

Für Mithilfe bei der Ausführung der experimentellen Arbeiten danken wir Fräulein H. BADDENHAUSEN und den Herren D. MÜLLER, B. SPETTEL und B. WELLNER herzlich.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sind wir für die leihweise Überlassung eines HF-Generators und dem Bundesministerium für Atomkernenergie für weitere Sachbeihilfen zu Dank verpflichtet.

Der SCHWARZSCHILD-Exponent von Ilford Q-Platten für Ionen mittlerer Massen

Von J. FRANZEN und E. HEBEDA

Aus dem Max-Planck-Institut für Chemie (Otto-Hahn-Institut), Mainz
(Z. Naturforschg. 17 a, 476—478 [1962]; eingegangen am 2. April 1962)

Der SCHWARZSCHILD-Exponent von Ilford Q1-, Q2- und Q3-Platten wurde im Bereich der Primär schwärzung unter Berücksichtigung von Empfindlichkeitsschwankungen längs der Platte für die Edelgasionen $^{22}\text{Ne}^+$, $^{36}\text{Ar}^+$, $^{82}\text{Kr}^+$ und $^{86}\text{Kr}^+$ einer Energie von 30 keV gemessen.

Die Stromdichten und Expositionszeiten wurden um 3,5 Zehnerpotenzen variiert. Im Bereich der Expositionszeiten von 0,07 bis 240 sec ergab sich der SCHWARZSCHILD-Exponent zu

$$\begin{aligned} p &= 1,014 \pm 0,007 \text{ für Q1-Platten,} \\ p &= 1,011 \pm 0,008 \text{ für Q2-Platten,} \\ p &= 1,004 \pm 0,007 \text{ für Q3-Platten.} \end{aligned}$$

Bei der Photoplatte als quantitativem Nachweismittel für Ionen ist es wichtig zu wissen, ob die Schwärzung nur von der aufgeschossenen Ladungsdichte oder – wie etwa bei Licht – darüber hinaus von der Expositionszeit abhängt. Nach SCHWARZSCHILD ist die Schwärzung der Photoplatte im allgemeinen Fall eine Funktion vom Produkt aus Stromdichte j und einer Potenz p der Expositionszeit t :

$$S = f(j t^p). \quad (1)$$

Ist der SCHWARZSCHILD-Exponent $p = 1$, so gilt das Reziprozitätsgesetz von BUNSEN und ROSCOE.

Der SCHWARZSCHILD-Exponent von Ilford Q1- und Q3-Platten für Ionenbeschuß wurde erstmals von LICHTBLAU¹ 1940 gemessen. Das Reziprozitätsgesetz ist demnach für Q3-Platten mit einem SCHWARZSCHILD-Exponenten $p = 0,99 \pm 0,05$ erfüllt, dagegen kann bei Q1-Platten nicht „mit Sicherheit auf die Gültigkeit des Reziprozitätsgesetzes geschlossen werden“, weil die Schwärzungskurven für kleine Schwärzungen im Gegensatz zu Q3-Platten nicht linear sind und denen für Licht ähneln. Für die Schwärzung durch Licht gibt er $p = 0,55$ für Q1- und $p = 0,70$ für Q3-Platten an. In einer nachfolgenden Arbeit von LICHTBLAU und MATTAUCH² wird aus photographisch und elektrometrisch gemessenen Isotopenhäufigkeiten von Molybdän auf einen SCHWARZSCHILD-Exponenten $p = 0,86$ für Q1-Platten geschlos-

sen. Die damalige größere Abweichung vom Reziprozitätsgesetz im Gegensatz zu den Ergebnissen dieser Arbeit dürfte auf eine Änderung der Emulsionseigenschaften der Q1-Platte im Laufe der Jahre zurückzuführen sein, da alle Q-Platten in dieser Arbeit im Bereich kleiner Schwärzungen lineare Schwärzungskurven zeigten. BRIX und DEHMELT^{3, 4} maßen unter anderem die Protonenschwärzung von Q1-Platten. Sie finden „keine sicheren Anzeichen für die Nichtgültigkeit des Reziprozitätsgesetzes“ ($0,92 < p \leq 1,00$).

