

Über die Sekundäremission reiner Metallschichten im ungeordneten und geordneten Zustand und deren Durchlässigkeit für Sekundärelektronen.

Von R. Suhrmann und W. Kundt¹⁾.

Mit 10 Abbildungen. (Eingegangen am 30. Oktober 1942.)

Auf einer gekühlten Glasunterlage (83° abs.) werden im Vakuum dünne, zum Teil undurchsichtige kompakte Schichten von Cu, Ag, Au und Be kondensiert und die Sekundärelektronenausbeute bei 83° abs. in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung der Primärelektronen gemessen. Durch vorübergehende Erwärmung auf Zimmertemperatur gehen die Metallschichten aus dem ungeordneten in den geordneten Zustand über. Im geordneten Zustand ist die Sekundärausbeute besonders für schnelle Primärelektronen kleiner als im ungeordneten. Zur Klärung dieser Beobachtung wird die Durchlässigkeit dünner Metallfilme für Sekundärelektronen untersucht, indem auf einer gekühlten (83° abs.) hoch emittierenden Be-Kathode Cu-, Ag- oder Be-Dampf als dünner Film kondensiert wird, den die an der Be-Kathode ausgelösten Sekundärelektronen durchdringen müssen. Der im ungeordneten Zustand kondensierte Metallfilm geht durch Erwärmen auf Zimmertemperatur in den geordneten Zustand über. Seine Durchlässigkeit für die an der hoch emittierenden Unterlage ausgelösten Sekundärelektronen nimmt hierdurch zu, und zwar für die von schnellen Primärelektronen frei gemachten stärker als für die durch langsame ausgelösten. Auf Grund der Durchdringungsversuche ergibt sich, daß die Abnahme der Sekundäremission kompakter Metallschichten beim Übergang in den geordneten Zustand nur zum Teil auf das bessere Eindringungsvermögen der Primärelektronen zurückgeführt werden kann. Zur Deutung der Erscheinung muß außerdem angenommen werden, daß die Zahl der Primärelektronen absorbierenden oder die Zahl der Sekundärelektronen emittierenden Zentren im geordneten Zustand kleiner ist als im ungeordneten.

1. Problemstellung.

Um in den Emissionsmechanismus sekundärer Elektronen, die an der reinen Oberfläche eines Metalls ausgelöst werden, Einblick zu gewinnen, erscheint es zweckmäßig, den Einfluß der kristallinen Struktur auf die Größe des Ausbeutefaktors I_s/I_p von Sekundärelektronenstrom I_s zu Primärelektronenstrom I_p zu untersuchen. Dahingehende Versuche wurden von R. Kollath²⁾ durchgeführt, der im besten Vakuum auf einem bei 1500° C ausgeheizten Wolframblech bei Zimmertemperatur Beryllium in kompakter Schicht kondensierte und im Maximum der Ausbeute als Funktion des Beschleunigungspotentials V der Primärelektronen für I_s/I_p zunächst

¹⁾ D 85. Eine kurze Veröffentlichung erfolgte in den Naturwissensch. 27, 548, 707, 1939. — ²⁾ R. Kollath, Ann. d. Phys. 33, 285, 1938.

einen Wert von 0,4 bis 0,6 erhielt. Wurde das W-Blech und damit die Be-Schicht vorübergehend bis auf 700° C erhitzt, so war keine Änderung der Sekundäremission festzustellen; eine Erhitzung auf 750° C und darüber ließ die Emission jedoch anwachsen, so daß die bei Zimmertemperatur gemessene Ausbeute schließlich Werte über 4 aufwies. Kollath vermutet, daß strukturelle Umlagerungen in der Schicht, z. B. Kristallisationserscheinungen, diese starke Zunahme der Ausbeute hervorrufen, daß also die Sekundäremission auch bei einkomponentigen Systemen von der kristallinen Struktur des betreffenden reinen Metalls beträchtlich abhängt.

Die Struktur einer aus dem Dampfzustand kondensierten Metallschicht kann nun wesentlich beeinflußt werden, wenn man den Metaldampf im Hochvakuum auf einer stark (z. B. mit flüssiger Luft) gekühlten Unterlage niederschlägt¹⁾. Die Schicht kondensiert dann im ungeordneten Zustand und geht mit Erhöhung der Temperatur bis auf Zimmertemperatur irreversibel in einen geordneteren Zustand über. Wie groß die strukturellen Unterschiede zwischen den beiden Zuständen sind, geht am besten daraus hervor, daß die elektrische Leitfähigkeit eines gut leitenden Metalls auf das Vielfache, das Lichtreflexionsvermögen für $\mathcal{E}||$ auf das Doppelte beim Übergang aus dem ungeordneten in den geordneten Zustand anwachsen kann. Die ungeordnete Metallschicht besitzt einen extrem hohen Zusatzwiderstand, wie er an kristallinem Material durch Kaltverformung bisher nicht erreicht wurde. Die Unordnung in der frisch kondensierten Metallschicht wirkt sich also in der gleichen Weise, aber wesentlich stärker aus wie abnorm große, durch Kaltverformung hervorgerufene Verzerrungen des Kristallgitters beim kristallinen Material.

Da man also die Struktur der bei 88° abs. kondensierten Metallschichten in so hohem Maße verändern kann, ohne sie auf Temperaturen erhitzen zu müssen, bei denen chemische Veränderungen eine Rolle spielen können, haben wir im folgenden die Sekundäremission von Cu-, Ag-, Au- und Be-Schichten untersucht, die wir im Hochvakuum bei 88° abs. aus dem Dampfzustand kondensierten und nach und nach bis auf Zimmertemperatur erwärmten. Zur Messung kühlten wir die Schicht jedesmal wieder auf 88° abs. ab. Um die Ergebnisse deuten zu können, war es erforderlich, die Elektronendurchlässigkeit aufgedampfter dünner Metallschichten im ungeordneten und geordneten Zustand zu untersuchen. Zu diesem Zwecke konden-

¹⁾ R. Suhrmann u. G. Barth, Phys. ZS. **35**, 971, 1934; **36**, 843, 1935; ZS. f. Phys. **103**, 133, 1936; R. Suhrmann u. W. Berndt, ebenda **115**, 17, 1940; R. Suhrmann u. H. Schnackenberg, ebenda **119**, 287, 1942. Dort auch weitere Literaturhinweise.

sierten wir in einer weiteren Versuchsreihe dünne für langsame Elektronen durchlässige Cu-, Ag- oder Be-Schichten auf einer vorher hergestellten und auf 830 abs. gekühlten Unterlage hoher Sekundärelektronenausbeute und ermittelten die Veränderung der Ausbeute beim vorübergehenden Erwärmen dieses Systems auf Zimmertemperatur.

2. Versuchsanordnung.

a) *Untersuchungsgefäß.* Nach einigen Vorversuchen mit einer Dreielektrodenröhre wurde die in Fig. 1 dargestellte Versuchszelle aus Wolframglas benutzt. Das untere Ansatzrohr enthielt die zur Erzeugung eines scharfen Elektronenstrahls erforderliche Elektronenkanone mit der Wolframwendel K und den Blenden B_1 und B_2 aus vakuumgeschmolzenem Nickelblech. K bestand aus 0,1 mm dickem Draht, der mit etwa 0,75 Amp. geheizt wurde. Die Öffnung des Wehnelt-Zylinders B_1 betrug 5 mm, die der Blende B_2 2 mm. Ihre Längen waren 25 bzw. 8 mm.

