

Zum Durchgang langsamer Elektronen durch Metallfolien

Von Walter Berger

Mit 8 Abbildungen

Inhaltsübersicht

In Anlehnung an Arbeiten von Katz¹⁾²⁾³⁾ 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 mit dem Elektronenmikroskop ermittelt. Entgegen den bisherigen Anschauungen ergibt sich, daß die durchgelassenen Elektronen nicht durch eine homogene Folienfläche, sondern durch gleichmäßig über die gesamte Folie verstreute kleine Löcher von etwa 1000 Å Durchmesser gegangen sind.

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

Folienherstellung

Die zu untersuchenden Folien werden nach dem gleichen Verfahren hergestellt, das auch Katz²⁾ angegeben hat. Ein gründlich gereinigtes Becherglas wird nach dem Rezept von Brashear⁴⁾ 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 gelingt mit einiger Sicherheit nur bis zu Foliendicken von etwa 700 Å, während sich Folien von mehr als 900 Å Dicke erst nach vorheriger geringer Verunreinigung des Wassers mit Salpetersäure (1 Tropfen auf 1 Liter) ablösen lassen. Eine Änderung der Folienstruktur als Folge dieser Verunreinigung ist weder im Licht- noch im Elektronenmikroskop zu erkennen.

Sobald sich die Folie ablösen läßt, im allgemeinen nach etwa 30 Minuten, wird mit Ammoniak neutralisiert und anschließend das Wasser durch Al-

¹⁾ H. Katz, Ann. Physik (5) **33**, 169 (1938).

²⁾ H. Katz, Ann. Physik (5) **33**, 160 (1938).

³⁾ H. Katz, Z. techn. Physik **18**, 555 (1937).

⁴⁾ E. v. Angerer, Technische Kunstgriffe, Vieweg-Verlag Braunschweig 1952.

kohol (Methanol) ersetzt. Jeweils ein kleines Stück der Folie wird dann im Alkoholbad von der Glaswand abgezogen und auf einen Folienträger gebracht. Dort trocknet es an der Luft freitragend und festhaftend auf.

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

Zur Unterscheidung werden die Folien durch eine vierstellige Zahl gekennzeichnet. Die ersten drei Ziffern geben die Herstellungsnummer an (Folien gleicher Herstellungsnummer entstammen demselben Niederschlag), die letzte Ziffer unterscheidet Folien gleicher Herkunft.

Durchlässigkeitsmessungen

Versuchsordnung

Die verwendete Versuchsanordnung ist in Abb. 1 schematisch dargestellt, sie ist zwar im Prinzip, nicht aber in den Einzelheiten von Katz¹⁾ übernommen worden.

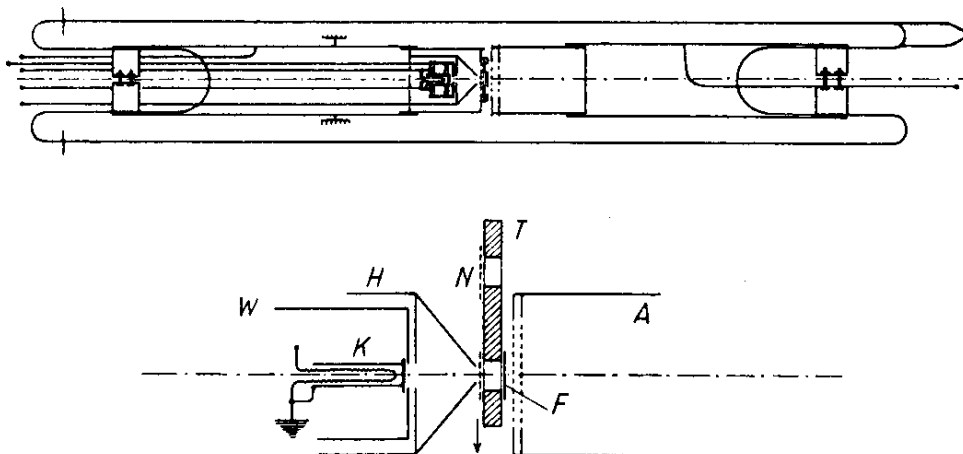


Abb. 1. Schematische Skizze der Versuchsanordnung. *K* = indirekt geheizte Oxydkathode, *W* = Wehneltzylinder, *H* = Hütchenanode, *T* = versilberter Folienträger, *N* = Silbernetz, *F* = Silberfolie, *A* = Auffangkäfig

So wird als Elektronenquelle nicht ein Glühdraht, sondern eine indirekt geheizte Oxydkathode verwendet, die in Verbindung mit dem Wehneltzylinder einen gut definierten Strahl von Elektronen einheitlicher Geschwindigkeit liefert. Eine Hütchenanode zwischen Kathode und Folie soll alle irgendwie schief laufenden Elektronen nach Möglichkeit aus dem Strahl aussondern. Außerdem ist der Folienträger nicht starr, sondern verschiebbar angeordnet, so daß in Differenzmessungen auch die Elektronen noch ausgeschieden werden können, die trotz aller Vorsichtsmaßnahmen unter Umgehung der Folie direkt auf den Folienträger gelangen. Der verschiebbare Folienträger hat außerdem den Vorteil, daß die Folie jederzeit herausgeschoben und mit einer Lupe betrachtet werden kann.