Die Gültigkeit des Reziprozitätsgesetzes wurde mit einem schon früher beschriebenen⁵ doppelfokussierenden MATTAUCH–HERZOGSCHEN Massenspektrographen mit folgender Aufnahmetechnik an den Ionen $^{22}\text{Ne}^+$, $^{36}\text{Ar}^+$, $^{82}\text{Kr}^+$ und $^{86}\text{Kr}^+$ geprüft. Auf einer Platte (s. Abb. 1) wurden untereinander sieben Meßlinien aufgenommen, bei denen Stromdichte und Expositionszeit reziprok zueinander um 3,5 Zehnerpotenzen variiert wurden. Auf die Konstanz des Produktes $j t$ wurde sorgfältig geachtet. Durch eine kleine Änderung des Magnetfeldes wurden dicht neben diese Meßlinien sieben Bezugslinien konstanter Expositionszeit und Stromdichte gesetzt, um örtliche Empfindlichkeitsschwankungen der Platten feststellen und eliminieren zu können. Bei der Auswertung wurde dann die Schwärzung einer Meßlinie auf die der benachbarten Bezugslinie bezogen. Neben die Bezugslinien sind Expositionen mit Variationen von t und Konstanthaltung von j für eine Schwärzungskurve (Abb. 2) aufgenommen worden. Mit Hilfe der Schwärzungskurve $S = f(t)$ wird sichergestellt,

¹ H. LICHTBLAU, Phys. Z. **41**, 82 [1940].

² H. LICHTBLAU u. J. MATTAUCH, Z. Phys. **117**, 502 [1941].

³ P. BRIX, Z. Phys. **126**, 35 [1949].

⁴ P. BRIX u. H. G. DEHMELT, Z. Phys. **126**, 728 [1949].

⁵ R. BIERI, F. EVERLING u. J. MATTAUCH, Z. Naturforschg. **10 a**, 659 [1955].



dass der Arbeitsbereich im linearen Teil der Kurve liegt, eine Voraussetzung für unsere Auswertung.

Der Ionenstrom wurde kontinuierlich während der Aufnahme mit einem Monitor zwischen dem elektrischen und magnetischen Feld gemessen. Die Hochohmwiderstände des Schwingkondensatorverstärkers sind relativ zueinander mit einer Genauigkeit besser als 1% geeicht worden. Die Aufnahmen wurden durch einen elektromagnetischen Verschluß⁶ hinter der Magnetfeldblende exponiert. Die kurzen Expositionszeiten (0,067 bis 7,20 sec) steuerte ein elektronischer Zeitgeber, der vor jeder Plattenexposition geeicht wurde, wobei die Konstanz besser als 1% war. Die längeren Expositionszeiten (bis 225 sec) wurden durch eine automatische Stromintegration gegeben, um kleine Intensitätsschwankungen zu berücksichtigen. Der Integrator wurde ebenfalls vor der Exposition jeder Platte geeicht. Die Reproduzierbarkeit betrug etwa 5%. Auf eine gleichmäßige Ausleuchtung der Spalte wurde größte Sorgfalt verwandt, um homogen geschwärzte Linien zu erhalten (s. Photometerkurve in Abb. 1).

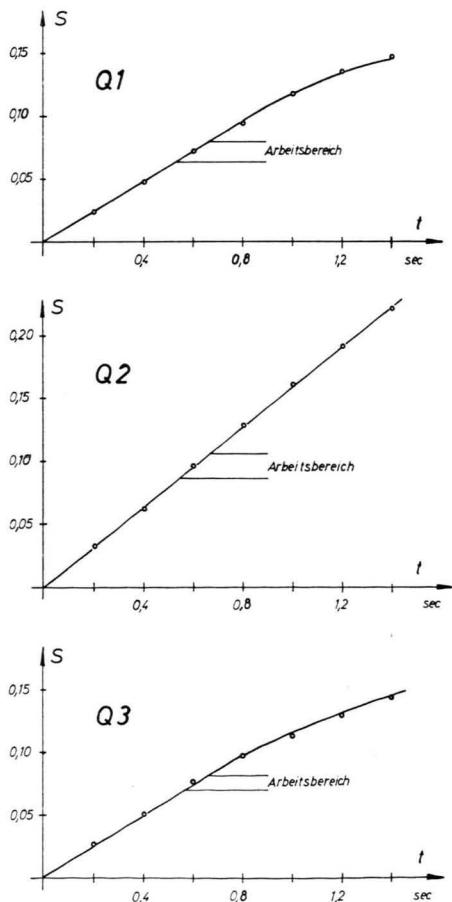


Abb. 2. Schwärzungskurven $S=f(t)$ für $^{36}\text{Ar}^+$.

