

Zur Identifikation der Übergänge sind Tabellen von MOORE⁸ und EDLÉN⁹ benutzt worden.

Fehlerabschätzung

Da bei der Teilchendichthebestimmung mit Ausnahme der Halbwertsbreite $(\Delta\lambda)_3$ nur Intensitäts- und Halbwertsbreite-Verhältnisse gemessen werden, kann hierbei von der experimentellen Seite her nur durch die $(\Delta\lambda)_3$ -Messung ein wesentlicher systematischer Fehler entstehen. Weiterhin kommen systematische Fehler nur noch durch die Unsicherheiten

der Konstanten β in Gl. (11) und der zur Berechnung der Ionisationsenergie-Erniedrigung $\Delta\chi$ benutzten Gl. (19) hinzu.

Wenn für $(\Delta\lambda)_3$ und β Fehler von je 5%, für $\Delta\chi$ der Unsicherheitsfaktor 4 angenommen werden, resultiert hieraus für $(n_{C1} + n_{Cl}^+)/Z$ ein Fehler von etwa 10%.

Hieraus ergibt sich schließlich unter Berücksichtigung einer gewissen Unsicherheit bei der Bestimmung der Wachstumskurven für die angegebenen f_{mn} - bzw. $g_m A_{nm}$ -Werte ein möglicher Fehler von etwa 25%.

⁸ CH. E. MOORE, Atomic Energy Levels and Ultraviolet Multiplet Table (NBS) [1949 und 1950].

⁹ B. EDLÉN, Nova Acta Regiae Societatis Scientiarum Upsaliensis, Ser. IV, Vol. 9, No. 6 [1934].

Die Empfindlichkeit von Ilford Q1-Platten für Ionen bis 25 keV Energie

Von ERICH BURLEFINGER¹ und HEINZ EWALD

Aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule München
(Z. Naturforsch. **18 a**, 1116–1121 [1963]; eingegangen am 22. August 1963)

Es wurden die Ausbeuten an geschwärzten Körnern bei Beschuß von Ilford-Q1-Platten mit H^+ , H_2^+ , D_2^+ - und Ar^+ -Ionen verschiedener Energien bestimmt. Die Ergebnisse dieser und einer vorangegangenen Untersuchung sind in Einklang mit theoretischen Erwartungen über die Reichweiten dieser Ionen in der als Einkornschicht anzunehmenden photographischen Emulsion.

Bei einer früheren Untersuchung² bestimmten wir die Empfindlichkeit von Ilford Q1-Platten für Ionen von 17,4 keV Energie und verschiedenen Massen. Die absolute Empfindlichkeit e wurde definiert als Quotient aus Korndichte K durch Ionendichte I für verschwindende Ionendichte:

$$e = K/I \quad \text{für } I \rightarrow 0. \quad (1)$$

K ist gleich der Anzahl der durch Ionbeschluß und Entwicklung pro cm^2 erzeugten geschwärzten Körner. I ist die Anzahl der pro cm^2 aufgefallenen Ionen. Die absolute Empfindlichkeit für Ionen einer bestimmten Sorte und Energie ist von Platte zu Platte auf Grund von Dichte- und Größenschwankungen der unentwickelten Körner erheblich verschieden. Dies wird durch Abb. 1 illustriert, in welcher die Korndichten K dargestellt sind, die durch Bestrahlung von 4 verschiedenen Platten der gleichen Emulsionsnummer 3896 mit H_2^+ -Ionen erhalten wurden. Aus diesem Grunde sind auf verschiedenen Platten vorgenommene Bestimmungen der absoluten Empfindlichkeiten nur ungenau miteinander zu vergleichen.

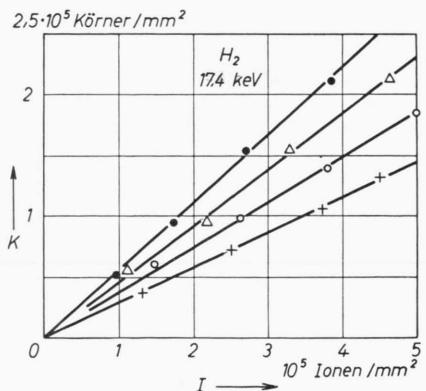


Abb. 1. Verschiedene Kornausbeuten $K(I)$ für verschiedene Platten der gleichen Emulsion.