Als Elektrodenmaterial ist vorwiegend dünnes Molybdänblech verwendet worden. Nur der Folienträger wurde aus einem stärkeren Kupferstück ange-

fertigt und mit einer Silberoberfläche versehen, um die empfindliche Folie beim Ausglühen vor der Zerstörung zu bewahren.

Zur Vorbereitung der Messungen wird das unter Ansatz von flüssiger Luft evakuierte Versuchsrohr mehrere Stunden in einem elektrischen Ofen bei etwa 350° C ausgeheizt, anschließend werden die Metallteile mehrmals geglüht. Das Vakuum in dem abgeschmolzenen und gegetterten Versuchsrohr wird als ausreichend angesehen, wenn sich auch bei hohen Emissionsströmen keine positiven Ionen nachweisen lassen.

Meßgrößen

Gemessen wird nach dem Vorgang von Katz¹⁾³⁾ die Menge und die Geschwindigkeitsverteilung der bei Elektronenbeschuß rückseitig aus der Folie austretenden Elektronen. Insbesondere werden definiert die freie Durchlässigkeit

$$= \frac{\text{Zahl der unbeeinflusst durchgegangenen Elektronen}}{\text{Zahl der aufgetroffenen Elektronen}}$$

und die Gesamtdurchlässigkeit

$$= \frac{\text{Zahl der insgesamt rückseitig austretenden Elektronen}}{\text{Zahl der aufgetroffenen Elektronen}}$$

wobei sich die Zahl der insgesamt rückseitig austretenden Elektronen zusammensetzen kann aus unbeeinflusst durchgegangenen Primärelektronen, solchen, die in der Folie Geschwindigkeits- oder Richtungsänderungen erfahren haben, und in der Folie ausgelösten und rückseitig austretenden Sekundärelektronen. Reflektierte Elektronen werden ebenso wie bei Katz nicht berücksichtigt.

Vermeidung von Meßfehlern

Bei den Durchlässigkeitsmessungen ist es notwendig, die Elektronen von der Auswertung auszuschließen, die direkt auf den Folienträger gelangen. Zu diesem Zweck ist der verschiebbare Folienträger (Abb. 1) mit zwei gleichen Bohrungen versehen, die beide kathodenseitig ein Silbernetz tragen. Die zu untersuchende Folie bedeckt die gegenüberliegende Öffnung einer der Bohrungen. In einer Leermessung wird nun bei gleichem Potential für Träger und Auffangkäfig zunächst ermittelt, welcher Anteil der ankommenden Elektronen von Silbernetz und Träger aufgefangen wird. Die Elektronen, die sonst auf die Folie treffen würden, sammeln sich dabei im Auffangkäfig. Ihr prozentualer Anteil wird bei der anschließenden Durchlässigkeitsmessung als Zahl der aufgetroffenen Elektronen, kurz Folienstrom genannt, zugrunde gelegt.

Vorversuche haben ergeben, daß die gemessenen Durchlässigkeitswerte sehr stark auch vom Anodenpotential, also den elektronenoptischen Verhältnissen im Raum vor der Folie verfälscht werden können. Fehler dieser Art machen sich durch erhebliche Maxima und Minima der Durchlässigkeitskurven bemerkbar, deren Lage mit der Anodenspannung wechselt. Sie können nicht auftreten, wenn der Raum zwischen Anode und Folie feldfrei gehalten wird.

Solche bei Potentialgleichheit von Anode und Folie aufgenommenen Durchlässigkeitskurven werden Leitkurven genannt. Sie sind nicht völlig fehlerfrei, weil die auf Träger und Folie treffenden Elektronen dort auch ein-

trittsseitig Sekundärelektronen auslösen, die bei Feldfreiheit zur Anode gelangen und so den gemessenen Folienstrom verringern können. Da nun aber das Maximum der Energieverteilung dieser Sekundärelektronen bei etwa 2 eV liegt, können sie bis auf einen unbedeutenden Rest die Anode nicht mehr erreichen, wenn deren Potential etwa 8 V negativer als Folie geschaltet wird. Elektronenoptisch bedingte Fehler der so gemessenen Durchlässigkeitskurven wären als Abweichungen vom stetigen Verlauf der Leitkurven zu erkennen und werden nicht beobachtet.