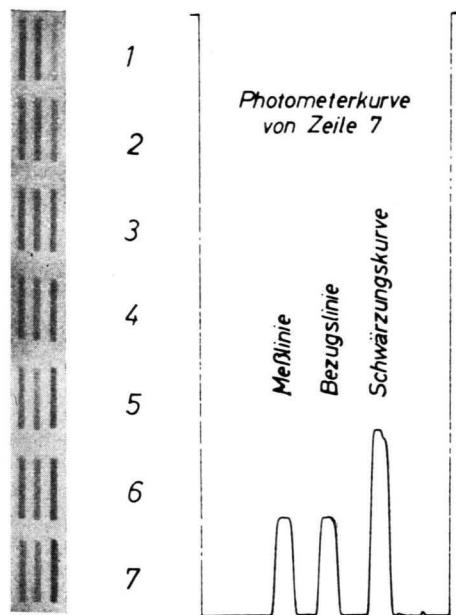


Abb. 1. Anordnung der Linien $^{36}\text{Ar}^+$ auf einer Q1-Platte (links) mit einer Photometerkurve (rechts).

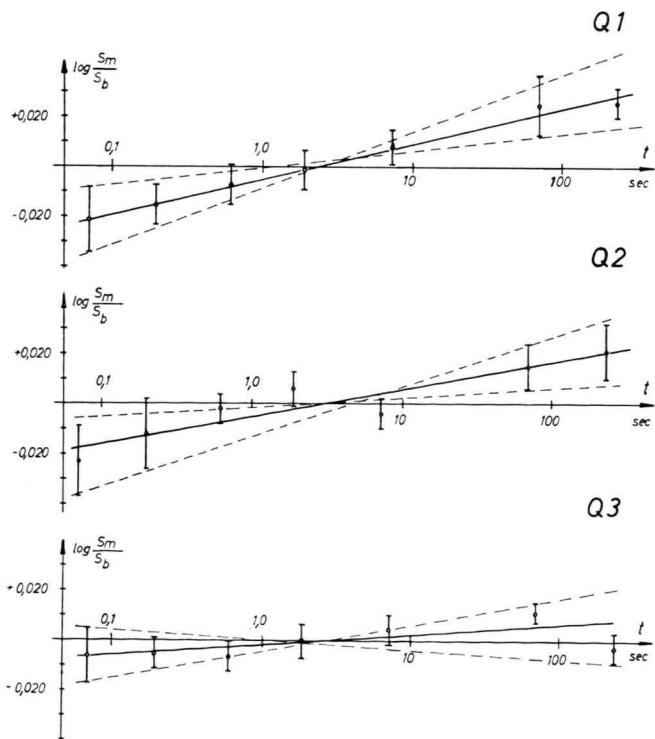


Abb. 3.

⁶ E. HEBEDA, Dissertation D 77, Universität Mainz.

Die Elektronenstoßionenquelle wurde mit einem Gemisch der Edelgase Ar, Ne und Kr im Verhältnis 1 : 0,08 : 0,07 beschickt, um alle in Frage kommenden Linien gleichzeitig auf einer Platte auswerten zu können. Alle Platten wurden in Ätzkali-Hydrochinon-Entwickler (Ilford ID 13) bei 18 °C entwickelt und die Schwärzungen der Linien photometrisch ermittelt. Unter der Schwärzung S wird in dieser Arbeit

$$S = \log(I_0/I) \quad (2)$$

verstanden, wobei I_0 der Lichtstrom durch den Untergrund und I der Lichtstrom durch die auszumessende Linie bedeutet.

Für Linien exakt gleicher Schwärzung kann das SCHWARZSCHILDSCHE Gesetz (1) in folgender Form geschrieben werden:

$$j_1 T_1^p = j_2 T_2^p. \quad (3)$$

Daraus ergibt sich der SCHWARZSCHILD-Exponent p zu

$$p = \frac{\log j_1 - \log j_2}{\log T_2 - \log T_1} = - \frac{\Delta \log j}{\Delta \log T}. \quad (4)$$

Da die Schwärzungen von Meßlinien und Bezugslinien jedoch nicht exakt gleich sind, wurden die Meßlinienschwärzungen auf die Schwärzungen der Bezugslinien mit Hilfe der Schwärzungskurve normiert. Dabei werden die experimentell gegebenen Expositionszeiten t in die virtuellen Expositionszeiten T umgewandelt, die für eine exakt gleiche Schwärzung notwendig gewesen wären.

