

Ladungsaustausch zwischen Ionen und Atomen der Edelgase bei Stoßenergien unterhalb 200 eV

H. SCHLUMBOHM *

Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg

(Z. Naturforsch. 24 a, 1716—1720 [1969]; eingegangen am 19. August 1969)

Charge exchange cross sections for the four systems He^+ , $\text{Ne}^+ + \text{Ar}$, Kr have been measured, applying slow ions gathering techniques. The values are several 10^{-16} cm^2 and are almost constant between 20 and 200 eV collision energy. The comparison with previously published data for charge exchange into optically excited higher states of the ions show that these reactions prefer at least at 25 to 30% endothermic channels instead of the exothermic one without excitation. — Additionally the cross section of the endothermic process $\text{Ar}^+ + \text{Ne}$ was measured. Above a threshold energy of 17 eV it shows a strong increase and a constant value of $7 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$ between 20 and 200 eV.

Das bei Stoßenergien im keV-Bereich benutzte einfache Verfahren zur Ausmessung der totalen Wirkungsquerschnitte für Ladungsaustausch¹ liefert bei Stoßenergien unterhalb etwa 100 eV keine sicheren Ergebnisse. Mit abnehmender Stoßenergie nimmt nämlich bei der elastischen Streuung der Primärionen an Targetgas-Atomen der Ablenkungswinkel im Laborsystem zu, und elastisch gestreute Primärionen geraten zunehmend auf den Auffänger, an dem die Ladungsaustauschionen registriert werden, und verfälschen die gewonnenen Meßdaten. Daraus wird verständlich, daß bisher nur wenige Messungen sich bis zu niedrigen Energien erstrecken und diese teils starke Diskrepanzen untereinander zeigen^{2—5}. — Eine weitgehende Abtrennung der gestreuten Primärionen von den durch Ladungsaustausch gebildeten Ionen sollte aber mit einem verfeinerten Stoßkammeraufbau mit mehreren Elektroden, wie er in⁶ benutzt wurde, möglich sein.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Messung der totalen Wirkungsquerschnitte für Ladungsaustausch mehrerer Ion-Atom-Kombinationen der Edelgase bei Stoßenergien zwischen etwa 10 und 200 eV und der Vergleich mit den Werten anderer Autoren^{2—6}. Ein weiteres Ziel ist es, diese Werte mit den Wirkungsquerschnitten für Ladungsaustausch mit optischer Anregung der gebildeten Ionen^{7, 8} zu vergleichen.

* Jetzt Ruhr-Universität Bochum, Institut für Experimentalphysik.

Sonderdruckanforderungen erbeten an Prof. Dr. H. SCHLUMBOHM, Institut für Experimentalphysik der Universität Bochum, D-4630 Bochum, Buscheystraße.

¹ J. B. HASTED, *Advan. in Electronics and Electron Physics* **13**, 1 [1960]; Academic Press, London and New York.

² F. WOLF, *Ann. Phys.* **30**, 313 [1937].

³ J. H. B. STEDEFORD u. J. B. HASTED, *Proc. Roy. Soc. London A* **227**, 466 [1955].

Apparatur und Meßverfahren

Die verwendete Apparatur bestand aus der Ionenquelle, einer elektrostatischen Strahlfokussierung und einer Stoßkammer. Ionenquelle und Strahlfokussierung wurden bereits in einer vorangehenden Arbeit⁸ beschrieben. Der erzeugte Strahl unangeregter Ionen hatte eine Intensität zwischen 10^{-10} und 10^{-8} A . Die Stoßenergie war kontinuierlich von etwa 2 eV aufwärts einstellbar, die Energiebreite betrug 0,7 eV.

Das zur Messung der Ladungsaustausch-Wirkungsquerschnitte benutzte Verfahren geht davon aus, daß die gebildeten Ionen nur geringe kinetische Energien haben. Die Elektrodenanordnung der Stoßkammer hat daher die Aufgabe, alle langsamsten Ionen aufzusammeln und die schnelleren elastisch gestreuten Primärionen abzutrennen. Hierzu wurden ähnlich wie in⁶ konzentrisch um den primären Ionenstrahl zwei Gitter und in größerem Abstand eine zylindrische Mantel-elektrode angeordnet, siehe die schematische Abb. 1.