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

Das Sekundäremissionsvermögen ist für Primärenergien um 100 eV von der Größenordnung 1. Es wird also an Träger und Folie eine große Zahl von Sekundärelektronen ausgelöst, die sich zunächst zur Anode hinbewegen, dann in dem Feld zwischen Anode und Folie umlenken und zum Folienträger zurückkehren. Dabei trifft eine gewisse Anzahl auch auf die Folie und wird zu dem ihrer Geschwindigkeit entsprechenden Prozentsatz von dieser durchgelassen. Das hat eine Verfälschung der Gesamtdurchlässigkeit, nicht aber der freien Durchlässigkeit zur Folge, deren Größe sich rechnerisch durch eine geeignete Kombination der verschiedenen Meßwerte und ihrer Fehler abschätzen läßt. Da hier nur die davon unberührte freie Durchlässigkeit von Belang ist, wird auf die Wiedergabe des umständlichen Rechnungsganges verzichtet und nur die daraus folgende korrigierte Kurve der Gesamtdurchlässigkeit angegeben.

Bei sehr kleinen Elektronengeschwindigkeiten unter 5 eV sind die Meßwerte ungenau, weil die zur Verfügung stehenden Intensitäten klein werden. Die maximale Fehlergrenze der ermittelten Meßwerte ist in Abb. 2a durch senkrechte gestrichelte Linien angedeutet.

Zwischen Oxydkathode, Silberfolie und Auffangkäfig bestehende Kontaktpotentiale sind in Gegenfeldmessungen ermittelt und bei den Durchlässigkeitsmessungen berücksichtigt worden.

Meßergebnisse

Die zuerst untersuchte 950 Å dicke Folie 0471 hat eine freie Durchlässigkeit von etwa 3%, später zeigt sich aber, daß ihre Struktur durch kurzzeitige Einwirkung von Quecksilberdampf während des Evakuierens wesentlich geändert worden ist, so daß dieses Meßergebnis nicht als richtig für eine 950 Å dicke Silberschicht gelten kann.

Die anschließend untersuchte Folie 0563 wird ebenso wie alle folgenden vor der Einwirkung von Quecksilberdampf bewahrt, sie ist 1000 Å dick und hat eine freie Durchlässigkeit von nur 0,15% gegenüber 3% bei der ersten Folie 0471 und 8% bei einer gleichdicken Folie von Katz¹⁾ für 10-eV-Elektronen. Der Versuch, diese Folie nach den Angaben von Katz¹⁾ durch kräftiges Elektronenbombardement durchlässiger zu machen, bleibt bis zu ihrer Zerstörung (Rißbildung) ohne Erfolg.

Die nächste Folie 0631 ist ebenfalls 1000 Å dick und hat ebenso wie 0563 eine freie Durchlässigkeit von nur 0,15%. Nach Vermeidung der durch

Quecksilberdampf hervorgerufenen Strukturänderungen sind die hier hergestellten Folien bei gleicher Dicke sehr viel weniger durchlässig als die von Katz.

Wegen Unsicherheit der Meßergebnisse für höhere Primärenergien infolge dann auftretender vagabundierender Elektronen werden nun dünnere Folien mit höherer Durchlässigkeit verwendet, bei denen diese geringen Verfälschungen nicht mehr stören.

