 Volt)

Der Bruchteil der Elektronen, der die Folie ohne Energie- und Richtungsänderung durchlaufen hat, also die freie Durchlässigkeit, zeigt bei KATZ als Funktion der Auftreffenergie ein ausgesprochenes Maximum bei etwa 12 eV (Abb.1, S.5). Er folgert daraus, daß im Mikroskop etwa nicht wahrnehmbare Löcher nicht die Ursache der Durchlässigkeit sein können, weil in diesem Falle wie bei einer Triode die Stromverteilung auf Folie und Käfig fast unabhängig von den angelegten Spannungen sein müßte.

Ein derart ausgeprägtes Maximum der freien Durchlässigkeit konnte jedoch hier ebenso wenig festgestellt werden, wie der von KATZ stets beobachtete Durchlässigkeitsrückgang gegen null mit abnehmender Elektronengeschwindigkeit. Ist trotzdem die Durchlässigkeit der Folien in beiden Fällen auf die gleiche Ursache, nämlich ihre Löcherigkeit zurückzuführen, so müssen die Abweichungen elektronenoptisch bedingt sein. Es wird deshalb versucht, mit der hier vorhandenen Anordnung die Versuchsbedingungen von KATZ möglichst weitgehend nachzuahmen und so zu prüfen, ob unter den entsprechenden elektronenoptischen Verhältnissen sich auch der Kurvenverlauf angenähert gleich ergibt.

§ 19 Reproduktion einiger Ergebnisse von KATZ.

Abb.31  
Durchlässigkeit eines  
Wolframtitters.



Durchlässigkeit eines Wolframtitters bei der von Katz angegebenen Potentialverteilung (Anode 12 Volt).  
Der Auffangkäfig trägt ebenfalls ein Wolframtitter und liegt auf gleichem Potential wie das anstelle der Folie untersuchte Gitter.

Zunächst wird anstelle der Folie ein Wolframgitter untersucht, das mit Sicherheit für Elektronen aller Geschwindigkeiten durchlässig ist. Trotzdem geht bei der von KATZ angegebenen Potentialverteilung die Durchlässigkeit des Gitters bei sehr kleinen Elektronengeschwindigkeiten auf null zurück (Abb.31). Damit ist dieser Teil der Kurve bereits als mögliche elektronenoptische Verfälschung erkannt.

Auf die gleiche Weise wird dann auch die 600 Å dicke Folie o681 untersucht, deren Durchlässigkeit etwa ebenso groß ist wie die der 1100 Å dicken Folie von KATZ. Das Ergebnis zeigt Abb.32:

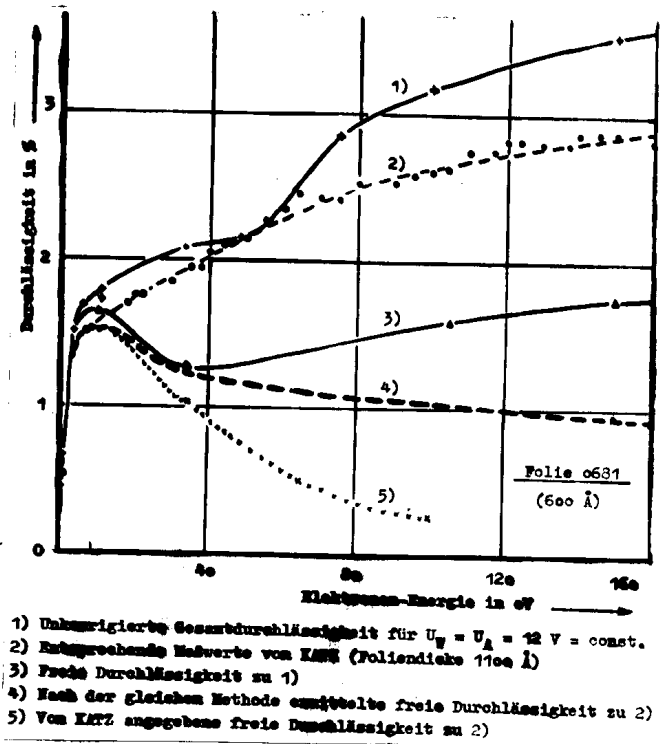


Abb.32  
Durchlässigkeit der 600 Å dicken Folie o681 bei der von KATZ angegebenen Potentialverteilung im Vergleich zu den Meßergebnissen von KATZ an seiner 1100 Å dicken Folie.

Bei Elektronengeschwindigkeiten unterhalb 40 eV stimmen die Kurven fast genau überein, oberhalb sind sowohl die hier gemessene Gesamtdurchlässigkeit wie auch die freie Durchlässigkeit größer als bei KATZ.