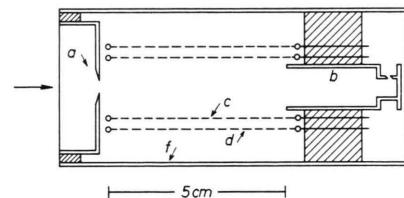


Abb. 1. Zylindrische Stoßkammer zur Messung der Wirkungsquerschnitte für Ladungsaustausch (schematisch). Der Pfeil (links) zeigt den Eintritt der Primärionen an. Es bedeuten: a Eintrittsblende für Primärstrahl, b Ionenkollektor für Primärstrahl, c inneres Gitter, d äußeres Gitter, f Mantel der Kammer.

⁴ H. B. GILBODY u. J. B. HASTED, *Proc. Roy. Soc. London A* **238**, 334 [1957].

⁵ D. W. KOOPMANN, *Phys. Rev.* **154**, 79 [1967].

⁶ P. MAHADEVAN u. G. D. MAGNUSON: a) *V. Intern. Conf. on the Physics of Electronic and Atomic Collisions*, Leningrad 1967; b) *Phys. Rev.* **171**, 103 [1968].

⁷ M. LIPELES, R. NOVICK u. N. TOLK, *Phys. Rev. Letters* **15**, 815 [1965].

⁸ H. SCHLUMBOHM, *Z. Naturforsch.* **23 a**, 970 [1968].



Das innere Gitter (c) befand sich auf Grundpotential, das äußere (d) wurde schwach negativ (0 bis -4 V) vorgespannt und der Mantel der Kammer (f) war positiv (0 bis +10 V) gegen Grundpotential. Bei geeigneter, experimentell ermittelter Einstellung der Potentiale wurde erreicht, daß alle in den Gitterbereich eintretenden langsamen Ionen auf dem äußeren Gitter (d) gesammelt wurden. Die unter großen Winkeln elastisch gestreuten Primärionen gelangten dagegen wegen ihrer höheren kinetischen Energien auf den äußeren Mantel (f) und wurden somit von den langsamen durch Ladungsaustausch gebildeten Ionen abgetrennt. Durch zusätzliche Registrierung der Ströme am inneren Gitter (c) und der Mantelelektrode (f) ließen sich Verfälschungen der Messung ausschließen, die durch Emission von Sekundärelektronen bei der Neutralisation der langsamen Ionen auftreten könnten.

Der Strahl der Primärionen trat durch eine auf Grundpotential liegende Blende (a) in die Stoßkammer ein und wurde zur Messung in dem Faraday-Käfig (b) am Ende der Kammer aufgefangen. Das Targetgas wurde durchströmend in die Kammer eingelassen. Der Druck wurde bei einigen 10^{-4} Torr gehalten, um Einzelstoßbedingungen zu gewährleisten. Die Druckmessung geschah mit einem durch McLeod-Vergleich gezeichneten Ionisationsmanometer.

Der gesuchte Wirkungsquerschnitt σ für Ladungsaustausch wurde aus der Beziehung

$$I_{\text{sec}} = \sigma l n_1 p I_{\text{pr}}$$

ermittelt. [I_{sec} ist der Strom der langsamen Ionen, I_{pr} der Strom der Primärionen, l die wirksame Länge der Kammer, n_1 die Teilchendichte bei 1 Torr (20 °C) und p der Druck des Target-Gases.] Diese Beziehung ist nur bis zu Drucken gültig, bei denen der am Kollektor gemessene Strom der Primärionen gegenüber dem Vakuumwert noch nicht merklich abgesunken ist; bei höheren Drucken sind Korrekturen erforderlich.

Die Unsicherheit der in der vorliegenden Arbeit angegebenen Wirkungsquerschnitte dürfte überwiegend von Fehlern der Druckmessung herrühren und sollte insgesamt unterhalb $\pm 30\%$ liegen.