¹ Auszug aus der von der Fakultät für Allgemeine Wissenschaften der Technischen Hochschule München genehmigten Dissertation über „Die Empfindlichkeit von Ilford Q1-Plat-

ten für Ionen bis 25 keV Energie“ des Dipl.-Physikers ERICH BURLEFINGER.

² E. BURLEFINGER u. H. EWALD, Z. Naturforsch. **16 a**, 430 [1961].



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

This work has been digitized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

Infolgedessen wurden genauere Relativmessungen vorgenommen. Jede Platte wurde mit abgestuften Expositionen alternierend mit den zu untersuchenden Ionen der Sorte X von der Masse M und Energie E und mit Wasserstoffmolekülen von 17,4 keV Energie beschossen. In der Regel wurden auf jeder Platte auf diese Weise 16 Expositionen nebeneinander erhalten. Als relative Empfindlichkeit ε für die Ionen der Sorte X wurde der Quotient aus der absoluten Empfindlichkeit für das betreffende Ion und der für das Wasserstoffmolekül auf derselben Platte angesetzt:

$$\varepsilon(X, E) = \frac{e(X, E)}{e(H_2, 17,4 \text{ keV})}. \quad (2)$$

Diese relativen Empfindlichkeiten sind von Platte zu Platte erheblich kleineren Schwankungen unterworfen als die absoluten. Sie lassen sich auf diese Weise auf etwa $\pm 10\%$ genau reproduzierbar feststellen. In der hier vorliegenden Arbeit haben wir die Empfindlichkeiten der Q1-Platten der Emulsionsnummer 3896 für die Ionen des leichten und schweren Wasserstoffs, sowie deren Energieabhängigkeiten bestimmt. Außerdem wurde die Energieabhängigkeit der Empfindlichkeit für Argonionen gemessen.

Das experimentelle Verfahren war das gleiche, wie es schon in unserer früheren Veröffentlichung² beschrieben wurde. Die zeitraubenden Kornzählungen unter dem Mikroskop wurden jedoch weitgehend durch lichtelektrische Messungen ersetzt. Dazu wurde an Stelle des Auges auf das Okular des verwendeten Mikroskops eine Silicium-Photo-Flächendiode (Type Siemens TP 60) aufgesetzt, deren Kurzschlußstrom mit dem Galvanometer gemessen wurde. Es wurden direkt die relativen Schwächungen $A = (J_0 - J)/J_0$ des durch die bestrahlten und entwickelten Platten hindurchgehenden Lichtes gemessen. Der Zusammenhang zwischen Lichtschwächung und Kornzahldichte wurde in Vorversuchen ermittelt³. Dabei wurden Expositionen verschiedener Schwärzungen auf ein und denselben Platte im Mikroskop bei 500-facher Vergrößerung sowohl ausgezählt als auch gleich photometriert. Die Vergleichbarkeit beider Messungen war durch eine Spaltblende in der Zwischenbildecke des Mikroskops gewährleistet. Es bestätigte sich die für Einkornsichten erwartete Proportionalität zwischen Kornzahldichte und Lichtschwächung (Abb. 2). Diese Vergleichsmessung ist durch die größte noch auszählbare Kordichte begrenzt, die etwa bei 500 000 Körnern pro mm^2 liegt. Die meisten der im folgenden aufgeführten Ergebnisse wurden auf diese Weise im Strahlengang des Mikroskopes lichtelektrisch gemessen. Wegen des CALLIER-Effektes wurde die Be-

leuchtungssapertur konstant gehalten. Die Lichtschwächungswerte konnten auf $\pm 0,01$ genau bestimmt werden.