Der Elektronenkanone gegenüber befand sich das untere abgeflachte Ende P eines Glasrohres R , in das flüssige Luft eingefüllt werden konnte. Auf P konnte von den Heizwendeln S_1 , S_2 und S_3 aus das zu untersuchende Metall aufgedampft werden. Um die Widerstandsänderung der auf P kondensierten als Prallektrode dienenden Metallschicht verfolgen zu können, liefen zwei Drähte aus vakuumgeschmolzenem Nickel von den oberen beiden Wolfram-Einsmelzungen E an den Rand der kreisförmig ausgebildeten Glasfläche P . Einer der Drähte wurde gleichzeitig als Zuführung für das Prallanodenpotential benutzt.

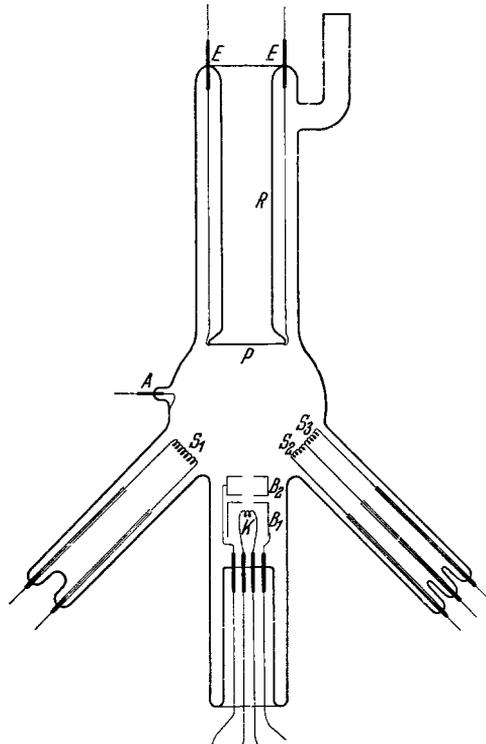


Fig. 1. Versuchszelle.

Die beim Aufdampfen der Prallelektrode auf der Innenseite der Kugel kondensierte Metallschicht diente als Sauganode. Zwei Einschmelzungen A sorgten für elektrischen Kontakt.

Um eine große Wärmekapazität der Prallelektrode zu erhalten und störende Aufladungen durch die flüssige Luft zu vermeiden, wurde das Rohr R mit Kupferspänen gefüllt, die an Erde lagen. Ihre Temperatur konnte durch ein Thermoelement kontrolliert werden.

b) *Meßmethode.* Zur Messung des Primärelektronenstromes I_p und des Sekundärelektronenstromes I_s wurde eine elektrometrische Meßmethode

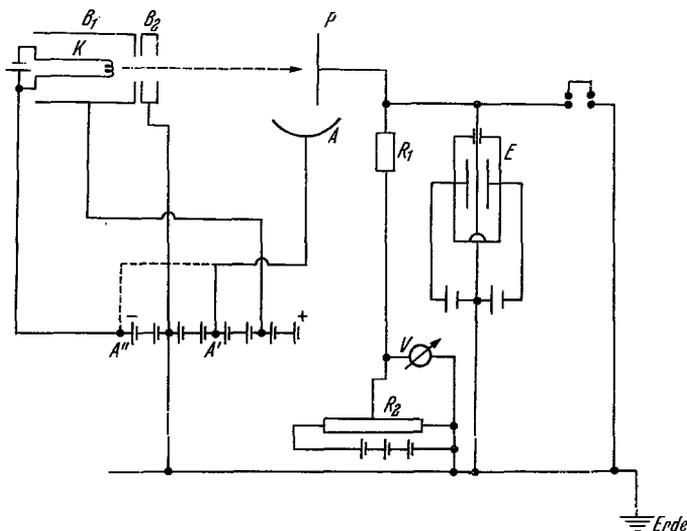


Fig. 2. Schaltung zur Messung des Primärstromes I_p und des Sekundärstromes I_s .

benutzt. Wie aus Fig. 2 zu ersehen ist, lagen die Blende B_2 und die Prallelektrode P an Erde. Der Wehnelt-Zylinder B_1 war positiver als B_2 und die Sauganode A bei der Messung von $I_s - I_p$ um etwa 20 Volt positiver als P (A'). Zur Messung von I_p war A etwa 30 Volt negativer als P (A''). Die Strommessung erfolgte durch Ermittlung des Spannungsabfalls längs des Hochohmwiderstandes R_1 von $10^{10} \Omega$. Die Kompensationsspannung wurde mit dem Präzisionsvoltmeter V gemessen; es war $R_2 \ll R_1$. Als Nullinstrument diente ein hochempfindliches Fadenelektrometer E .

Die benutzte Meßmethode gestattete, Primärströme in der Größenordnung von 10^{-9} bis 10^{-10} Amp. anzuwenden, wodurch eine unzulässige örtliche Erwärmung der Prallelektrode vermieden wurde.

Das Potential des Wehnelt-Zylinders B_1 mußte derart eingestellt werden, daß alle durch B_2 hindurchtretenden Primärelektronen auf die Prallanode gelangten. Dies geschah, indem man das Optimum des Ausbeutefaktors an einer kompakten Silberschicht bei Änderung des Potentials von B_1 unter Konstanthaltung der Potentiale von K , B_2 , P und A ermittelte. Das Potential der Sauganode A lag hierbei im Sättigungsgebiet für die Sekundärelektronen. Bei einer Beschleunigungsspannung der Primärelektronen von 400 Volt lag das für einen scharfen Elektronenstrahl erforderliche Potential von B_1 zwischen 50 und 60 Volt. Als Saugspannung zwischen Anode A und Parallelektrode P genügte bereits 20 Volt, wie Fig. 3 erkennen läßt.

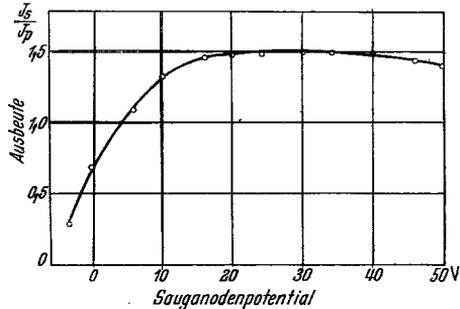


Fig. 3. I_s/I_p in Abhängigkeit vom Sauganodenpotential. Beschleunigungsspannung der Primärelektronen 400 Volt. Ag als Prallanodenmaterial.

c) *Ausführung der Messungen.* Für die Durchführung der Versuche wurden vakuumgeschmolzene Metallproben verwendet. Ehe man sie in die eigentliche Versuchszelle einführte, heizte man in einer besonderen Vakuumapparatur zunächst die Wolframwendel und dann die in ihr befindliche Metallprobe aus, bis das Metall zu verdampfen begann. Cu, Ag und Au wurden hierbei zu einem Kügelchen zusammengeschmolzen. Darauf wurden die Rohre mit den Verdampfungswendeln an die Versuchszelle angeschmolzen und die letztere an der Hochvakuumapparatur 4 bis 5 Stunden bei 350°C ausgeheizt. Die Metallteile der Elektronenkanone wurden durch Elektronenbombardement ausgeglüht und die Verdampfungswendeln bis kurz vor dem Beginn des Verdampfens der Metallproben geglüht.