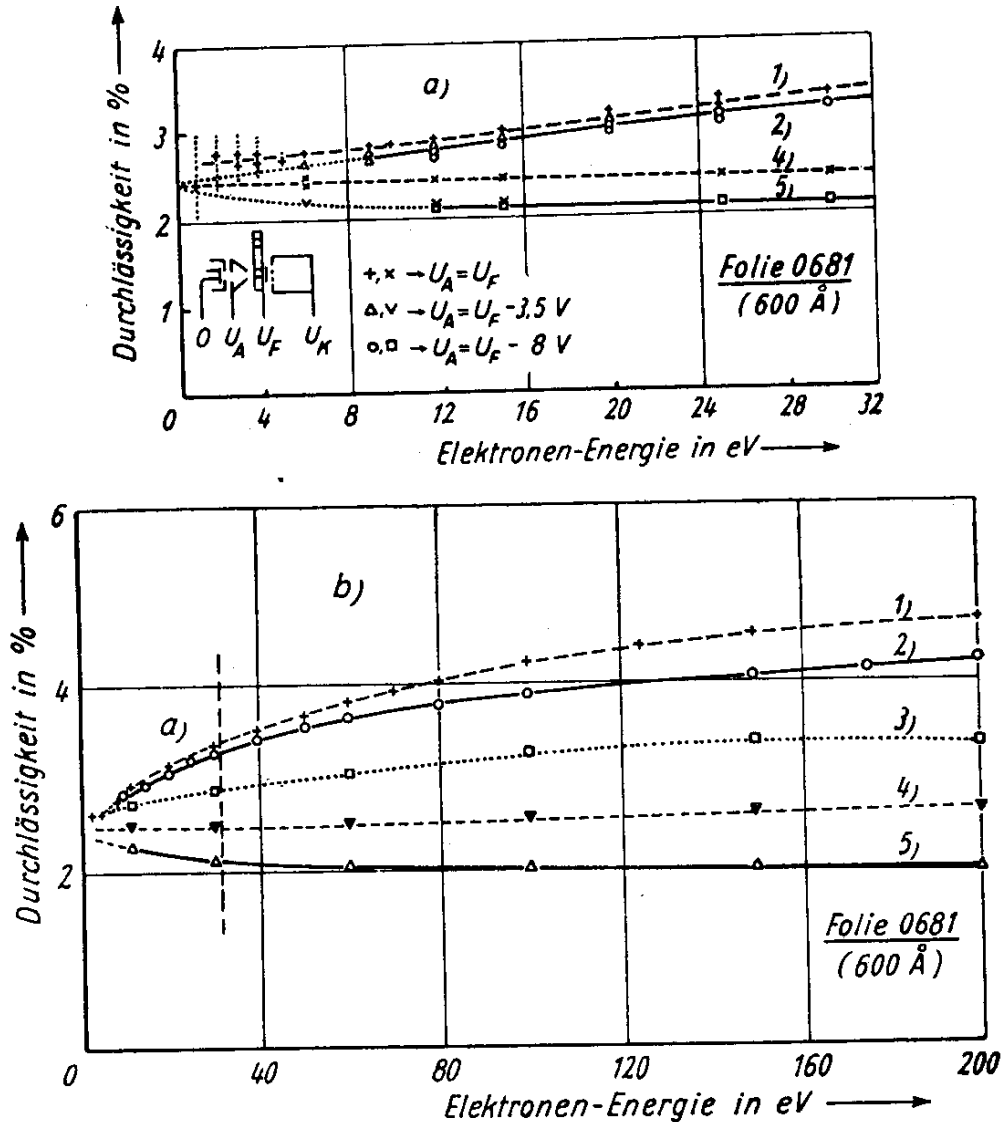


Abb. 2. Durchlässigkeit der Folie 0681. 1. Leitkurve ($U_A = U_F$) zu 2, 2. Gemessene Gesamtdurchlässigkeit ($U_A = U_F - 8$ V), 3. Gesamtdurchlässigkeit nach Korrektur der Verfälschung durch Sekundärelektronen, 4. Leitkurve ($U_A = U_F$) zu 5, 5. Freie Durchlässigkeit ($U_A = U_F - 8$ V)

Es gelingt, die 600 Å dicke Folie 0681 fehlerfrei herzustellen und, wie die spätere Betrachtung unter dem Mikroskop ergibt, bis zum Abschluß der Messungen auch unversehrt zu erhalten. Das Ergebnis der Durchlässigkeitsmessungen an dieser Folie zeigen die Abb. 2 und 3. Alle Meßwerte sind sehr gut reproduzierbar, zu verschiedenen Zeiten und auch bei verschiedenen Intensitäten gemessene Kurven stimmen gut überein.

Die Gegenspannungskurven (Abb. 3) sind insofern fehlerhaft, als bei höheren Geschwindigkeiten der durchgegangenen Elektronen am Auffangkäfig Sekundärelektronen ausgelöst werden, von denen einige zur Folie ge-

langen können. Diese Verfälschung tritt aber nur in einem mittleren Bereich auf, weil bei höherer Gegenspannung die Restenergie der in den Käfig gelangenden Elektronen nicht mehr zur Sekundärelektronenablösung ausreicht. Das Maximum der Durchlässigkeit kurz vor Erreichen der vollen Gegenspannung und die daraus ermittelte freie Durchlässigkeit sind also nicht mit einem Fehler behaftet.

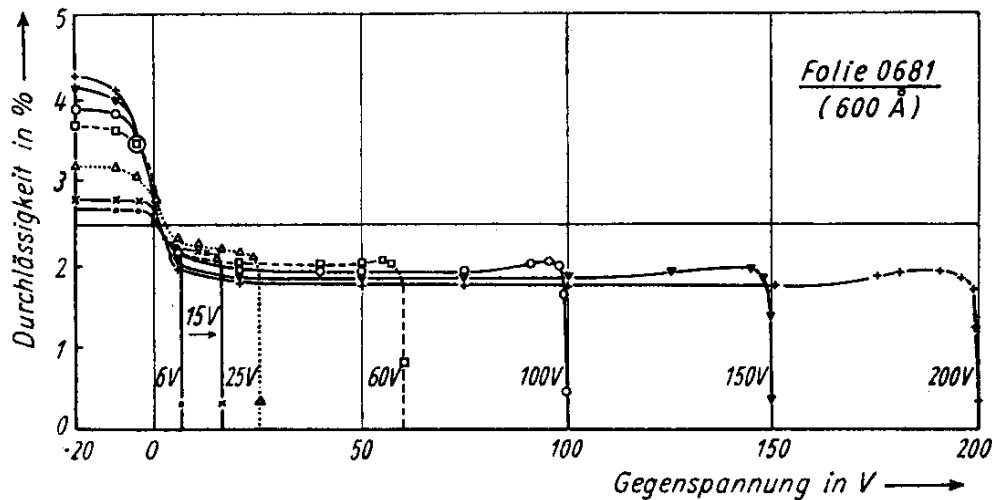


Abb. 3. Gegenspannungskurven für die Folie 0681

Durchlässigkeitsmessungen an zwei weiteren 650 und 600 Å dicken Folien 0775 und 0805 führen zu gleichen Ergebnissen, die Kurvenformen stimmen völlig überein, nur weichen die Absolutwerte entsprechend den Dickenunterschieden etwas voneinander ab.