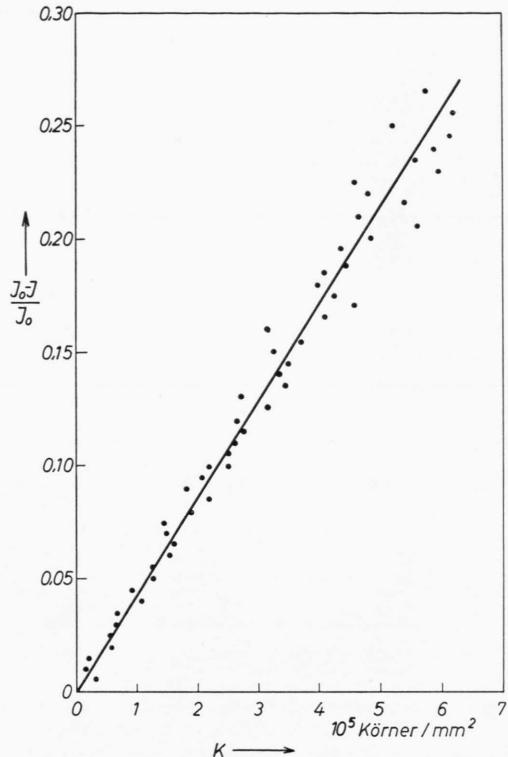


Abb. 2. Zusammenhang zwischen Kornzahl und Lichtschwächung $(J_0 - J)/J_0$ einer Ilford Q1-Platte mit $0,70 \mu$ Durchmesser der entwickelten Körner.

Da zwischen Lichtschwächung und Kordichte Proportionalität besteht, lässt sich die absolute Empfindlichkeit auch als Quotient von Lichtschwächung durch Ionendichte für verschwindende Ionendichte definieren. Dadurch werden die Zahlwerte für die absoluten Empfindlichkeiten e , nicht aber diejenigen für die relativen Empfindlichkeiten ε verändert, da bei der Bildung der Quotienten aus den absoluten Empfindlichkeiten für die gerade untersuchte Ionenart und für die Vergleichsionen H_2^+ der Proportionalitätsfaktor zwischen Lichtschwächung und Kordichte herausfällt.

Die absoluten und relativen Empfindlichkeiten stehen bei einer Einkornsicht, wie sie bei den Q1-Platten vorliegt, in einem einfachen Zusammenhang mit der Reichweite R_p der Ionen in der Gelatine. Die Reichweite R_p ist die Projektion der Bahnlänge R des Ions der Sorte X und Energie E auf seine Anfangsrichtung. Wir legen folgendes Modell der

³ B. KAISER, Diplomarbeit am Physikalischen Institut der Technischen Hochschule München 1963.

Photoschicht zugrunde. Die AgBr-Körner der unbelichteten Platte mögen Kugeln⁴ mit dem mittleren Durchmesser $2r$ sein, die in eine Gelatineschicht der Dicke $2r$ vollkommen eingebettet sind. Die absolute Empfindlichkeit⁵ K/I ist dann annähernd der Bruchteil der Flächeneinheit, der in der Tiefe $R_p/\sqrt{2}$ der Schicht von Körnern eingenommen wird, wenn die Ionen unter 45° auf die Schicht einfallen, wie es in unserem Experiment der Fall war. Es errechnet sich

$$\epsilon(X, E) = \frac{1}{2} \pi N_0 [2\sqrt{2} r R_p(X, E) - R_p^2(X, E)], \quad (3)$$

$$\begin{aligned} N_0 &\text{ ist die Anzahl der Bromsilberkörner pro cm}^2 \text{ in der unbelichteten Schicht. Setzen wir zur Abkürzung} \\ e(H_2^+, 17,4 \text{ keV}) &= \frac{1}{2} \pi N_0 [2\sqrt{2} r R_p(H_2^+, 17,4 \text{ keV}) \\ &\quad - R_p^2(H_2^+, 17,4 \text{ keV})] \quad (4) \\ &= \frac{1}{2} \pi N_0 \alpha, \end{aligned}$$

dann folgt für die untersuchte Ionenart X

$$\epsilon(X, E) = \alpha [2\sqrt{2} r R_p(X, E) - R_p^2(X, E)]. \quad (5)$$

Danach ist die relative Empfindlichkeit zwar weitgehend unabhängig von Schwankungen der Dichte N_0 der unentwickelten Körner in der Schicht, nicht jedoch von Unterschieden der Kornradien r , die von Platte zu Platte vorhanden sein mögen.