Nachdem man das Glasrohr R mit flüssiger Luft gefüllt hatte, dampfte man das zu untersuchende Metall auf P auf. Der etwa 15 Minuten dauernde Aufdampfprozeß wurde durch Messung des Widerstandes der kondensierten Metallschicht kontrolliert. Nun ermittelte man die Sekundärelektronenausbeute in Abhängigkeit vom Beschleunigungspotential an der „ungeordneten“ Metallschicht und ließ darauf die flüssige Luft in R verdampfen. Nachdem sich die Metallschicht auf eine Temperatur zwischen 83°abs. und Zimmertemperatur erwärmt und hierbei in einen weniger ungeordneten Zustand übergegangen war, wie man aus der Abnahme des Widerstandes ersah, kühlte man wieder auf 83°abs. ein und nahm die Ausbeutekurve von

neuem auf. Schließlich ließ man die Metallschicht sich bis Zimmertemperatur erwärmen, kühlte wieder ein und ermittelte die Ausbeutekurve im „geordneten“ Zustand.

3. Sekundärelektronenausbeute von Cu-, Ag-, Au- und Be-Schichten im ungeordneten und geordneten Zustand.

a) *Kupfer*. Fig. 4a und 4b zeigen das Verhalten von Cu-Schichten in zwei verschiedenen Versuchen. In beiden Fällen betrug der anfängliche Schichtwiderstand 21Ω nach der Kondensation bei 83° abs. Nach vorübergehender Erwärmung auf 243° abs. und Wiedereinkühlung auf 83° abs. betrug

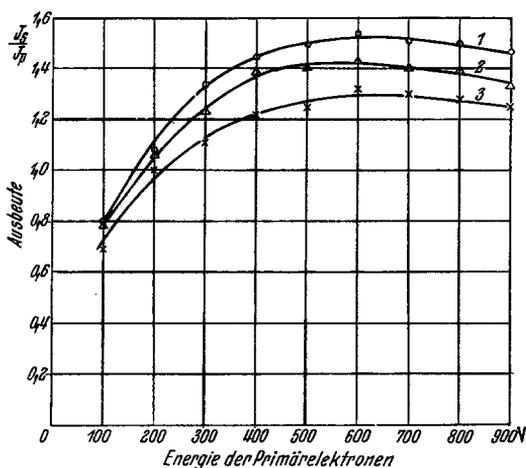


Fig. 4a. Sekundärelektronenausbeute der Cu-Schicht I nach der Kondensation bei 83° abs. (1) im ungeordneten Zustand und bei zunehmender Ordnung nach vorübergehender Erwärmung auf 243° abs. (2) und Zimmertemperatur (3); Anfangswiderstand bei 83° abs.: 21Ω .

der Widerstand von Cu I (Fig. 4a) 15Ω . Die Ausbeutekurve 2 liegt im Maximum um etwa 7% niedriger als 1. Der Ordnungsvorgang ist jedoch noch nicht beendet. Nachdem die Schicht einige Stunden bei Zimmertemperatur geblieben war und wieder eingekühlt wurde, war die Ausbeute noch weiter gesunken¹⁾ (Kurve 3); insgesamt nahm die Ausbeute bei 700 Volt von Kurve 1 auf 3 mit zunehmender Ordnung von 1,53 auf 1,30 ab, also um 15%.

Die gute Wiederholbarkeit der Erscheinung ersieht man aus Fig. 4b. Bei diesem Versuch wurde nach Ermittlung von Kurve 1 unmittelbar nach

¹⁾ Die weitere Widerstandsabnahme konnte nicht mehr ermittelt werden, da eine der beiden Elektroden beim Wiedereinkühlen abgeplatzt war, was im Laufe der Versuche öfters vorkam; für die Messung der Sekundärelektronenausbeute war dieser Umstand wegen des Vorhandenseins der zweiten Elektrode bedeutungslos.

der Kondensation bei 83° abs. direkt auf Zimmertemperatur erwärmt und nach einiger Zeit wieder eingekühlt und gemessen (Kurve 2). Da die Schicht zu Anfang eine etwas kleinere Ausbeute (1,44) zeigt als bei Cu I, beträgt die Abnahme von 1,44 auf 1,33 nur 8%. Wahrscheinlich war die anfängliche Unordnung, die sehr von den Aufdampfbedingungen (Aufdampfgeschwindigkeit, Temperatur der Aufdampfspirale) abhängt¹⁾, beim ersten Versuch größer als beim zweiten.

Nach der Aufnahme von Kurve 2 wurde nochmals auf Zimmertemperatur erwärmt und die Ausbeute bei dieser Temperatur ermittelt. Wie die eingetragenen Punkte (Dreiecke) zeigen, stimmen die Werte innerhalb

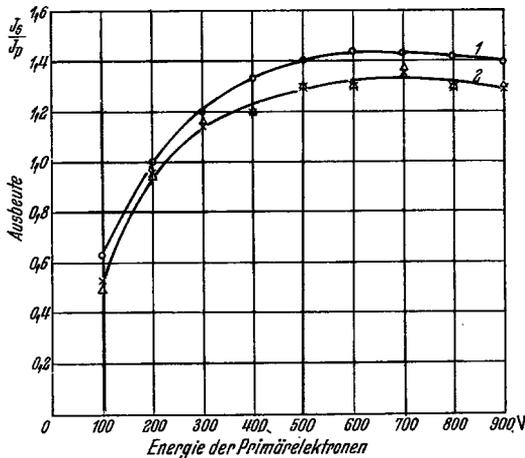


Fig. 4 b. Sekundärelektronenausbeute der Cu-Schicht II nach der Kondensation bei 83° abs. (1) im ungeordneten Zustand und bei größerer Ordnung nach vorübergehender Erwärmung auf Zimmertemperatur [(2) Kreuze: gemessen bei 83° abs.; Dreiecke: gemessen bei 293° abs.]; Anfangswiderstand bei 83° abs.: 21 Ω .

der Meßfehlergrenzen mit den bei 83° abs. gemessenen überein. Ein bemerkbarer Temperatureinfluß ist also nach dem Übergang in den geordneten Zustand zwischen 83° abs. und 293° abs. nicht vorhanden²⁾.

Die an Cu im geordneten Zustand erhaltenen Ausbeutewerte I_s/I_p von 1,30 und 1,33 an dem bei $V_m = 700$ Volt gelegenen Maximum stimmen mit den neueren Literaturwerten gut überein: Warnecke³⁾ findet $I_s/I_p = 1,27$ bei $V_m = 600$ Volt; Bruining und De Boer⁴⁾ geben an $I_s/I_p = 1,29$ bei $V_m = 600$ Volt.

¹⁾ Vgl. R. Suhrmann u. H. Schnackenberg, l. c. — ²⁾ Auch bei den übrigen Metallen wurde bei reinen Oberflächen, nachdem die betreffende Metallschicht in den geordneten Zustand übergegangen war, kein Temperatureinfluß zwischen 83 und 293° abs. festgestellt. — ³⁾ R. Warnecke, Journ. de phys. et le Radium 7, 270, 1936. — ⁴⁾ H. Bruining u. J. H. De Boer, Physica 5, 17, 1938.

b) *Silber*. Die Fig. 5a, b und c lassen das Verhalten von Ag-Schichten verschiedener Dicke erkennen, deren Anfangswiderstände bei 83° abs. 28 Ω, 61 Ω und 1000 Ω betragen. In Fig. 5a wurde jede Kurve zweimal hintereinander gemessen; man erkennt, daß die doppelt gemessenen Punkte innerhalb der Meßfehler streuen. Während Kurve 1 unmittelbar nach der Kondensation bei 83° abs. gemessen wurde, erhielt man Kurve 2 nach Erwärmung auf Zimmertemperatur und anschließender Wiedereinkühlung; der Widerstand bei 83° abs. betrug jetzt 10,2 Ω. Nach dieser Messung