Das Gesamtergebnis der Durchlässigkeitsmessungen an den untersuchten Silberfolien kann nach Berücksichtigung aller Fehlermöglichkeiten wie folgt zusammengefaßt werden:

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.

Die durchgelassenen Elektronen setzen sich 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.

Die freie Durchlässigkeit D_f bleibt im gesamten Meßbereich nahezu konstant und folgt in Abhängigkeit von der Foliendicke d dem Absorptionsgesetz

$$D_f = e^{-ad},$$

wobei sich der Absorptionskoeffizient a aus den Meßwerten fast unabhängig von der Elektronengeschwindigkeit errechnet zu $a = 6,5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$.

Ursache der Durchlässigkeit

Die Tatsache, daß die freie Durchlässigkeit in Abhängigkeit von der Foliendicke dem Absorptionsgesetz folgt, läßt zunächst das Vorliegen echter Absorption vermuten. In diesem Fall müßten die Elektronen gleichmäßig durch die gesamte Foliensfläche hindurchtreten.

Andererseits ist aber eine Unabhängigkeit der Absorption von der Elektronenenergie schwer vorstellbar. Dieses Meßergebnis ließe sich besser durch eine Foliensstruktur erklären, bei der ein gewisser Teil der Foliensfläche besonders

gut durchlässig für Elektronen verschiedener Geschwindigkeiten, der Rest aber praktisch undurchlässig wäre.

Eine Entscheidung zwischen beiden Möglichkeiten allein an Hand der Meßergebnisse oder nach Betrachten der Folien mit dem Lichtmikroskop ist nicht möglich. Deshalb werden die Folien mit dem Elektronenmikroskop untersucht, welches die Durchlässigkeit der Foliensfläche für schnelle Elektronen sehr hoch vergrößert aufzeichnet. Man wird sicherlich annehmen dürfen, daß relativ gut durchlässige Flächenanteile diese Eigenschaft für Elektronen aller Geschwindigkeiten besitzen und somit die ermittelte Durchlässigkeitsverteilung auch für langsame Elektronen angenähert richtig sein wird.

Das Ergebnis solcher Untersuchungen zeigen die Abb. 4 bis 6. Die gesamte Foliensfläche ist gleichmäßig mit kleinen scharf berandeten „durchlässigen Stellen“ von etwa 1000 \AA Durchmesser überstreut. Daneben werden in etwa gleicher

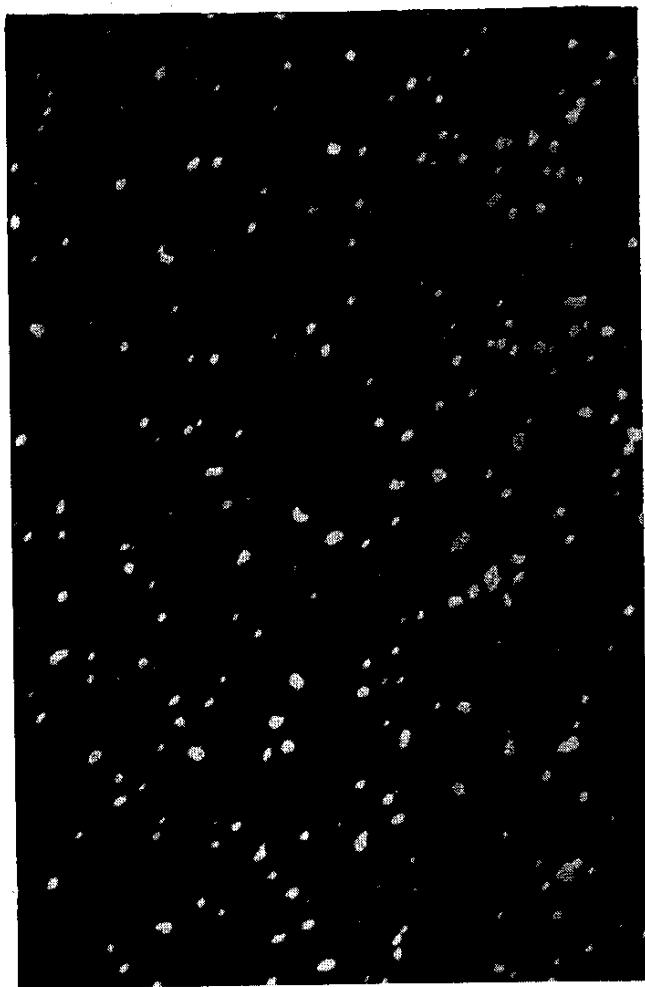


Abb. 4. Folie 0689, $d = 600 \text{ \AA}$
Elektronenbild 12000:1

Größe und Verteilung „dünne Stellen“⁵⁾ mit unscharfen Rändern beobachtet, die eine wesentlich geringere Durchlässigkeit zeigen. Die restliche Foliensfläche erscheint im Verhältnis dazu praktisch undurchlässig. Bei Variation der Foliendicke ändert sich nur die Zahl, nicht aber die Größe der durchlässigen Flächenanteile.