Die maximale relative Empfindlichkeit liegt vor für $R_p = r\sqrt{2}$. Sie hat den Wert

$$\epsilon_{\max} = 2\alpha r^2. \quad (6)$$

Experimentell wurde für die Platten der Emulsionsnummer 3896 $\epsilon_{\max} = 1,50 \pm 0,10$ gefunden (siehe Abb. 8).

Legen wir Korndurchmesser von $2r = 4,5 \cdot 10^{-5}$ cm zugrunde, dann folgt aus Gl. (6)

$$\alpha = 14,8 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}. \quad (7)$$

Bei Kenntnis von R_p in der Gelatine läßt sich die Empfindlichkeit der Q1-Platten für alle untersuchten Ionenarten X und Energien E berechnen. Die Bahnlänge R und ungefähr auch die Reichweite R_p ermitteln wir nach LINDHARD und SCHARFF⁶. Hat das Ion die Energie E, dann ist sein differentieller Energieverlust

$$dE/dR = -A - B\sqrt{E}. \quad (8)$$

A bedeutet den Energieverlust durch Stöße im abgeschirmten Kernfeld. Dieser ist energieunabhängig. $B\sqrt{E}$ ist der durch die Elektronen des bremsenden

Mediums verursachte Energieverlust. A und B sind Funktionen der Ordnungszahlen und Atomgewichte der bremsenden und gebremsten Atome sowie der Teilchendichte im bremsenden Medium. Die Bahnlänge R folgt daraus zu

$$R = \frac{2}{B} \left[V\bar{E} - \frac{A}{B} \ln \left(1 + \frac{B}{A} V\bar{E} \right) \right]. \quad (9)$$

Für reine Abbremsung nur durch die Elektronen des abbremenden Mediums ist die Reichweite R_p gleich der Bahnlänge R . Für reine Abbremsung durch Stöße in abgeschirmten Kernfeldern ist die Reichweite R_p gleich der Länge der Projektion der Bahn auf die Anfangsrichtung des Ions. Es ist

$$R_p = R/C, \quad (10)$$

wobei $C > 1$ eine Funktion der Massen des abgebremsten Ions und der Atome des bremsenden Mediums ist. Wenn sowohl Abbremsung durch die Elektronen als auch durch Stöße im abgeschirmten Kernfeld vorliegt, ist der Wert von R_p zwischen den Werten R und R/C .

In Tab. 1 sind die Werte $A(X)$, $B(X)$, $C(X)$, $R(X, 17,4 \text{ keV})$, $R_p(X, 17,4 \text{ keV})$ und $\epsilon(X, 17,4 \text{ keV})$ für die untersuchten Ionen X aufgeführt. A, B und C wurden nach der Theorie von LINDHARD und SCHARFF⁶ bestimmt. Die Dichte der Gelatine wurde zu $1,3 \text{ g/cm}^3$ angesetzt⁷. Die Bruttoformel der Gelatine $C_{35}H_{57}O_{13}N_{11}$ lag bei der Bestimmung der Anteile der bremsenden Atomarten an den Größen A, B und C zugrunde. $R(X, 17,4 \text{ keV})$ wurde nach Gl. (9) errechnet. Bei den Molekülionen H_2^+ , D_2^+ und N_2^+ wurde angenommen, daß sie bei Eintritt in die Gelatine in zwei Ionen der halben Energie zerfallen. Die Bahnlänge eines Moleküliions der Energie E ist dann gleich der des Atomions der Energie $E/2$. Für die Berechnung von R_p bei $17,4 \text{ keV}$ wurden folgende Annahmen gemacht: Ist die Abbremsung durch Elektronen um eine Größenordnung stärker als die durch Atomstöße, $B/E \gg A$, dann sind Ablenkungen der einfliegenden Ionen relativ selten. Es gilt: $R_p = R$. Dies ist für die leichten Ionen H^+ , D^+ und D_2^+ der Fall. Bei den schwereren Ionen ab Neon ist $A \gg B/E$. Hier gilt: $R_p = R/C$. Die übrigen Ionen He^+ bis N^+ haben A und $B\sqrt{E}$ von gleicher Größenordnung. Die Ionen werden noch häufig aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt.