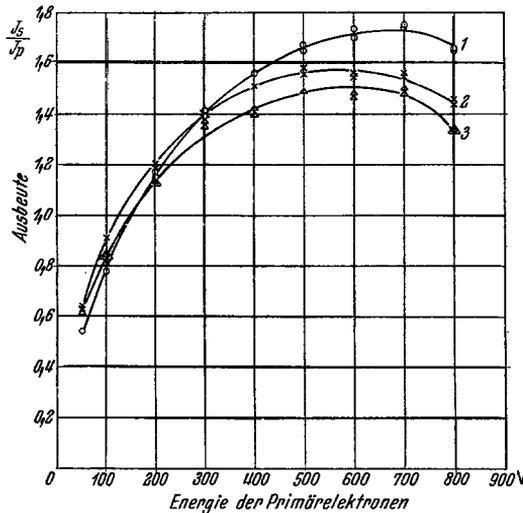


Fig. 5a. Sekundärelektronenausbeute der Ag-Schicht I nach der Kondensation bei 83° abs. (1) im ungeordneten Zustand und bei zunehmender Ordnung nach vorübergehender Erwärmung auf Zimmertemperatur (2) und 325° abs. (3); Anfangswiderstand bei 83° abs.: 28 Ω.

erwärmte man die Schicht auf etwa 325° abs. und ließ sie einen Tag stehen; der Widerstand bei 83° abs. betrug hiernach 6,6 Ω. Nach der Rückkühlung auf 83° abs. wurde Kurve 3 aufgenommen. Auch hier erkennt man, wie mit zunehmender Ordnung nicht nur der Widerstand sinkt, sondern auch die Sekundärelektronenausbeute abnimmt, und zwar von 1,73 auf 1,48, also um 14% bei 600 Volt. Das Ausbeutemaximum verschiebt sich mit zunehmender Ordnung etwas nach kleineren Spannungen; die langsameren Primärelektronen werden also bei größerer Ordnung begünstigt.

In Fig. 5b war die Schichtdicke geringer als in Fig. 5a, der Anfangswiderstand bei 83° abs. betrug 61 Ω. Nachdem die Schicht vorübergehend auf 223° abs. erwärmt und wieder eingekühlt war, erhielt man Kurve 2 und nach zweitägiger Erwärmung auf Zimmertemperatur und Wiedereinkühlen Kurve 3; der Widerstand betrug nun 13 Ω. Die Ausbeute hat

bei 600 Volt um 19% von 1,83 auf 1,49 abgenommen. Auch bei dieser Ag-Schicht ist eine deutliche Verschiebung des Ausbeutemaximums nach kleineren Spannungen zu beobachten.

Die dünnste Ag-Schicht in Fig. 5c zeigte nach dem Erwärmen auf Zimmertemperatur und Wiedereinkühlen auf 83° abs. (Kurve 2) eine Abnahme der Ausbeute bei 700 Volt um 17%, von 1,82 auf 1,52. Eine Verschiebung des Maximums und damit eine Bevorzugung der langsamen Primärelektronen im geordneten Zustand ist bei dieser dünnsten Schicht

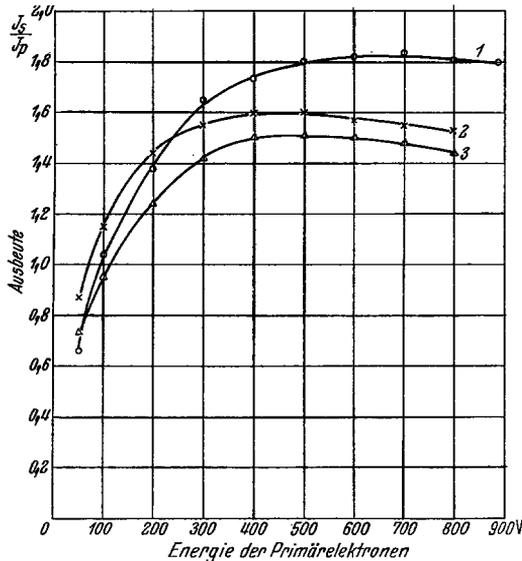


Fig. 5b. Sekundärelektronenausbeute der Ag-Schicht II nach der Kondensation bei 83° abs. (1) im ungeordneten Zustand und bei zunehmender Ordnung nach vorübergehender Erwärmung auf 223° abs. (2) und Zimmertemperatur (3); Anfangswiderstand bei 83° abs.: 61 Ω .

nicht mehr zu erkennen (Kurve 1 und 2). Auf dieser Schicht wurde nun eine sehr dicke Ag-Schicht bei 83° abs. kondensiert und ihre Ausbeute bei tiefer Temperatur vor (Kurve 1a) und nach dem Erwärmen auf Zimmertemperatur (Kurve 2a) gemessen. Man sieht, daß auch die Ausbeute an dieser zusätzlich kondensierten kompakten Schicht durch die vorübergehende Erwärmung auf Zimmertemperatur gesunken ist, und zwar beim Ausbeutemaximum $V_m = 750$ Volt von 1,84 auf 1,46, also um 21%. Trotz des Vorhandenseins der dünnen geordneten ersten Schicht kondensiert demnach die zweite Schicht bei 83° abs. im ungeordneten Zustand. Eine Benachteiligung der langsamen Primärelektronen im ungeordneten Zustand kann man auch hier feststellen, wenn man Kurve 1a und 1 einserseits, Kurve 2a und 2 andererseits miteinander vergleicht.

Zum Vergleich der Lage des Maximums $V_m = 750$ Volt und des Ausbeutewertes $I_s/I_p = 1,46$ der kompakten Ag-Schicht im geordneten Zustand seien wieder die Werte von Warnecke ($V_m = 800$ Volt, $I_s/I_p = 1,47$) und Bruining und De Boer ($V_m = 800$ Volt, $I_s/I_p = 1,56$) herangezogen.

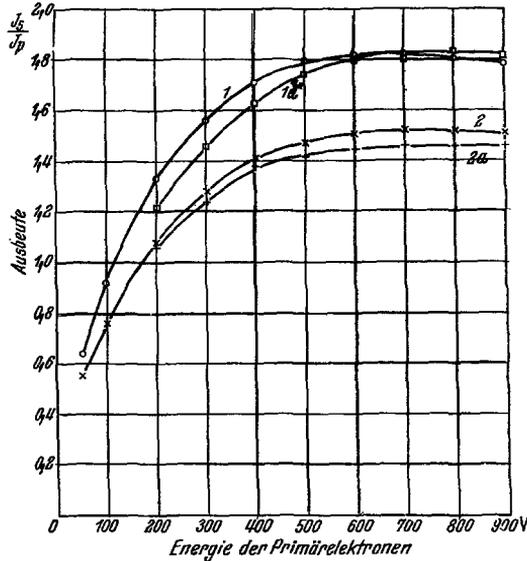


Fig. 5c. Sekundärelektronenausbeute der Ag-Schicht III nach der Kondensation bei 83° abs. (1) im ungeordneten Zustand und bei größerer Ordnung nach vorübergehender Erwärmung auf Zimmertemperatur (2); Anfangswiderstand bei 83° abs.: 1000Ω . — Sekundärelektronenausbeute an einer bei 83° abs. zusätzlich kondensierten, kompakten Ag-Schicht von einem sehr kleinen innerhalb der Meßfehlergrenze liegenden Widerstand: nach der Kondensation bei 83° abs. (1a) ungeordnet; nach vorübergehender Erwärmung auf Zimmertemperatur (2a) bei größerer Ordnung.

c) Gold. Die Versuchsergebnisse an Au-Schichten sind in Fig. 6 wiedergegeben. Die Ausbeute bei 650 Volt fiel nach vorübergehendem Erwärmen auf 249° abs. von 1,78 auf 1,63, also um 8% (Kurve 2). Nach vorübergehender Erwärmung auf Zimmertemperatur betrug sie bei 83° abs. 1,52 (Kurve 3); sie war also insgesamt durch den Übergang in den geordneten Zustand um 15% gefallen.