Die untere Grenze der Stoßenergie der Primärionen, bei der die Anordnung noch verlässliche Werte liefert, hängt von der Wahl der Stoßpartner ab. Diese Grenze wird durch die Höhe der kinetischen Energien der durch Ladungsaustausch gebildeten langsamen Ionen, durch das Verhältnis von elastischer Streuung zum Ladungsaustausch und durch die Massen der Stoßpartner bestimmt. Aus den Erhaltungssätzen lässt sich folgern, daß für exotherme und auch für endotherme Systeme mit einem Unterschied der inneren Energien vor und nach dem Ladungsaustausch von etwa 10 eV die kinetischen Energien der Ladungsaustauschionen bei einigen eV liegen. Bei der elastischen Streuung treten große Winkel im Laborsystem besonders bei leichten Primärionen und schweren Target-Atomen auf. Bei primären Stoßenergien von 10 bis 20 eV hat ein Teil der gestreuten Ionen ebenfalls kinetische Energien von einigen eV. Die untere Grenze der Stoßenergie ist hier demnach bei 10 bis 20 eV zu erwarten, was vom Ex-

periment bestätigt wird. — Alle Meßreihen wurden bei den Stoßenergien abgebrochen, bei denen die vollständige Abtrennung der elastisch gestreuten Primärionen nicht mehr gewährleistet erschien. Diese Grenze ist experimentell dadurch gegeben, daß der Strom am Sammelgitter stark von den gewählten Vorspannungen abhängig wird und ein als erforderlich angesehenes „Plateau“ fehlt.

Ergebnisse der Messungen und Diskussion

$Ar^+ auf Ar$

Über den symmetrischen Resonanzladungsaustausch der Edelgase sind bisher am häufigsten Untersuchungen durchgeführt worden. Zum Test der benutzten Anordnung wurde daher in der vorliegenden Arbeit das System $Ar^+ + Ar$ gewählt.

Die erhaltenen Ergebnisse wurden als $\sqrt{\sigma}$ gegen $\ln E$ in Abb. 2 aufgetragen, da in diesem Diagramm der Vergleich mit den Angaben anderer Autoren be-

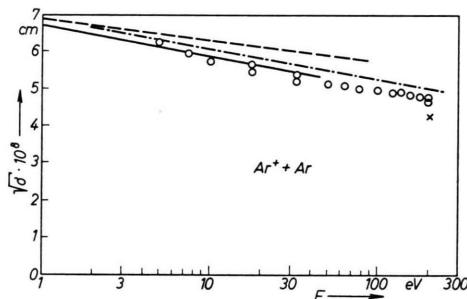


Abb. 2. Wirkungsquerschnitt σ für Resonanzladungsaustausch $Ar^+ + Ar$, aufgetragen als $\sqrt{\sigma}$ logarithmisch gegen die Stoßenergie E (Lab.). ○○○ eigene Werte, — nach ¹⁰, - - - neue Messung nach ^{6b}, - - - theoretischer Verlauf nach ⁹.

sonders übersichtlich ist. Die gewonnenen Daten liegen auf einer Geraden und genügen damit der theoretisch begründeten ⁹ Relation $\sqrt{\sigma} = a - b \ln E$. In das Diagramm wurden zum Vergleich zusätzlich zwei neuere Messungen und Ergebnisse der Theorie eingetragen. Innerhalb weniger Prozent stimmen die in der vorliegenden Arbeit erhaltenen Wirkungsquerschnitte mit denen nach ^{10b} überein und innerhalb der beiderseitigen Fehlergrenzen ebenfalls mit ^{6b}. Übereinstimmung mit den theoretischen Werten nach ⁹ ist innerhalb 10% vorhanden.

⁹ D. RAPP u. W. E. FRANCIS, J. Chem. Phys. **37**, 2631 [1962].

¹⁰ S. M. TRUJILLO, R. H. NEYNABER u. E. W. ROTHE: a) Rev. Sci. Instr. **37**, 1655 [1966]; b) Phys. Rev. **157**, 101 [1967].

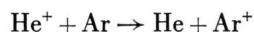
Tabelle 1 gibt die aus dem Diagramm ermittelten Konstanten a und b für die verschiedenen Messungen wieder.