⁴ H. YAGODA, Radioactive Measurements with Nuclear Emulsions, John Wiley & Sons, New York 1949, S. 48 und 255.

⁵ Exakte Berechnung: M. VOGLER, Diplomarbeit am Physikalischen Institut der Technischen Hochschule München 1961.

⁶ J. LINDHARD u. M. SCHARFF, Phys. Rev. **124**, 128 [1961].

⁷ W. MEIDINGER, Handbuch der wissenschaftlichen und angewandten Photographie Bd. V, Springer, Wien 1932.

Ion	A keV/ μ	B $\sqrt{\text{keV}/\mu}$	C	R μ	R_p μ	ε berechnet	ε gemessen
H^+	8,43	21,2		0,297	0,297	1,50	$1,44 \pm 0,15$
D^+	12,97	15,0		0,355	0,355	1,50	$1,44 \pm 0,15$
H_2^+						1,00	1,00
D_2^+				0,224	0,224	1,37	$1,47 \pm 0,15$
He^+	34,8	18,7	1,80	0,212	0,118	0,90	$0,85 \pm 0,09$
Li^+	65,3	19,1	1,41	0,152	0,108	0,85	$0,63 \pm 0,07$
C^+	147	23,2	1,21	0,0856	0,071	0,59	$0,52 \pm 0,06$
N^+	177	23,5	1,19	0,0724	0,061	0,52	$0,44 \pm 0,05$
Ne^+	269	24,6	1,12	0,0485	0,043	0,38	$0,40 \pm 0,04$
N_2^+				0,0396	0,034	0,30	$0,32 \pm 0,04$
P^+	416	23,8	1,08	0,0354	0,033	0,30	$0,29 \pm 0,03$
Ar^+	506	22,9	1,06	0,0302	0,028	0,26	$0,27 \pm 0,03$
K^+	526	23,9	1,06	0,0290	0,027	0,25	$0,22 \pm 0,03$
Zn^+	812	22,8	1,04	0,0199	0,019	0,17	$0,16 \pm 0,02$
Kr^+	964	21,3	1,03	0,0170	0,017	0,15	$0,10 \pm 0,01$
Xe^+	1349	19,9	1,02	0,0124	0,012	0,11	$0,10 \pm 0,01$

Tab. 1.

Wir haben deshalb näherungsweise $R_p = R/C$ gesetzt. Mit diesen Werten für R_p wurde die relative Empfindlichkeit $\varepsilon(X, 17,4 \text{ keV})$ unter Benutzung von Gl. (5) und Gl. (7), sowie dem Zahlenwert $2r = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$ berechnet.

Messung der relativen Empfindlichkeit bei den leichten Ionen H^+ , D^+ und D_2^+ für 17,4 keV Energie

In Ergänzung unserer Messungen aus der vorangegangenen Veröffentlichung², bei der die Abhängigkeit von ε von der Masse des einfallenden Ions bei 17,4 keV studiert wurde, untersuchten wir die relative Empfindlichkeit bei den ganz leichten Ionen H^+ , D^+ und D_2^+ . Die Eindringtiefe dieser Ionen ist etwa von der gleichen Größe wie der Radius der Körner in der unentwickelten Schicht. Die relative Empfindlichkeit für diese Ionen hängt daher stark von Schwankungen des Kornradius von Platte zu Platte

ab. Übersteigt R_p für ein Ion den Wert $r\sqrt{2}$, muß $\varepsilon = \varepsilon_{\max}$ sein.