In einem anschließenden Versuch wurde auf dieser Schicht bei 83° abs. eine weitere, dicke Au-Schicht kondensiert. Die Ausbeutewerte der neuen Schicht (Kurve 1a) fallen mit denen der ersten im ungeordneten Zustand zusammen. Nachdem die Schicht vorübergehend auf Zimmertemperatur erwärmt und wieder eingekühlt worden war (Kurve 3a), hatte die Ausbeute bei 650 Volt von 1,78 auf 1,47, also um 17% abgenommen.

Auch die Au-Kurven lassen wie die Ag-Kurven erkennen, daß die langsamen Primärelektronen im Verhältnis zu den schnellen im geordneten Zustand mehr Sekundärelektronen frei machen als im ungeordneten. Die Werte von 1,52 und 1,47 beim Maximum von 650 Volt stimmen mit dem

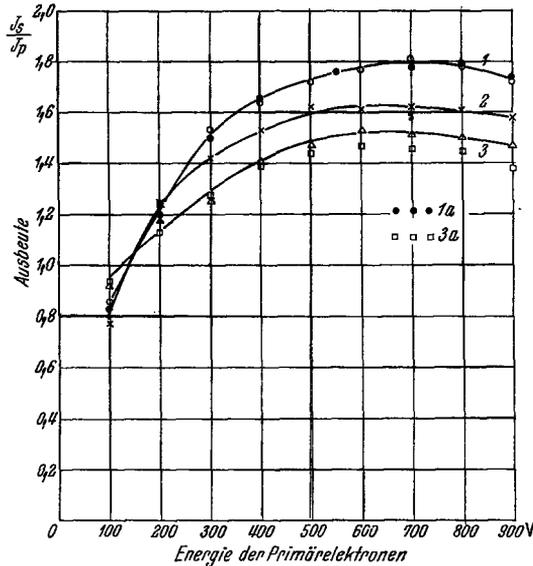


Fig. 6. Sekundärelektronenausbeute einer Au-Schicht nach der Kondensation bei 83° abs. (1) im ungeordneten Zustand und bei zunehmender Ordnung nach vorübergehender Erwärmung auf 243° abs. (2) und Zimmertemperatur (3); Anfangswiderstand bei 83° abs.: 25,8 Ω. — Sekundärelektronenausbeute an einer zusätzlich bei 83° abs. kondensierten dicken Au-Schicht nach der Kondensation bei 83° abs. (1a) im ungeordneten und nach vorübergehender Erwärmung auf Zimmertemperatur (3a) geordneten Zustand.

von Warnecke erhaltenen ($V_m = 800$ Volt, $I_s/I_p = 1,46$) gut überein. Die Werte für I_s/I_p am Ausbeutemaximum für Cu-, Ag und Au-Schichten betragen bei gleicher Herstellungsweise und unter Berücksichtigung nur der dickeren Schichten 1,31 für Cu, 1,46 für Ag und 1,47 für Au; sie liegen also in dieser Gruppe des periodischen Systems wie die Atomvolumina, deren Werte 7,1; 10,3 und 10,2 betragen.

d) *Beryllium*. Die Sekundäremission einer Be-Schicht von 50 Ω Widerstand unmittelbar nach der Kondensation bei 83° abs. zeigt Kurve 1 in Fig. 7. Nach vorübergehender Erwärmung auf Zimmertemperatur ist der Widerstand bei 83° abs. auf 20,6 Ω gesunken. Die Ausbeute (Kurve 2), deren Maximum bei 200 Volt liegt, hat sich an dieser Stelle durch den Übergang der Schicht zu größerer Ordnung von 0,655 bis 0,630 vermindert, also nur um 4%. Für die schnellen Primärelektronen hingegen ist die Abnahme der Ausbeute wesentlich größer: Bei 800 Volt z. B. 26%. Auch hier werden

demnach die langsamen Primärelektronen beim Übergang in den geordneten Zustand bevorzugt.

An aufgedampften Be-Schichten fanden Bruining und De Boer $V_m = 200$ Volt, $I_s/I_p = 0,53$; Kollath $V_m = 300$ Volt, $I_s/I_p = 0,42$;

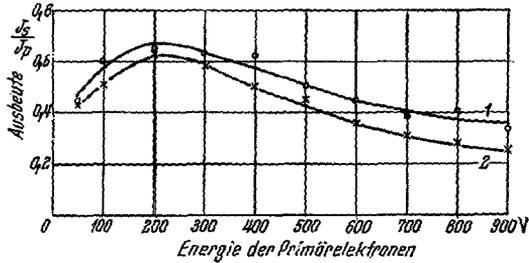


Fig. 7. Sekundärelektronenausbeute einer Berylliumschicht nach der Kondensation bei 83° abs. (1) im ungeordneten Zustand und bei größerer Ordnung nach vorübergehender Erwärmung auf Zimmertemperatur (2); Anfangswiderstand bei 83° abs.: 50Ω .

Schneider¹⁾ $V_m = 200$ Volt, $I_s/I_p = 0,90$; Görlich²⁾ $V_m = 280$ Volt, $I_s/I_p = 0,8$. Die obigen Werte ordnen sich also gut in die der genannten Autoren ein.

4. Durchlässigkeit aufgedampfter dünner Metallschichten im ungeordneten und geordneten Zustand für Sekundärelektronen.

Nach Versuchen von Katz³⁾ nimmt die Durchlässigkeit dünner Metallfolien besonders für langsame Elektronen zu, wenn diese Folien durch Erwärmen rekristallisiert werden. Die Begünstigung der langsamen Primärelektronen gegenüber den schnelleren, nach Überführung der bei 83° abs. kondensierten ungeordneten Metallschicht in einen geordneteren Zustand, könnte also durch das tiefere Eindringungsvermögen der langsamen Primärelektronen in die geordnete Schicht erklärt werden. Man sollte nun erwarten, daß erst recht die Sekundärelektronen, deren Energie nach dem Verlassen der Parallelektrode bei nur etwa 10 e-Volt liegt⁴⁾, durch die geordnete Metallschicht besser hindurchdringen könnten als durch die ungeordnete, daß also die Ausbeute mit zunehmender Ordnung anwachsen würde. Da die Versuche eine Abnahme der Sekundäremission beim Übergang der Schicht aus dem ungeordneten in den geordneten Zustand ergaben, mußte man, um hierfür eine Deutung finden zu können, zunächst die Durchlässigkeit für Sekundärelektronen von Metallschichten, die bei 83° abs. kondensiert

¹⁾ E. G. Schneider, Phys. Rev. **54**, 185, 1938. — ²⁾ P. Görlich, Phys. ZS. **42**, 129, 1941. — ³⁾ H. Katz, Phys. ZS. **38**, 981, 1937. — ⁴⁾ E. Rudberg, Proc. Roy. Soc. London (A) **127**, 111, 1930.

wurden, nach vorübergehender Erwärmung auf Zimmertemperatur untersuchen.