Eine Abweichung wird auch bei den Gegenspannungskurven festgestellt. Bei KATZ ergibt sich für Primärelektronen von 33 eV und für solche von 152 eV vor dem steilen Abfall bei Erreichen der vollen Gegenspannung ein allmählicher Abfall über etwa 30 V (Abb.33), den er auf einen Geschwindigkeitsverlust der Elektronen in der Folie zurückführt, während hier stets ein horizontaler Ast mit plötzlichem Abfall bei Erreichen der vollen Gegenspannung gemessen wird (Abb.34).

Abb.33

Gegenspannungskurven zu der 1100 Å dicken Folie von KATZ.

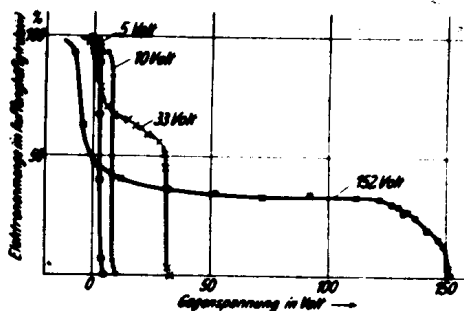
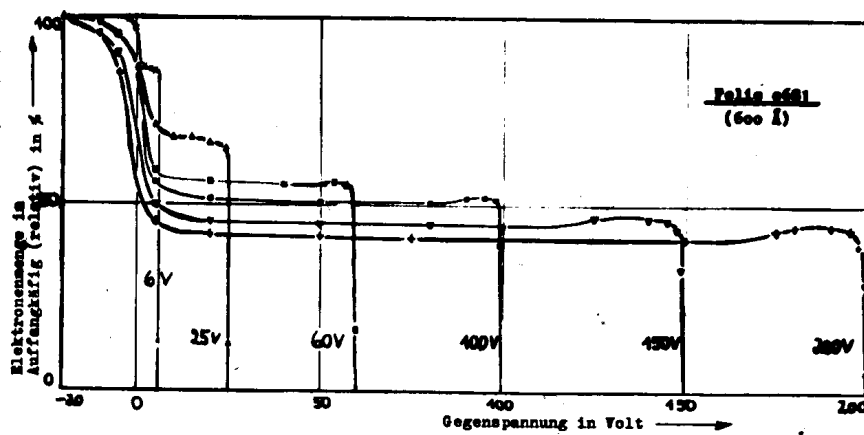


Abb. 5. Gegenspannungskurven für Folie 2

Abb.34

Gegenspannungskurven zu der 600 Å dicken Folie o681.



Dieser Unterschied ist vielleicht so zu erklären, daß KATZ die vom Glühdraht in verschiedenen Richtungen ausgesandten Elektronen durch ein langes Magnetfeld (I;172) in mehr oder weniger gestreckten Spiralen zur Folie geführt hat. Für die Normalkomponenten der Elektronengeschwindigkeit wäre dann eine unterschiedliche Verteilung zu erwarten.

Wertet man seine Kurven so aus, als ob der allmühliche Abfall nicht vorhanden wäre, so erhält man die Kurve 4 in Abb.32, die der hier gemessenen Kurve 3 schon wesentlich näher kommt. Der verbleibende Unterschied ist sehr wahrscheinlich auf abweichende elektronenoptische Verhältnisse zurückzuführen, die bei der Verschiedenartigkeit der Versuchsanordnungen nicht vermieden werden können.



§ 20 Mögliche Ursache für die höhere Durchlässigkeit der Folien von KATZ.

Abb.35

Durchlässigkeitszunahme einer Folie von KATZ nach kräftigem Elektronenbombardement. Die Folie ist zunächst undurchlässig (Kurve I), nach verschieden langem Elektronenbombardement nimmt ihre Durchlässigkeit mehr und mehr zu (Kurven II bis IV).

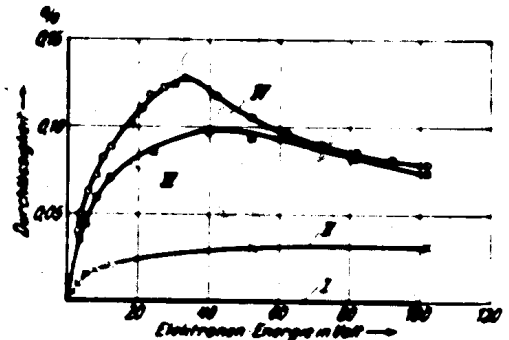


Abb. 7. Zunahme der Gesamtdurchlässigkeit einer 1500 Å dicken Silberfolie mit der Bestrahlungsdauer