Autor	$a \cdot 10^8$	$b \cdot 10^8$	Energie- bereich
	cm	cm	eV
eigene Messung	6,6	0,355	5–200
NEYNABER u. a. ^{10b}	6,7	0,368	0,2–40
MAHADEVAN u. a. ^{6b}	6,9	0,25	2,5–50
RAPP u. FRANCIS ⁹	6,95	0,37	

Tab. 1. Die Konstanten a und b für Resonanzladungsaustausch $\text{Ar}^+ + \text{Ar}$ der Relation $\nu\sigma = a - b \ln E$.

He^+ und Ne^+ auf Ar und Kr

In den Abb. 3 bis 6 sind die Wirkungsquerschnitte aufgetragen, die die Messungen für die folgenden unsymmetrischen Nichtresonanzsysteme



und

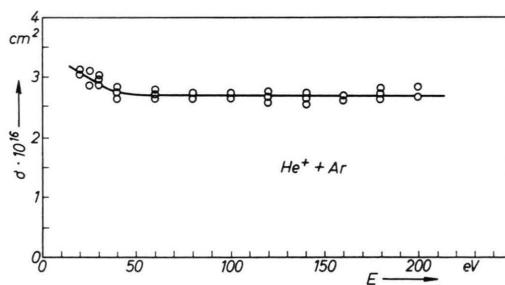
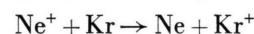


Abb. 3. Wirkungsquerschnitt σ für Ladungsaustausch $\text{He}^+ + \text{Ar}$, aufgetragen gegen die Stoßenergie E (Lab.) des He^+ .

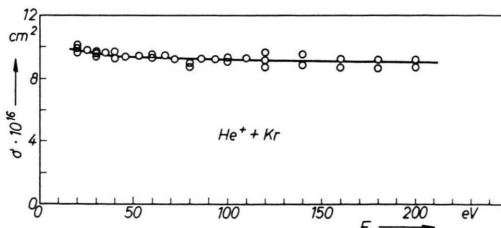


Abb. 4. Wirkungsquerschnitt σ für Ladungsaustausch $\text{He}^+ + \text{Kr}$, aufgetragen gegen die Stoßenergie E (Lab.) des He^+ .

ergeben haben. Sämtliche Verläufe zeigen von der oberen Grenze des Meßbereiches bei 200 eV bis herab zu einigen 10 eV annähernd konstante Werte.

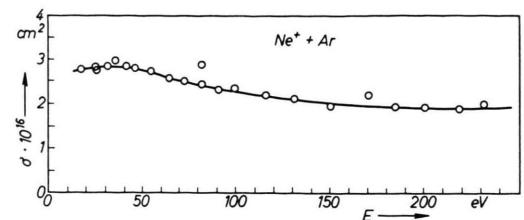


Abb. 5. Wirkungsquerschnitt σ für Ladungsaustausch $\text{Ne}^+ + \text{Ar}$, aufgetragen gegen die Stoßenergie E (Lab.) des Ne^+ .

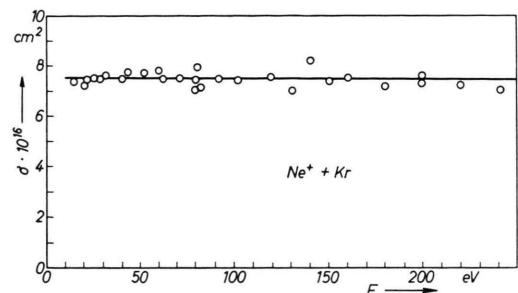


Abb. 6. Wirkungsquerschnitt σ für Ladungsaustausch $\text{Ne}^+ + \text{Kr}$, aufgetragen gegen die Stoßenergie E (Lab.) des Ne^+ .

Unterhalb etwa 15 eV zeigten die Messungen für jedes System mit abnehmender Stoßenergie einen starken Anstieg der Wirkungsquerschnitte. In die Diagramme wurden diese Anstiege nicht eingetragen, da in diesem Bereich die elastisch gestreuten Primärionen nur noch unvollständig von den durch Ladungsaustausch gebildeten Ionen abgetrennt sind und daher die gesuchten Wirkungsquerschnitte unterhalb 15 eV fehlerhaft sind.