Solche Versuche führten wir an dünnen Cu-, Ag- und Be-Schichten in folgender Weise durch. Wir stellten zunächst eine hoch emittierende Sekundärkathode als Prallelektrode her, indem wir eine Be-Schicht auf die Glasunterlage aufdampften und diese in Sauerstoff von vermindertem Druck auf etwa 350° C erwärmten¹⁾, etwa 2 Stunden lang. Dann wurde der Sauerstoff abgepumpt und die Zelle gründlich ausgeheizt. Die maximale Ausbeute derartiger Schichten lag um $I_s/I_p = 4$. Auf dieser sensibilisierten Schicht kondensierten wir nun bei 83° abs. die dünne Metallschicht, deren Durchlässigkeit für Sekundärelektronen geprüft werden sollte, und nahmen die Ausbeutekurve bei 83° abs. auf, einmal unmittelbar nach der Kondensation, ein andermal nach vorübergehender Erwärmung bis zu Zimmertemperatur. An der Höhe der Ausbeutekurve und ihrer Form hatten wir ein Kriterium dafür, ob die in der darunterliegenden sensibilisierten Be-Schicht ausgelösten Sekundärelektronen die aufliegende Metallschicht noch zu durchdringen vermochten, und ob sich ihr Durchdringungsvermögen beim Übergang der Metallschicht in einen geordneteren Zustand änderte.

a) *Kupfer*. In Fig. 8 stellt Kurve 1 die Ausbeute der mit Sauerstoff behandelten Be-Oberfläche dar. Das Maximum dieser Kurve liegt etwas oberhalb 300 Volt. Nachdem bei 83° abs. auf dieser hoch emittierenden Schicht eine dünne Cu-Schicht kondensiert worden war, wurde Kurve 2 erhalten, deren Maximum bei etwa 400 Volt liegt. Da das Emissionsmaximum einer kompakten auf Glas kondensierten Cu-Schicht bei etwa 700 Volt gelegen ist, sind die in Kurve 2 gemessenen Sekundärelektronen offensichtlich der Berylliumunterlage zuzuschreiben, von der aus sie die dünne Cu-Schicht durchdringen.

Nachdem die Schicht auf 243° abs. erwärmt und wieder rückgekühlt worden war, erhielten wir Kurve 3, und nach dem Erwärmen auf 293° abs. und Wiedereinkühlen Kurve 4. Schließlich wurde die Schicht 12 Stunden auf 293° abs. erwärmt und wieder auf 83° abs. eingekühlt. Die Messung ergab jetzt Kurve 5. Man erkennt, daß sich die Ausbeutekurve der die Cu-Schicht durchdringenden Be-Elektronen mit zunehmender Ordnung der Cu-Schicht nach höheren Ausbeutewerten verlagert, während das Maximum an der gleichen Stelle bleibt. Die Durchlässigkeit der Cu-Schicht für die Be-Sekundärelektronen wächst also mit zunehmendem Ordnungsgrad an. Auch die Höhe des Ausbeutemaximums $I_s/I_p = 2,0$ gegenüber

¹⁾ R. Kollath, Ann. d. Phys. **33**, 290, 1938.

$I_s/I_p = 1,3$ einer geordneten kompakten Cu-Schicht auf Glas läßt erkennen, daß die gemessenen Sekundärelektronen im wesentlichen der Be-Schicht entstammen.

Insgesamt nimmt die Ausbeute durch den Übergang der aufgedampften Cu-Schicht in den geordneten Zustand bei 400 Volt von $I_s/I_p = 1,58$ auf

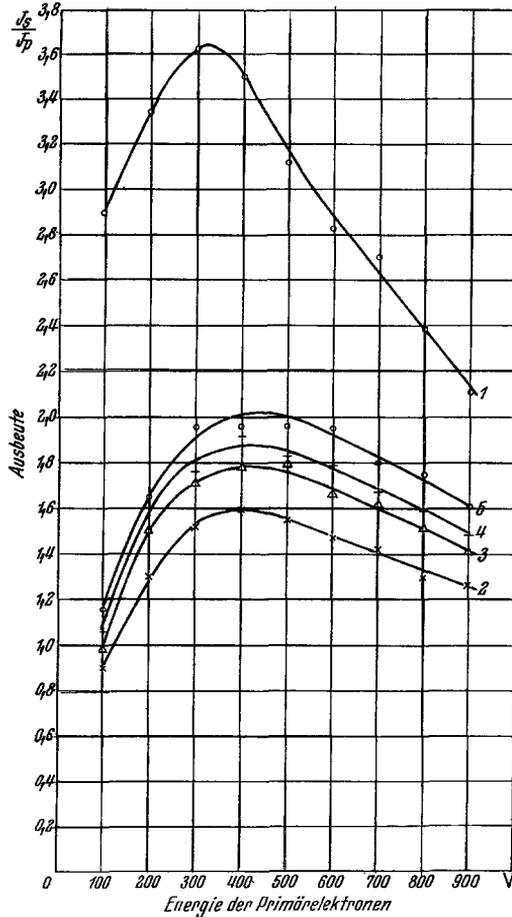


Fig. 8. Sekundärelektronenausbeute einer sensibilisierten Be-Kathode (1) nach der Kondensation einer dünnen Cu-Schicht bei 83° abs. im ungeordneten Zustand (2) und nach dem Übergang dieser Cu-Schicht in Zustände größerer Ordnung durch vorübergehende Erwärmung auf 243° abs. (3), 293° abs. (4) und 12 Stunden dauernde Erwärmung auf 293° abs. (5).

2,00, also um 27%, zu. Bei 800 Volt wächst sie von $I_s/I_p = 1,30$ auf 1,72, also um 32% an.

b) Silber. Die Versuche an zusätzlich bei 83° abs. aufgedampften Ag-Schichten bestätigen die voranstehenden Ergebnisse an zusätzlichen

Cu-Schichten. Kurve 1 in Fig. 9 zeigt wieder die Ausbeute der als Unterlage dienenden sensibilisierten Be-Schicht, deren maximale Ausbeute noch etwas höher liegt als in Fig. 8.

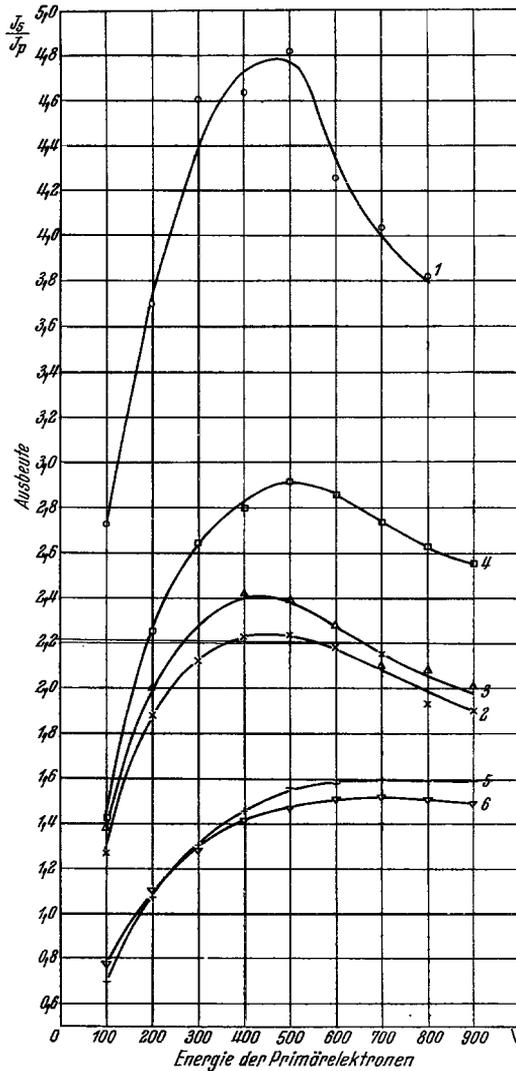


Fig. 9. Sekundärelektronenausbeute einer sensibilisierten Be-Kathode (1) nach der Kondensation einer dünnen Ag-Schicht bei 83° abs. im ungeordneten Zustand (2) und nach dem Übergang dieser Ag-Schicht in Zustände größerer Ordnung durch vorübergehende Erwärmung auf 243° abs. (3) und 293° abs. (4). — Kurve 5: Nach der zusätzlichen Kondensation einer ungeordneten dicken Ag-Schicht bei 83° abs.; Kurve 6: Nach dem Übergang dieser Ag-Schicht in einen geordneteren Zustand durch vorübergehende Erwärmung auf 273° abs.