Abb. 3, 4 und 5 zeigen den Verlauf der Lichtschwächung mit der Ionendichte für H^+ , D^+ und D_2^+ relativ zu H_2^+ bei 17,4 keV Ionenergie auf 3 ver-

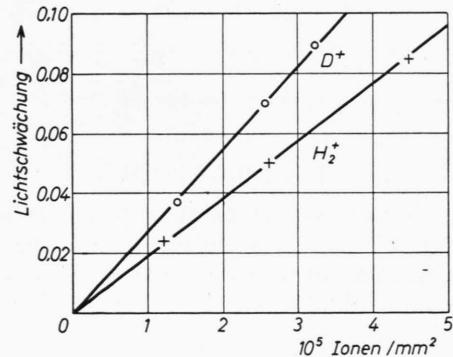


Abb. 4. Bestimmung der relativen Empfindlichkeit für D^+ bei 17,4 keV Energie.

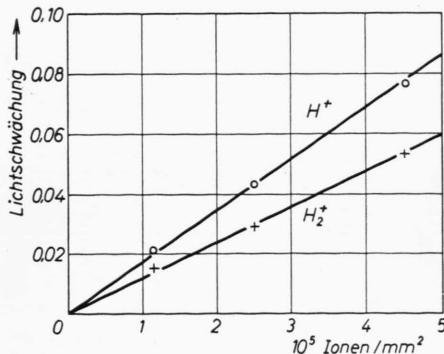


Abb. 3. Bestimmung der relativen Empfindlichkeit für H^+ bei 17,4 keV Energie.

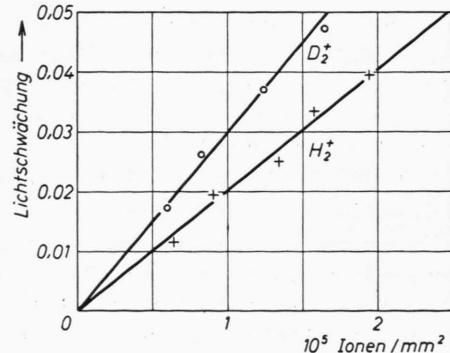


Abb. 5. Bestimmung der relativen Empfindlichkeit für D_2^+ bei 17,4 keV Energie.

schiedenen Platten aufgenommen. Abb. 6 zeigt die Lichtschwächungen, die bei Bestrahlung einer weiteren Platte für H^+ - und D_2^+ -Ionen erhalten wurden. Die relativen Empfindlichkeiten sind die Quotienten aus den Steigungen der Geraden, die die Lichtschwächungen gegen die Ionendichten darstellen, für das untersuchte Ion X und für das H_2^+ -Ion. Aus den Abb. 3, 5 und 6 entnimmt man für H^+ und D_2^+ gleiche relative Empfindlichkeit.

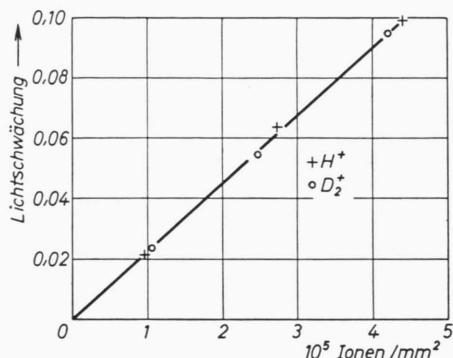


Abb. 6. Vergleich der Empfindlichkeit der Schicht für H^+ - und D_2^+ -Ionen bei 17,4 keV Energie.

Zahlenmäßig ergibt sich für die ε -Werte:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 1,44 \pm 0,14 \text{ für } H^+ \\ &= 1,44 \pm 0,14 \text{ für } D^+ \\ &= 1,47 \pm 0,15 \text{ für } D_2^+.\end{aligned}$$

Die Reichweite der angegebenen Ionen ist augenscheinlich ungefähr gleich oder größer als der mittlere Kornradius, denn nur so können sich trotz verschiedener Eindringtiefen gleiche ε -Werte ergeben.