Eine weitere von KATZ untersuchte etwa 1500 Å dicke Folie wird erst nach kräftigem Elektronenbombardement für langsame Elektronen durchlässig, die Durchlässigkeit nimmt mit der Dauer des Bombardements zu (Abb.35). Eine ähnliche Erscheinung ist auch im Elektronenmikroskop bei amalgamierten Folien, nie jedoch bei anderen beobachtet worden. Der Versuch, die Folie 0563 (§ 8) durch Elektronenbombardement durchlässiger zu machen, ist hier erfolglos geblieben. Es könnte also sein, daß die größere Durchlässigkeit der Folien von KATZ ebenso wie die der hier zuerst untersuchten (0471, § 7) auf eine kurzzeitige Einwirkung von Quecksilberdampf zurückzuführen ist.

Beim Evakuieren setzt man die flüssige Luft im allgemeinen erst an, nachdem ein gutes Vakuum erreicht ist. Diese Zeitspanne kann schon ausreichen, entsprechende Strukturänderungen der Folien zu verursachen. Berücksichtigt man weiter, daß mit zunehmender Übung die gesamten Vorbereitungen zur Messung und damit auch die Zeitspanne vom Anblasen des Versuchsrohres an die Pumpe bis zum Ansetzen der flüssigen Luft meist kürzer werden, so hat man eine plausible - wenn auch nicht nachweisbare - Erklärung für die Durchlässigkeitsabnahme bei KATZ von Folie zu Folie. Es würden also dadurch auch die unterschiedlichen "Absorptionskoeffizienten" erklärt, die man erhält, wenn man die Meßwerte von KATZ in Gl. (2) (§ 2) einsetzt.

§ 21 Folgerungen.

Nach allen vorliegenden Versuchsergebnissen muß man annehmen, daß die Durchlässigkeit der Folien von KATZ ebenfalls durch kleine Löcher verursacht wurde. Es ist weder seinen Messungen noch den hier durchgeführten Untersuchungen mit Sicherheit zu entnehmen, ob langsame Elektronen überhaupt Materie der verwendeten Dicken durchdringen können. Auch andere Durchlässigkeitsmessungen für langsame Elektronen, wie z.Bsp. die von BECKER an Nickelfolien (IV), werden durch die hier erhaltenen Ergebnisse zunächst in Frage gestellt, bis einwandfrei bewiesen worden ist, daß in diesen Fällen die Elektronen wirklich eine Materieschicht der angegebenen Dicke und nicht Löcher oder besonders dünne Stellen durchquert haben.

Der Absorptionskoeffizient für langsame Elektronen bleibt weiterhin unbestimmt, doch kann angegeben werden, daß er sehr wahrscheinlich entgegen den bisherigen Angaben größer als  $10^7 \text{ cm}^{-1}$  ist. Zu seiner genauen Ermittlung aus Durchlässigkeitsmessungen an Folien wäre zuerst deren absolute Gleichmäßigkeit und Lochfreiheit durch Untersuchung mit dem Elektronenmikroskop sicherzustellen. Unter Umständen könnte man auch daran denken, den Absorptionskoeffizienten und die Tiefe, aus der die Sekundärelektronen kommen, auf folgende Weise zu ermitteln:

In einer geeigneten Anordnung wird die Sekundäremissionskurve eines bestimmten Materials in Abhängigkeit von der Primärenergie aufgenommen. Dann wird stufenweise eine andere Substanz mit stark abweichender Sekundäremissionskurve aufgedampft und ebenfalls gemessen. Aus dem Übergang der einen Kurve in die andere bei Dickerwerden der Aufdampfschicht sollten entsprechende Schlüsse zu ziehen sein, wenn es gelänge, die Schichtdicke entgegen bisher durchgeführten Versuchen dieser Art sehr genau zu ermitteln. Eine geringe Ungleichmäßigkeit oder Löcherigkeit der aufgedampften Schicht könnte in diesem Fall keinen wesentlichen Einfluß auf das Ergebnis haben, doch ist zu befürchten, daß durch die aufgebrauchte dünne Schicht unter Umständen ein neues Verhalten der Sekundäremission hervorgerufen wird.

§ 22 Zusammenfassung.

Durchlässigkeitsmessungen an chemisch niedergeschlagenen Silberfolien ergeben bei weitgehender Ausschaltung von Fehlerquellen für Elektronen aller Geschwindigkeiten bis zu 200 eV eine nahezu konstant bleibende freie Durchlässigkeit (= unbeeinflusst durchgegangene Elektronen) und einen kontinuierlichen Anstieg der Gesamtdurchlässigkeit (= alle rückseitig austretenden Elektronen) entsprechend der zunehmenden Auslösung von Sekundärelektronen. Messungen bei verschiedenen Elektronenintensitäten und an verschiedenen Folien gleicher Dicke führen zu übereinstimmenden Ergebnissen.