Die experimentellen Schwärzungskurven $S = f(t)$ sind im benutzten Arbeitsbereich alle linear (siehe Abb. 2). Daraus ergeben sich die virtuellen Expositionszeiten T zu

$$T = (S_m/S_b) t, \quad (5)$$

wobei S_m die Schwärzung der Meßlinie und S_b die der Bezugslinie ist. Für diese virtuellen Expositionszeiten gilt nach Gl. (4)

$$\begin{aligned} p &= \frac{\log j_1 - \log j_2}{\log t_2 - \log t_1 + \log(S_m/S_b)_2 - \log(S_m/S_b)_1} \\ &= \frac{\Delta \log j}{\Delta \log t + \Delta \log(S_m/S_b)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Durch den Vergleich der Meßlinienschwärzung mit der Schwärzung der nebenstehenden Bezugslinie sind lokale Empfindlichkeitsschwankungen automatisch eliminiert. Da mit großer Sorgfalt experimentell die Bedingung

$$\Delta \log j = - \Delta \log t \quad (7)$$

eingehalten wurde, ergibt sich

$$p = 1 / \left(1 - \frac{\Delta \log(S_m/S_b)}{\Delta \log t} \right). \quad (8)$$

Der Ausdruck $\Delta \log(S_m/S_b)/\Delta \log t$ stellt die Steigung im Diagramm

$$\log(S_m/S_b) = f(\log t)$$

dar. Abb. 3 gibt dieses Diagramm für Q1-, Q2- und Q3-Platten wieder. In dieses wurden die Mittelwerte von $\log(S_m/S_b)$ mit ihren mittleren quadratischen Abweichungen aus sämtlichen Meßdaten eingezeichnet. Jeder eingetragene Meßpunkt umfaßt die Daten aller vier Massen ($^{22}\text{Ne}^+$, $^{36}\text{Ar}^+$, $^{82}\text{Kr}^+$ und $^{86}\text{Kr}^+$) auf je vier Platten, also den Mittelwert aus je 16 Messungen. Aus den mittleren Steigungen wurde der SCHWARZSCHILD-Exponent bestimmt zu

$p = 1,014 \pm 0,007$ für Q1-Platten, Emulsions-Nr. 3237,

$p = 1,011 \pm 0,008$ für Q2-Platten, Emulsions-Nr. 3951,

$p = 1,004 \pm 0,007$ für Q3-Platten, Emulsions-Nr. 3890.

Die angegebenen Fehler wurden durch eine graphische Abschätzung (gestrichelte Geraden in Abb. 3) der maximalen Steigungen ermittelt.

In erster Näherung ist damit für Ilford Q-Platten das Reziprozitätsgesetz erfüllt. Die geringe Abweichung wird für viele Messungen unerheblich sein, sie ist jedoch wenigstens bei Q1- und Q2-Platten durch die Fehlerintervalle sichergestellt. Eine Abhängigkeit des SCHWARZSCHILD-Exponenten von der Masse der Ionen kann wegen der Streuung der einzelnen Meßwerte nicht mit Sicherheit festgestellt werden.

Es ist ein Gang des SCHWARZSCHILD-Exponenten mit der Empfindlichkeit der Plattensorte vorhanden. Dieser kann nicht auf eine systematische Änderung der Meßbedingungen während der Untersuchungsdauer zurückgeführt werden, da zu Beginn und zu Ende der Messungen Q1-Platten belichtet wurden, deren Ergebnisse zusammenfallen. Die Meßwerte einer zusätzlichen Q1-Platte einer anderen Emulsionsnummer (3750) fügen sich sehr gut in die Meßwerte der übrigen Q1-Platten ein.

Ein weiteres Ergebnis dieser Arbeit ist, daß die Schwärzungskurve $S = f(t)$ für kleine Schwärzungen linear ist (bes. für Q2). Die Streuung der Bezugslinienschwärzung beträgt im Mittel 3%. Ein Gang der Empfindlichkeit quer zur Platte ist nicht festzustellen.

Herrn Prof. Dr. J. MATTIAUCH und Herrn Prof. Dr. H. HINTENBERGER danken wir für ihr freundliches Interesse an dieser Arbeit. Herrn PETER JANSEN danken wir sehr herzlich für wertvolle Diskussionen und wichtige Hinweise.