Vergleich der gemessenen und berechneten Werte für die relative Empfindlichkeit

In der Tabelle sind neben den berechneten Werten von ε auch die in dieser und der vorangegangenen Veröffentlichung² gemessenen ε -Werte aufgeführt. Die Energie der Ionen war hierbei 17,4 keV. Bei den leichten Elementen H und D erreicht die Reichweite die Größe des Kornradius. Hier liegt praktisch der Maximalwert der relativen Empfindlichkeit der Schicht vor.

Die Theorie gibt übereinstimmend mit dem Experiment für D^+ eine größere Reichweite als für H^+ bei gleicher Energie an. Deshalb ist die Photoschicht für D_2^+ -Ionen empfindlicher als für H_2^+ -Ionen. Bei letzteren ist R_p/V^2 noch kleiner als der Kornradius. Die größere Reichweite von D^+ gegen H^+ beruht vor-

zugsweise auf dem Unterschied in der Abbremsung durch Elektronen. Dieser Anteil der Abbremsung ist für D^+ um den Faktor $\sqrt{2}/2$ kleiner als für H^+ , während die Abbremsung durch Kernstöße für D^+ fast zweimal so groß ist als für H^+ . Letztere ist bei diesen Elementen aber nur zu etwa 10% am Bremsprozeß beteiligt.

Der Wert für Li^+ fällt etwas heraus. Sonst sind die berechneten und gemessenen Werte im Rahmen der angegebenen Fehler vom He^+ bis zum Zn^+ in guter Übereinstimmung. Die relativ schwere Ionenart Kr^+ ergibt einen kleineren Meßwert als der Rechnung entspricht. Hier zeigt sich wohl die Grenze unseres stark vereinfachten Modells der Photoschicht. Wir nahmen an, daß die Silberbromidkörner bis an die Oberfläche der Gelatine reichen. Ist dies nicht der Fall, d. h. sind die Körner von einer dünnen Gelatinehaut bedeckt, so ergeben sich für Ionen mit extrem kleiner Reichweite geringere Meßwerte.

Die Abhängigkeit der relativen Empfindlichkeit von der Ionenenergie

Entsprechend den Gln. (5), (9) und (10) ist ε auch eine Funktion der Energie des einfliegenden Ions. ε wird mit der Energie monoton zunehmen, bis $\varepsilon = \varepsilon_{max}$ erreicht ist. Eine weitere Steigerung der Energie gibt dann keine Steigerung der Empfindlichkeit mehr. Experimentell wurde so vorgegangen: Die Photoschicht wurde alternierend mit Ionen einer bestimmten Art X und Energie E sowie mit H_2^+ -Ionen von 17,4 keV mit verschiedenen Expositions- dauern beschossen. Die Energie E der Ionenart X wurde dann von Platte zu Platte variiert. Abb. 7 zeigt die Abhängigkeit der Lichtschwächung von der Ionendichte für H_2^+ -Ionen von 6,9 und 17,4 keV.

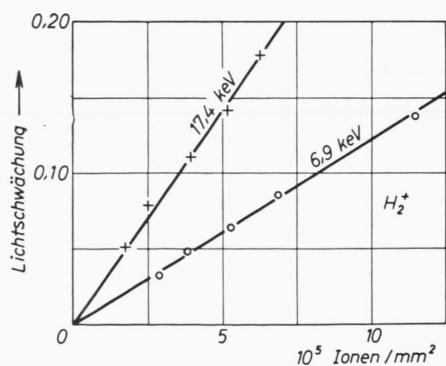


Abb. 7. Bestimmung der relativen Empfindlichkeit für H_2^+ -Ionen von 6,9 keV Energie.