Nachdem auf dieser bei 83° abs. eine dünne Ag-Schicht kondensiert worden war, wurde Kurve 2 in Fig. 9 gemessen. Wir erwärmten die Schicht nun vorübergehend auf 243° abs., kühlten wieder ein und erhielten Kurve 3. Nach abermaligem Erwärmen, jetzt auf 293° abs. und Wiedereinkühlung ergab sich Kurve 4. Die Ausbeute bei 500 Volt hat infolge des Ordnungsvorganges von 2,24 auf 2,89, also um 29% zugenommen; bei 800 Volt ist sie von 1,97 auf 2,64, also um 34% angewachsen. Wiederum liegt das Maximum der Ausbeutekurve in der Nähe des Maximums der sensibilisierten Be-Schicht und jedenfalls bei weitem unterhalb des Maximums einer kompakten geordneten Ag-Schicht, das bei 750 Volt gefunden worden war. Auch die Höhe der Ausbeutekurven ist wesentlich größer als die einer kompakten Ag-Schicht mit $I_s/I_p = 1,46$.

Bemerkenswert ist, daß ebenso wie bei der Cu-Schicht auch bei der Ag-Schicht I_s/I_p für die schnellen Primärelektronen stärker anwächst als für die langsameren, wenn die von den Be-Sekundärelektronen durchdrungene Metallschicht aus dem ungeordneten in den geordneten Zustand übergeht. Die Erklärung hierfür ist wohl darin zu suchen, daß bei den von den *schnellen* Primärelektronen in der Be-Kathode ausgelösten Sekundärelektronen die stärker abgebremsten wegen der größeren Eindringtiefe der schnellen Elektronen überwiegen. Für diese macht sich also die größere Durchlässigkeit, welche die aufgedampfte Metallschicht im geordneten Zustand besitzt, besonders auffällig bemerkbar.

Um ein weiteres Kriterium dafür zu haben, daß der Anstieg der Ausbeutekurven bei den Versuchen in Fig. 8 und 9 auf eine Zunahme der Durchlässigkeit und nicht etwa auf unbekannte Versuchsfehler zurückzuführen ist, kondensierten wir auf der dünnen Ag-Schicht, nachdem sie in den geordneten Zustand übergegangen war (Kurve 4), eine weitere aber dicke Ag-Schicht bei 83° abs., also im ungeordneten Zustand. Die Ausbeutekurve dieser Schicht zeigt Kurve 5* in Fig. 9. Ihr Maximum liegt bei 700 bis 800 Volt, also so, wie es in den ersten Versuchen an kompakten Ag-Schichten gefunden worden war. Nach kurzzeitiger Erwärmung auf 273° abs. und Wiedereinkühlung liegt die Ausbeute (Kurve 6) nun tiefer; sie ist wie bei kompakten Ag-Schichten durch die Zunahme des Ordnungsgrades gesunken, und zwar für schnelle Primärelektronen stärker als für langsame: Wie in Fig. 5a die Kurven 1 und 3, überschneiden sich daher auch die Ausbeutekurven 5 u. 6 bei kleineren Voltzahlen. Die Ausbeute der noch nicht vollständig geordneten Ag-Schicht beträgt 1,52, während oben 1,46 erhalten wurde. Diese dicke Ag-Schicht konnte offensichtlich von etwaigen in der Be-Schicht noch ausgelösten Sekundärelektronen nicht mehr durchdrungen werden.

c) *Beryllium*. Auch die Versuche mit einer dünnen auf einer für Sekundärelektronen sensibilisierten Be-Kathode bei 83° abs. kondensierten Be-Schicht zeigen, daß die Durchlässigkeit der dünnen Metallschicht für Sekundärelektronen im ungeordneten Zustand geringer ist als im geordneten.

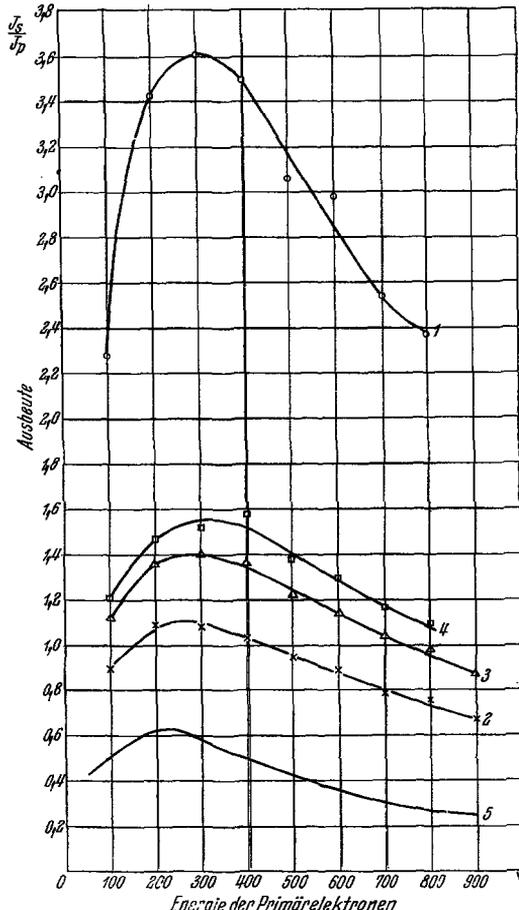


Fig. 10 Sekundärelektronenausbeute einer sensibilisierten Be-Kathode (1); nach der Kondensation einer dünnen Be-Schicht bei 83° abs. (2) im ungeordneten Zustand und nach dem Übergang dieser Schicht in Zustände größerer Ordnung durch vorübergehende Erwärmung auf 243° abs. (3) und Zimmertemperatur (4). — Ausbeute einer kompakten geordneten Be-Schicht (5).

Bei dem in Fig. 10 wiedergegebenen Versuch wurde auf die Schicht hoher Ausbeute von $I_s/I_p = 3,6$ bei 83° abs. Be-Dampf kondensiert, so daß die Ausbeute auf 1,1 zurückging, ein Wert, der noch oberhalb des für eine kompakte geordnete Be-Schicht erhaltenen Wertes 0,63 liegt (Kurve 5). Die Schicht war also noch durchlässig für einen Teil der von der sensibilisierten

sierten Unterlage emittierten Sekundärelektronen, wie man auch an der Lage des Maximums bei 270 Volt, das zwischen dem der kompakten Schicht (Kurve 5; 200 Volt) und der unbedampften sensibilisierten Schicht (Kurve 1; 300 Volt) gelegen ist.

Geht die bei 83° abs. aufgedampfte Be-Schicht durch vorübergehendes Erwärmen auf 243° abs. (Kurve 3) und Zimmertemperatur (Kurve 4) in geordnetere Zustände über, so wächst die beobachtete Sekundäremission an, und zwar von 1,10 auf 1,56 bei 300 Volt, d. h. um 42%. Gleichzeitig verschiebt sich das Maximum bis an die Stelle, an der die sensibilisierte Unterlage ihr Ausbeutemaximum aufweist. Die Durchlässigkeit der aufgedampften Schicht wächst also mit zunehmender Ordnung an, und zwar bei 300 Volt um 42% und bei 800 Volt um 48%. Auch hier macht sich die größere Durchlässigkeit der geordneten Schicht für Sekundärelektronen stärker bemerkbar, wenn die Energie der auslösenden Primärelektronen groß ist.