Im Gegensatz zu anderen Autoren werden als Ursache der Durchlässigkeit mit dem Elektronenmikroskop kleine Löcher von etwa  $1000 \text{ \AA}$   $\varnothing$  festgestellt, die dicht über die gesamte Folienfläche verstreut sind. Das Verhältnis der Lochfläche zur Gesamtfolienfläche wird gleich der freien Durchlässigkeit  $D_f$  ermittelt, die ihrerseits in Abhängigkeit von der Foliendicke  $d$  dem Exponentialgesetz  $D_f = e^{-ad}$  mit  $a = 6,5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$  folgt. Mit Zunahme der Foliendicke wird nur die Zahl, nicht aber die Größe der einzelnen Löcher geringer.

Neben diesen Löchern werden in etwa gleicher Ausdehnung und Dichte "dünne Stellen" beobachtet, die für die schnellen Elektronen im Elektronenmikroskop eine gewisse Durchlässigkeit zeigen. Ein Durchgang auch von langsamen Elektronen durch diese Stellen ist aber auf Grund der Meßergebnisse unwahrscheinlich. Mit dem Lichtmikroskop ist die ermittelte Struktur der Folien nicht nachzuweisen.

Die in früheren Arbeiten von KATZ (I;II;III) erzielten beträchtlich höheren Durchlässigkeiten von chemisch niedergeschlagenen Silberfolien für langsame Elektronen bis zu 200 eV sind sehr wahrscheinlich auf eine größere Löcherigkeit seiner Folien, eventuell nach Änderung der Folienstruktur infolge kurzzeitiger Einwirkung von Quecksilberdampf, zurückzuführen. Seine sonstigen

abweichenden Ergebnisse können elektronenoptisch erklärt und auch mit der hier verwendeten Versuchsanordnung bei entsprechender Potentialverteilung einigermaßen reproduziert werden.

Durch die erhaltenen Untersuchungsergebnisse werden alle bisher an dünnen Folien durchgeführten Messungen über den Durchgang langsamer Elektronen durch Materie in Frage gestellt, bis einwandfrei bewiesen worden ist, daß die Elektronen wirklich eine Materieschicht der angegebenen Dicke und nicht Löcher oder besonders dünne Stellen durchquert haben.

Zum Abschluß möchte ich nicht versäumen, Herrn Professor Dr. C. Ramsauer für die Anregung zu der Arbeit und die Arbeitsmöglichkeit in seinem Institut sowie den Herren Dr. Thiel, Physikalisches Institut der TU, und Dr. Weber, Firma Telefunken, für ideelle und materielle Unterstützung zu danken. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Gesellschaft der Freunde der TU danke ich für die wesentliche Förderung durch Bereitstellung von Geräten.

Literatur.

- I H. Katz, Ann.d.Ph. (5) 33, 169 (1938)  
Durchgang langsamer Elektronen (0 - 200 Volt)  
durch Metallfolien.
- II H. Katz, Ann.d.Ph. (5) 33, 160 (1938)  
Elektronenoptische Versuche zum Durchgang langsamer  
Elektronen (0 - 200 Volt) durch Metallfolien.
- III H. Katz, Z.f.Techn.Ph. 18, 555 (1937)  
Durchgang langsamer Elektronen (0 - 200 Volt)  
durch Metallfolien.
- IV A. Becker, Ann.d.Ph. (4) 84, 779 (1927)  
Ann.d.Ph. (5) 2, 249 (1929)  
Über den Durchgang langsamer Kathodenstrahlen  
durch Metalle.
- V H. Bruining, Springer-Verl.Berlin (1942)  
Die Sekundärelektronenemission fester Körper.
- VI P. Lenard und A. Becker, Handbuch der Experimental-  
physik Bd.14 (1927)  
Kathodenstrahlen
- VII W. Bothe, Handb.d.Ph. Bd.22 (1933)  
Durchgang von Elektronen durch Materie.
- VIII H. Mayer, Wiss.Verl.Ges.Stuttg. (1950)  
Physik dünner Schichten
- IX E.v. Angerer, Vieweg-Verl.Braunschweig (1952)  
Technische Kunstgriffe bei physikalischen  
Untersuchungen.
- X E. Brüche, AEG-Jahrbuch III, 103 (1931 - 1932)  
Fadenstrahlen (Hütchenanode)
- XI G. Ruthemann, Ann.d.Ph. (6) 2, 113 (1948)  
Diskrete Energieverluste mittelschneller Elektronen  
beim Durchgang durch dünne Folien.