Während der Untersuchungen im Elektronenmikroskop werden keine Änderungen der Foliensstruktur beobachtet, die darauf hindeuten könnten, daß die durchlässigen Flächenanteile erst bei Elektronenbeschuß entstehen. Im Lichtmikroskop ist die Struktur der Folien deshalb nicht zu erkennen, weil die Einzelheiten kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes sind.

⁵⁾ In der Reproduktion schwer zu erkennen.

Die unscharf berandeten „dünnen Stellen“ erscheinen im Elektronenbild so, als ob sie beim Aufbau der Schicht erst nach Erreichen einer gewissen Schichtdicke vom Rande her allmählich überdeckt worden und so dünner als ihre Umgebung geblieben wären. Jedoch ist das Vorliegen einer besonders durchlässigen Struktur bei gleichbleibender Foliendicke nicht mit Sicherheit auszuschließen.

Der optische Eindruck bei Betrachtung der „durchlässigen Stellen“ läßt dagegen auf Löcher schließen. Zur Nachprüfung wird ein Folienstück elektronenmikroskopisch untersucht, das drei dicht beieinanderliegende, auch im Lichtmikroskop deutlich als solche erkennbare Löcher enthält. So ist ein Vergleich möglich, der eindeutig die Identität von „durchlässigen Stellen“ und Löchern ergibt (Abb. 6). Der einzige Unterschied besteht in der flächenhaften Ausdehnung.

Nun sind Löcher für Elektronen aller Geschwindigkeiten frei durchlässig. Zu klären bleibt aber noch die Frage, ob langsame Elektronen bis zu 200 eV auch die dünnen Stellen oder gar die übrige Foliensfläche durchdringen können. Wäre das der Fall, so müßte die gemessene freie Durchlässigkeit größer als die rela-

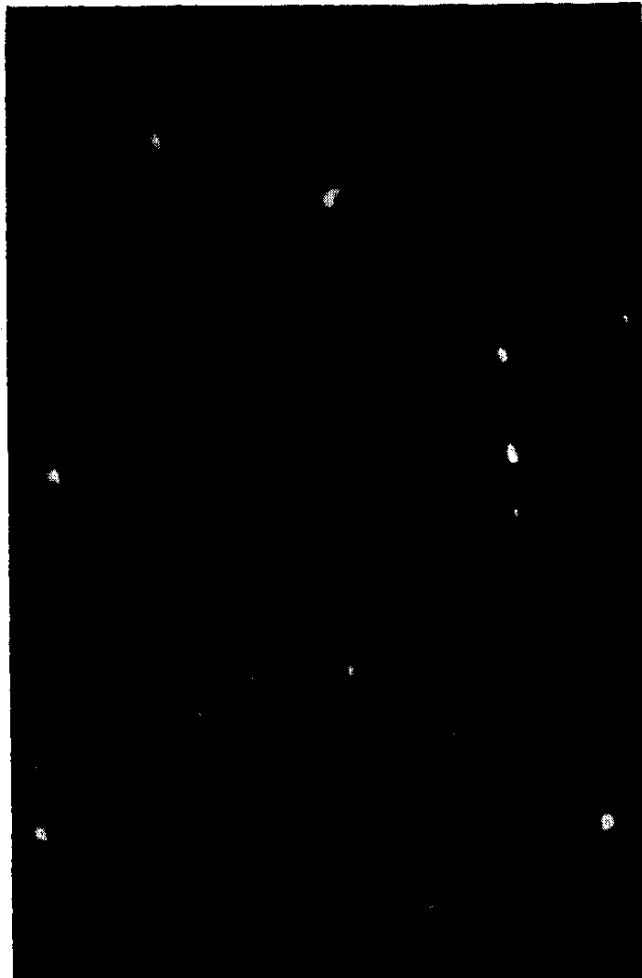


Abb. 5. Folie 0701, $d = 1050 \text{ \AA}$
Elektronenbild 12000:1



Abb. 6. Folie 0807, $d = 600 \text{ \AA}$, Elektronenbild 4000:1

tive Lochfläche

$$L = \frac{\text{Summe der Lochflächen}}{\text{Gesamtfolienfläche}} \text{ sein.}$$

Zur Ermittlung der relativen Lochfläche L wird die elektronenmikroskopische Aufnahme des betreffenden Folienausschnittes so nachvergrößert, daß der Abbildungsmaßstab etwa 30000:1 beträgt. Dieses vergrößerte Bild wird auf einen Lichtkasten und darüber durchsichtiges Millimeterpapier gelegt. Dann kann mit einer Lupe das Verhältnis L ausgezählt werden.

Dieses Verfahren ist insofern nicht exakt, als nur ein sehr kleiner Ausschnitt der untersuchten Folie ausgewertet werden kann, denn die etwa 12 mm² große Folienfläche würde bei der angegebenen Vergrößerung eine kreisförmige Aufnahmefläche von 120 m Durchmesser erfordern. Auf Grund der recht gleichmäßigen Verteilung der Löcher über die gesamte Folienfläche ist aber anzunehmen, daß der durch Auswertung mehrerer Folienausschnitte gewonnene Wert von L dem tatsächlich vorhandenen Mittelwert recht nahe kommen wird.