System	σ eigene Messung	$a \cdot 10^8$ σ	$b \cdot 10^8$ σ	c^5 σ
$\text{He}^+ + \text{Ar}$	2,7	2,3	2,25	1,8
$\text{He}^+ + \text{Kr}$	9,0	—	—	2,8
$\text{Ne}^+ + \text{Ar}$	1,9	—	—	0,58 ⁴
$\text{Ne}^+ + \text{Kr}$	7,5	—	—	—

Tab. 2. Werte der Wirkungsquerschnitte für Ladungsaustausch verschiedener Ion/Atom-Kombinationen der Edelgase. Die Angaben sind in 10^{-16} cm^2 und beziehen sich auf eine Stoßenergie der Primärionen von 200 eV (Lab.).

In der Tab. 2 sind neben den eigenen Werten die von anderen Autoren erhaltenen Ergebnisse eingetragen. Für $\text{He}^+ + \text{Ar}$ stimmen die eigenen Werte mit denen der Spalten a und b innerhalb der Fehlergrenzen gut überein. Außerdem wurde in ^{6b} die gleiche Energieabhängigkeit des Wirkungsquerschnitts gefunden. Damit kann dieser Prozeß als quantitativ gesichert angesehen werden. — Nur für das System

$\text{He}^+ + \text{Kr}$ liegt außerdem ein kürzlich gemessener Vergleichswert vor (Spalte c), der jedoch erheblich niedriger als der neue Wert ist. Überraschend bei dieser Diskrepanz ist, daß der eigene Wert für das System $\text{He}^+ + \text{Ar}$ mit der Angabe des gleichen Autors noch innerhalb der beiderseitigen Fehlern Grenzen von 20 bis 30% übereinstimmt. — Eine mögliche Fehlmessung des Stoßkammerdruckes bei Krypton wurde untersucht und kann ausgeschlossen werden, so daß die Ursache dieser Diskrepanz nicht aufgeklärt werden konnte. — Die in der letzten Spalte aufgezeichneten älteren Werte nach ³ und ⁴ liegen erheblich unter den anderen Daten. Dies ist vermutlich auf eine unvollständige Sammlungseigenschaft für die langsamen Ionen bei der in diesen Arbeiten benutzten Anordnung zurückzuführen.

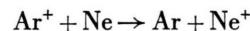
Die vier untersuchten Systeme sind exotherm, falls von möglichen Anregungen des Ions und des Atoms nach dem Ladungsaustausch abgesehen wird. Die Überschüsse der inneren Energie liegen zwischen 5,8 und 10,5 eV und müssen nach dem Stoß in kinetische Energie übergeführt werden. Bei den vorliegenden Systemen gibt es keine Anregungsmöglichkeiten, durch die dieser Energieüberschuß zwar verringert wird, aber die Prozesse noch exotherm bleiben oder zufällige Energieresonanz erreichen. Schon das System $\text{He}^+ + \text{Kr}$ wird bei Anregung des niedrigsten Zustandes des entstehenden Kr^+ -Ions endotherm und erhält ein Defizit an innerer Energie von 3,6 eV. (Berechnet mit den Tabellen der Energieniveaus aus ¹¹.)

Wie nun die Untersuchungen der Lichtemission gezeigt haben ^{7, 8, 12}, erfolgt für die untersuchten Systeme der Ladungsaustausch aber zumindest teilweise endotherm mit optischer Anregung. In Tab. 3 sind die Wirkungsquerschnitte für die endothermen