5. Deutung der Versuchsergebnisse.

Zunächst ist die Frage zu diskutieren, ob die beobachtete Zunahme der *Elektronendurchlässigkeit* beim Übergang der Metallschichten aus dem ungeordneten in den geordneten Zustand nicht vielleicht auf das bessere Durchdringungsvermögen der *Primärelektronen* zurückzuführen ist. Wäre dies der Fall, so müßten die langsamen Primärelektronen durch die aufgedampfte ungeordnete Schicht stärker gebremst werden als die schnellen. Die Ausbeute sollte also beim Übergang in den geordneten Zustand für die schnellen Primärelektronen nur wenig, für die langsamen dagegen stark anwachsen. Tatsächlich wird das Gegenteil beobachtet: Die Ausbeute nimmt entweder gleichmäßig über den ganzen Energiebereich oder für die schnellen Primärelektronen etwas stärker zu als für die langsamen (Fig. 10 Kurve 2 und 4; Fig. 8, Kurve 2 und 5; Fig. 9, Kurve 2 und 4). Gebremst werden durch die Aufdampfschicht also vor allem die im Verhältnis zu den Primärelektronen sehr langsamen *Sekundärelektronen*, deren *Anfangsenergie* unabhängig von der Primärelektronenenergie ist. Nur wenn sie aus größerer Tiefe der sensibilisierten Kathode stammen, wie dies bei Auslösung durch energiereichere Primärelektronen zutrifft, haben die Sekundärelektronen schon beim Durchdringen der sensibilisierten Unterlage Energieverluste erlitten und besitzen daher vor dem Eintritt in die Aufdampfschicht im Durchschnitt eine geringere Geschwindigkeit als die durch langsamere Primärelektronen ausgelösten. Für sie wirkt sich die Zunahme der Durchlässigkeit der Aufdampfschicht beim Übergang in den geordneten

Zustand besonders stark aus und äußert sich in einem stärkeren Anwachsen der durch schnellere Primärelektronen ausgelösten Sekundärelektronen, wie z. B. in Fig. 9, Kurve 2 und 4 zu erkennen ist.

Da die Durchlässigkeit der *Aufdampfschicht* für *Sekundärelektronen* im geordneten Zustand *größer* ist als im ungeordneten, kann die *Abnahme* der Sekundäremission *kompakter* Metallschichten beim Übergang in den geordneten Zustand, wie sie in Abschnitt 3 geschildert wurde, nicht etwa auf eine *Abnahme der Durchlässigkeit* dieser Schichten für Sekundärelektronen zurückgeführt werden. Auch die Durchlässigkeit der *kompakten* Metallschichten für Sekundärelektronen muß auf Grund der Durchdringungsversuche im geordneten Zustand größer sein als im ungeordneten.

Man könnte zunächst versuchen, die geringere Sekundäremission der geordneten kompakten Metallschicht auf die größere Eindringtiefe der *Primärelektronen* zurückzuführen, aus der die erzeugten Sekundärelektronen nicht mehr bis zur Oberfläche gelangen können. Diese Ursache allein kann aber nicht maßgebend sein, denn auch die *Sekundärelektronen* können die geordnete Schicht besser durchdringen. Beide Einflüsse sollten sich also etwa am Ausbeutemaximum kompensieren, denn dieses wird ja durch das zunehmende Eindringungsvermögen der Primärelektronen bis zu Tiefen, aus denen die (langsamen) Sekundärelektronen nicht mehr an die Oberfläche gelangen können, erklärt. Die in einigen Fällen (Fig. 5a, 5b) beobachtete Verlagerung des Maximums nach kleineren Primärelektronenenergien mit zunehmender Ordnung kann auf diese Weise gedeutet werden. Die gefundene *Abnahme* der Sekundäremission jedoch bedarf noch einer weiteren Ursache, die nur in einer *Abnahme* der Primärelektronen absorbierenden oder Sekundärelektronen liefernden *Zentren* beim Übergang in den geordneten Zustand gesucht werden kann¹⁾.

Die Begünstigung der langsamen Primärelektronen gegenüber den an Energie reicheren beim Übergang der kompakten Metallschichten aus dem ungeordneten in den geordneten Zustand, die sich in einer *Überschneidung* der Ausbeutekurven bzw. einer *Verschiebung* des Ausbeutemaximums äußerte (Fig. 5a, 5b, 6), kann nur durch die bessere Durchlässigkeit der geordneten kompakten Metallschicht sowohl für Primärelektronen als auch für Sekundärelektronen erklärt werden. Die langsamen Primärelektronen dringen in die geordnete Schicht tiefer ein als in die ungeordnete. Obwohl die Zahl emittierender Zentren pro Volumeneinheit beim Übergang in den

¹⁾ Die Richtigkeit dieser Schlußfolgerung wird durch lichtelektrische Versuche an Metallschichten im ungeordneten und geordneten Zustand bestätigt, über die in einer späteren Veröffentlichung berichtet wird.

geordneten Zustand abnimmt, nimmt die Zahl der von langsamen Primärelektronen ausgelösten Sekundärelektronen zu, weil durch das tiefere Eindringen der Primärelektronen ein größeres Volumen durchstrahlt wird und außerdem die im Innern ausgelösten Sekundärelektronen die Metallschicht besser durchdringen können. Die schnellen Primärelektronen durchstrahlen zwar auch ein größeres Volumen, wenn sich die Metallschicht im geordneten Zustand befindet. Sie dringen aber so tief ein, daß die im Innern frei gemachten Sekundärelektronen auf ihrem Wege an die Oberfläche zu einem großen Teil wieder absorbiert werden, so daß sich die Abnahme der Zentrenzahl pro Volumeneinheit in einer Verminderung der Sekundäremission beim Übergang in den geordneten Zustand äußert.

Wie die im 3. Abschnitt beschriebenen Versuche zeigen, wird die Sekundäremission aufgedampfter Metallschichten durch deren Struktur wohl beeinflusst, aber verhältnismäßig wenig. Obgleich durch die Art der Schichtherstellung und -behandlung eine strukturelle Verschiedenheit erzielt wird, die durch Kaltverformung bisher nicht erreicht werden konnte, beträgt die Änderung der Sekundäremission einer reinen kompakten Metallschicht durch die Strukturänderung maximal nur 20 bis 30% am Emissionsmaximum.

Bei den Versuchen von Kollath an den Berylliumschichten auf Wolfram hingegen wuchs die Emission durch vorübergehendes Erwärmen auf 750° C auf das Vielfache des Ausgangswertes an. Da sich außerdem dieser Einfluß der Erwärmung bei 700° noch nicht bemerkbar machte, möchten wir ihn nicht auf eine Strukturänderung zurückführen. Wir vermuten vielmehr, daß an der Oberfläche oder im Innern des vorher auf 1500° C ausgeheizten Wolframbleches noch Spuren von Sauerstoff etwa in Form eines Oxyds zurückgeblieben waren, die oberhalb von 700° C frei wurden und die Berylliumschicht mit Spuren von Berylliumoxyd versahen. Hierdurch entstanden in ihr hoch emittierende Zentren, wie dies auch bei schwacher Oxydation einer Berylliumoberfläche bei gleichzeitiger Erwärmung zu beobachten ist.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sowie der Firma Telefunken (Fernsehröhrenlaboratorium) sind wir für die materielle Unterstützung dieser Versuche zu Dank verpflichtet.

Breslau, Physikalisch-chemisches Institut der Technischen Hochschule und der Universität.