Die Ergebnisse der Folienuntersuchungen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt:

Folie Nr.	Dicke [Å]	D_f^{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	—	Rand eingerissen
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	—	Strukturänderung infolge Einwirkung von Hg-Dampf Doppellage der Folie
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)	$L = \frac{\text{Lochfläche}}{\text{Gesamtfläche}} = \text{relative Lochfläche}$
--	--

D_f^{rechn} ist aus der Gleichung $D_f^{\text{rechn}} = e^{-ad}$ mit $a = 6,5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ errechnet

Es zeigt sich, daß die gemessene freie Durchlässigkeit D_f recht gut mit der aus dem Absorptionsgesetz errechneten übereinstimmt, obwohl die ermittelte Ursache der Durchlässigkeit mit Absorption überhaupt nichts zu tun hat. Die relative Lochfläche L ist allgemein von gleicher Größenordnung, aber

meist etwas größer als die freie Durchlässigkeit D_f . Daraus kann man schließen, daß die dünnen Stellen langsame Elektronen bis zu 200 eV nicht merklich durchlassen und daß die übrige Folienfläche sehr wahrscheinlich undurchlässig, zumindest aber sehr viel weniger durchlässig für langsame Elektronen sein wird, als bisher angenommen wurde.

Diskussion der Ergebnisse

Die 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 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 fünfzigmal so große Durchlässigkeit wie die hier verwendeten ¹⁾ (S. 173).

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 ¹⁾ (S. 176). 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 ebensowenig 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

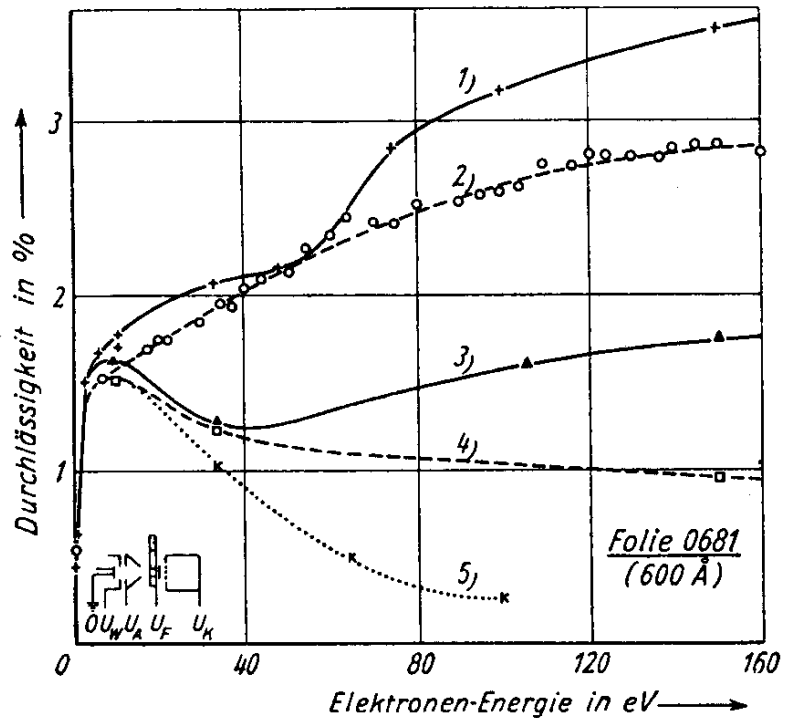


Abb. 7. Durchlässigkeit der 600 Å dicken Folie 0681 bei der von Katz angewendeten Potentialverteilung im Vergleich zu dessen Meßergebnissen an einer 1100 Å dicken Folie, 1. Unkorrigierte Gesamtdurchlässigkeit für $U_w = U_A = 12 V = \text{const}$, 2. Entsprechende Meßwerte von Katz (Folien Dicke 1100 Å), 3. Freie Durchlässigkeit zu 1, 4. Nach der gleichen Methode ermittelte freie Durchlässigkeit zu 2, 5. Von Katz angegebene freie Durchlässigkeit zu 2

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.

Auf diese Weise wird die 600 Å dicke Folie 0681 untersucht, deren Durchlässigkeit (Abb. 2) etwa ebenso groß ist wie die der 1100 Å dicken Folie von Katz¹⁾ (S. 174).

Die Versuchsergebnisse sind in Abb. 7 gegenübergestellt. Bei Elektronengeschwindigkeiten bis zu 40 eV stimmen die jeweils zueinandergehörenden Kurven fast genau überein, insbesondere sind das Maximum der freien Durchlässigkeit bei etwa 12 eV und der Durchlässigkeitsrückgang gegen null bei sehr kleinen Elektronengeschwindigkeiten deutlich ausgeprägt. Oberhalb 40 eV ergeben sich Abweichungen, sie werden auf abweichende elektronenoptische Verhältnisse zurückgeführt, die bei der Verschiedenartigkeit der Versuchsanordnungen nicht vermieden werden können.