Kanäle (d. h. für verschiedene Anregungsniveaus der Ionen) mit den totalen Wirkungsquerschnitten bei 200 eV Stoßenergie verglichen. In der dritten Spalte ist das Verhältnis $\sigma_{\text{opt}}/\sigma_{\text{tot}}$ eingetragen und liefert überraschend innerhalb enger Grenzen Werte von 25 bis 30%. Die hier erfaßten Emissionen liegen überwiegend im Sichtbaren und daher handelt es sich um höhere Anregungsstufen der Ionen. Die Strahlung der tiefsten Anregungsstufen liegt im Vakuum-UV-Bereich und ist daher hierin nicht enthalten. — In den beiden letzten Spalten sind abgeschätzte Werte ⁷ für die Bereiche 200 bis 1200 Å und 1050 bis 3500 Å eingetragen. Der Vergleich von σ_{tot} mit dem Wert für den Vakuum-UV-Bereich zeigt, daß für $\text{He}^+ + \text{Ar}$ der Ladungsaustausch möglicherweise vollständig endotherm und mit Anregung erfolgt.

$\text{Ar}^+ \text{ auf Ne}$

Als Beispiel für einen schon ohne Anregung des sekundären Ions endothermen Prozeß wurde die Reaktion



untersucht. Diese hat ein Defizit an innerer Energie von $\Delta E = I(\text{Ar}) - I(\text{Ne}) = -5,81 \text{ eV}$, das aus der kinetischen Energie des primären Ions gedeckt werden muß. ($I(\text{Ar}) = 15,75 \text{ eV}$, $I(\text{Ne}) = 21,56 \text{ eV}$ ¹¹.) In der Abb. 7 ist der ermittelte Wirkungsquerschnitt gegen die Stoßenergie aufgetragen. Oberhalb 20 eV ist er konstant und hat mit $6,6 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$ einen etwa dreimal niedrigeren Wert als der umgekehrte exotherme Prozeß $\text{Ne}^+ + \text{Ar}$. Unterhalb etwa 20 eV fällt der Wirkungsquerschnitt dann mit abnehmender Stoßenergie steil ab und erreicht zwischen 16 und 18 eV seine Einsatzschwelle. Die erforderliche

System	σ_{tot}	σ_{opt}^8	für λ -Bereich [Å]	$\sigma_{\text{opt}}/\sigma_{\text{tot}}$	σ_{opt}^7 1050–3500 Å	σ_{opt}^7 200–1200 Å
$\text{He}^+ + \text{Ar}$	2,7	0,63	3500–5700	0,23	0,05	2,1
$\text{He}^+ + \text{Kr}$	9,0	2,3	3500–5200	0,25	0,14	3,2
$\text{Ne}^+ + \text{Ar}$	1,9	0,55	3500–5000	0,29	—	—
$\text{Ne}^+ + \text{Kr}$	7,5	1,8	3500–5200	0,24	—	—

Tab. 3. Vergleich der totalen Wirkungsquerschnitte σ_{tot} für Ladungsaustausch mit den für optische Anregung verschiedener Spektralbereiche gemessenen Werten σ_{opt} . Alle σ in 10^{-16} cm^2 . Die Daten beziehen sich auf 200 eV Stoßenergie der Primärionen.

¹¹ CH. MOORE, Atomic Energy Levels, Vol. I, II; National Bureau of Standards, Washington 1949, 1952.

¹² Siehe auch D. JAECKS, F. J. DE HEER u. A. SALOP, Physica 36, 606 [1967]. Da in dieser Arbeit nur Messungen oberhalb 300 eV angestellt wurden, konnten sie hier nicht herangezogen werden.

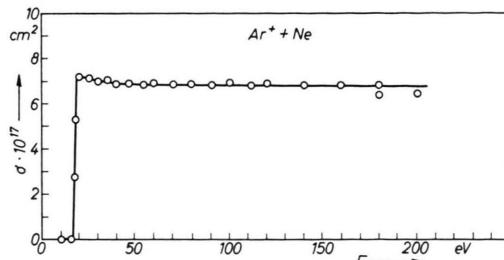


Abb. 7. Wirkungsquerschnitt σ für Ladungsaustausch für das endotherme System $\text{Ar}^+ + \text{Ne}$, aufgetragen gegen die Stoßenergie E (Lab.) des Ar^+ .