Die relative Empfindlichkeit für H_2^+ von 6,9 keV ist der Quotient aus den Steigungen der beiden experimentell gewonnenen Geraden. Sein Zahlenwert ist in Abb. 8 als Meßpunkt für die mit H_2^+ bezeichnete Kurve eingetragen. In analoger Weise wurde jeder Meßpunkt in Abb. 8 gewonnen. In dieser Abbildung ist der Energieverlauf von ε für H^+ , H_2^+ , D_2^+ und Ar^+ dargestellt. Es fällt auf, daß ε für H^+ und D_2^+ etwa den gleichen Verlauf zeigt. Dies ist

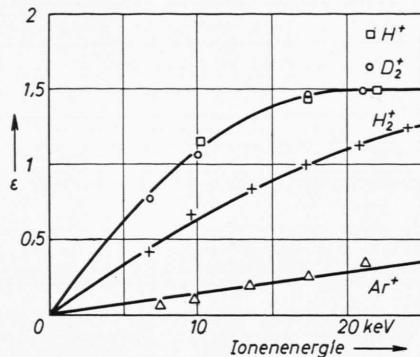


Abb. 8. Energieabhängigkeit der relativen Empfindlichkeit ε für verschiedene Ionen.

eine Folge der überwiegenden Abbremsung der leichtensten Ionen durch die Elektronen des bremsenden Mediums. Für reine Elektronenbremsung läßt sich zeigen, daß H^+ und D_2^+ in der Gelatine gleiche Bahnlängen haben. Diese sind wiederum den Reichweiten gleich.

Es ist dann:

$$R_H = 2\sqrt{E}/B_H,$$

$$R_{D2} = 2\sqrt{E/2}/B_D,$$

$$B_D = B_H/\sqrt{2},$$

also

$$R_H = R_{D2}$$

und somit

$$\varepsilon_H = \varepsilon_{D2}.$$

Nach unseren Vorstellungen spaltet das Molekülion H_2^+ beim Eintritt in die Gelatine in zwei H der halben Energie auf. Unter der Annahme, daß die Bahnen der beiden Ionen nicht zu sehr auseinanderlaufen, werden die beiden Ionen nur am selben Korn

photographisch wirksam. Das heißt, bei der Berechnung der Empfindlichkeit braucht man nur eines der beiden Ionen zu berücksichtigen. Die relative Empfindlichkeit der Schicht für H^+ -Ionen der Energie E muß dann gleich der für H_2^+ -Ionen der Energie $2E$ sein. Dies ist in Abb. 8 erfüllt.

Man sieht auch, daß für H^+ und D_2^+ bei etwa 20 keV die maximale Empfindlichkeit der Schicht erreicht wird. Für H_2^+ müßte diese dann bei 40 keV erreicht werden.

Bei dem schweren Argonion liegen die Verhältnisse wegen der ausschließlichen Abbremsung durch Atomstöße sehr einfach. Es ist:

$$R = E/A \quad \text{und} \quad R_p = R/C.$$

Wegen der geringen Reichweite der Argonionen unter 20 keV Energie fällt in Gl. (5) das quadratische Glied weg. Die relative Empfindlichkeit ist in diesem Energiebereich proportional zur Energie. In Abb. 8 ist für Argon der berechnete Energieverlauf eingezeichnet. Die Meßpunkte liegen innerhalb der Fehlergrenzen auf der berechneten Geraden.

Abschließend soll nochmals der Verlauf der Lichtschwächung mit der Ionendichte für H_2^+ von 17,4 keV gezeigt werden, jedoch über einen Bereich von 5 Zehnerpotenzen. In der logarithmischen Darstellung der Abb. 9 steigt die Lichtschwächung mit der Ionendichte anfangs unter 45° . Dies entspricht dem Proportionalbereich der Lichtschwächung. Schließlich strebt die Lichtschwächung einem Sättigungswert zu.

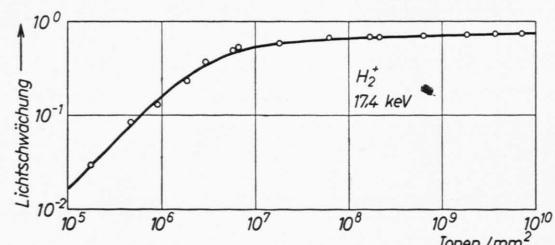


Abb. 9. Lichtschwächung in Abhängigkeit von der Ionendichte für H_2^+ -Ionen von 17,4 keV Energie über einen Bereich von 5 Zehnerpotenzen der Ionendichte.