Die Kurve 4 ist aus den Meßergebnissen von Katz so ermittelt worden, daß jeweils der horizontale Ast seiner Gegenspannungskurven als freie Durchlässigkeit angenommen wurde. Da der von Katz ermittelte allmähliche Abfall der Gegenspannungskurven vor Erreichen der vollen Gegenspannung hier nicht beobachtet werden konnte, ergibt sich so eine bessere Vergleichsmöglichkeit für die entsprechenden Meßwerte.

Eine von Katz untersuchte etwa 1500 Å dicke Folie wird erst nach kräftigem Elektronenbombardement für langsame Elektronen durchlässig, die

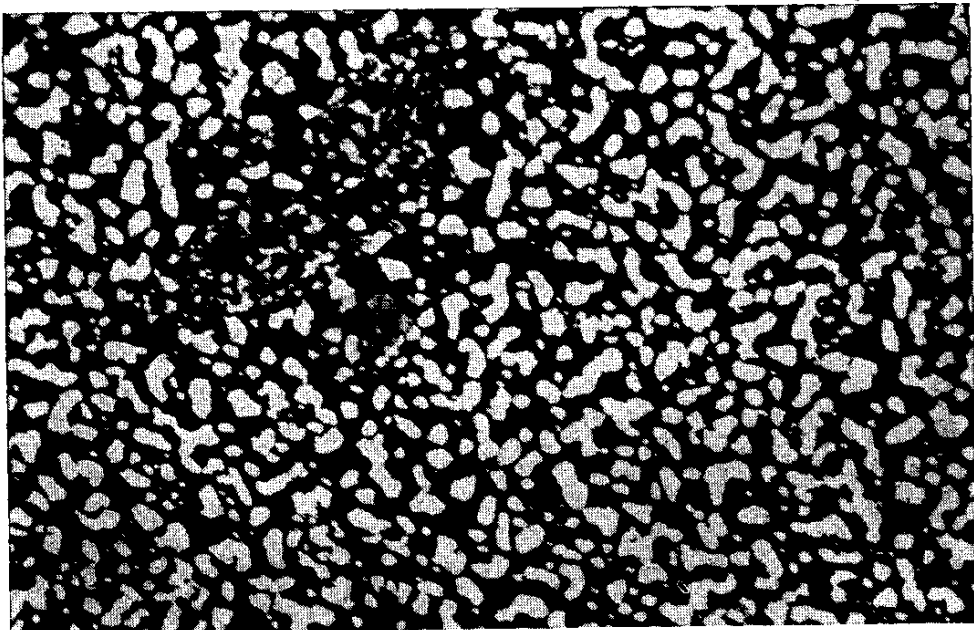


Abb. 8. Folie 0731, $d = 550$ Å. Etwa 3 Stunden Hg-Dampf einwirkung, Elektronenbild 4000:1

Durchlässigkeit nimmt mit der Dauer des Bombardements zu¹⁾ (S. 177). Eine ähnliche Erscheinung ist auch im Elektronenmikroskop bei amalgamierten Folien, nie jedoch bei anderen beobachtet worden. Hier ist der Versuch, die Folie 0563 durch Elektronenbombardement durchlässiger zu machen, erfolglos geblieben. Es könnte also sein, daß die größere Durchlässigkeit der

Folien von Katz ebenso wie die der hier zuerst untersuchten 0471 auf eine kurzzeitige Einwirkung von Quecksilberdampf zurückzuführen ist. Eine solche (schon weiter fortgeschrittene) Strukturänderung zeigt Abb. 8.

Nach allen vorliegenden Versuchsergebnissen muß man annehmen, daß die Durchlässigkeit der Folien von Katz ebenfalls durch Löcher verursacht wurde. Es ist demnach 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. B. die von Becker⁶⁾ an Nickelfolien, 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 weiter unbestimmt, doch kann angegeben werden, daß er sehr wahrscheinlich entgegen den bisherigen Annahmen größer als 10^7 cm^{-1} ist.

Die Untersuchungen sind 1952/53 als Diplomarbeit im Physikalischen Institut der Technischen Universität Berlin-Charlottenburg durchgeführt worden. Herrn Professor Dr. C. Ramsauer und Herrn Dr. H. Thiel danke ich für Anregung und Betreuung der Arbeit, Herrn Dipl.-Ing. E. Krämer für die elektronenmikroskopischen Aufnahmen und Herrn Dr. A. Weber für wertvolle Hinweise und Diskussionen. Außerdem bin ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Gesellschaft der Freunde der TU für die wesentliche Förderung durch Bereitstellung von Geräten zu großem Dank verpflichtet.

⁶⁾ A. Becker, Ann. Physik (5) 2, 249 (1929).

Berlin-Charlottenburg, Physikalisches Institut der Technischen Universität.

Bei der Redaktion eingegangen am 7. Dezember 1954.