Mindeststoßenergie berechnet sich aus dem zu dekenden Energiedefizit ΔE als $E_{\text{kin}} = |\Delta E| \cdot (m_{\text{Ar}} + m_{\text{Ne}})/m_{\text{Ne}}$ zu 17,43 eV. Dieser Wert stimmt mit der experimentell erhaltenen Energieschwelle innerhalb

der experimentellen Unsicherheit überein. Dies zeigt, daß der Prozeß bereits bei der niedrigst möglichen Stoßenergie einsetzt. — Das gleiche Ergebnis wurde für das ebenfalls endotherme System $\text{Ar}^+ + \text{He}$ in ^{6b} gefunden.

Die Beobachtung der Schwelle für dieses Ladungsaustauschsystem bestätigt, daß der primäre Ar^+ -Ionenstrahl wie erwartet frei von angeregten Ionen war. Für angeregte Ar^+ -Ionen verlief die Reaktion nämlich exotherm und würde dann sicherlich schon im Gegensatz zur Beobachtung unterhalb der Schwelle auftreten. Außerdem zeigt das Ergebnis, daß offenbar eine vollständige Abtrennung der elastisch gestreuten Primärionen erreicht wird.

Herrn Professor Dr. H. RAETHER danke ich für die Überlassung von Institutsmitteln zur Durchführung dieser Untersuchung.

Dissoziativer Ladungsaustausch von He^+ - und Ne^+ -Ionen mit den Molekülen N_2 , O_2 und CO_2 bei Stoßenergien von 3 bis 200 eV

H. SCHLUMBOHM *

Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg

(Z. Naturforsch. **24 a**, 1720—1724 [1969]; eingegangen am 19. August 1969)

Cross sections for the dissociative charge transfer reactions $\text{He}^+ + \text{N}_2$, O_2 and $\text{Ne}^+ + \text{N}_2$, O_2 , CO_2 have been measured over an energy range from 3 to 200 eV and are compared with values given by other authors. The values were determined from measurements of the current of the slow charge exchange ions formed within a collision chamber.

Für den Ladungsaustausch von Edelgasionen mit Molekülen liegen mehrere massenspektrometrische Messungen vor, die zeigen, daß diese Prozesse bei Stoßenergien im 100 eV-Bereich überwiegend dissoziativ ablaufen. So werden bei $\text{He}^+ + \text{N}_2$ und O_2 überwiegend die Atomionen N^+ und O^+ gebildet¹, bei $\text{Ne}^+ + \text{N}_2$ ebenfalls N^+ ^{2,3} und bei $\text{Ne}^+ + \text{CO}_2$ überwiegend CO^+ ⁴. Die mit massenspektrometrischen Anordnungen ermittelten Wirkungsquerschnitte können erhebliche Unsicherheiten enthalten, die mit der Anbringung des Nachweismassenspektrometers an die Stoßkammer verbunden sind, und demzufolge zeigen die von den verschiedenen Autoren angegebenen Werte starke Diskrepanzen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle Bestimmung der Wirkungsquerschnitte für die genannten Prozesse bei Stoßenergien zwischen etwa 3 und 200 eV. Hierzu wird eine Anordnung mit einer Stoßkammer ohne Massenspektrometer verwendet, die gerade daher recht verlässliche Wirkungsquerschnitte zu messen gestatten sollte.

Apparatives

Die benutzte Anordnung ist ausführlich in einer vorangehenden Arbeit beschrieben⁵, in der über die dort durchgeführten Messungen an Edelgassystemen berichtet wird.

* Jetzt Ruhr-Universität Bochum, Institut für Experimentalphysik.

Sonderdruckanforderungen erbeten an Prof. Dr. H. SCHLUMBOHM, Institut für Experimentalphysik der Universität Bochum, D-4630 Bochum, Buscheystraße.

¹ R. F. STEBBINGS, A. C. H. SMITH u. H. EHRHARDT, J. Chem. Phys. **39**, 968 [1963].

² E. GUSTAFSSON u. E. LINDHOLM, Arkiv Fysik **18**, 219 [1961].

³ W. B. MAIER II, J. Chem. Phys. **41**, 2174 [1964].

⁴ E. LINDHOLM, Z. Naturforsch. **9 a**, 535 [1954].

⁵ H. SCHLUMBOHM, Z. Naturforsch. **24 a**, 1716 [1969].