

Die Übertragung der entwickelten Überlegungen auf polynäre Isotopengemische in großen, geschlossenen Trennrohranlagen wird zur Zeit am hexanären Gemisch der Kryptonisotope theoretisch und experimentell eingehender untersucht.

Herrn Prof. Dr. Dres. h. c. W. JOST möchte ich für die allseitige Förderung dieser Arbeit danken. Dem Fonds der Chemischen Industrie danke ich für finanzielle Unterstützung.

## Die Diffusion der Uredelgase Helium, Neon und Argon im Meteoriten Fayetteville

R. H. BIERI

University of California San Diego, La Jolla,

und H. FECHTIG

Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg

(Z. Naturforsch. **23 a**, 222–228 [1968]; eingegangen am 18. November 1967)

The diffusion of the primordial noble gases helium, neon and argon in several samples of the dark phase of the meteorite Fayetteville was investigated. It is found that the diffusion rates of the primordial noble gases are apparently 3 to 5 orders of magnitude higher than the diffusion rates of the gases which derive from spallation reactions. These differences however are explained by the location of the primordial noble gases in layers close to the surface of the single crystals. The average ratio between the crystal diameters and the thickness of the layers is calculated. The results are in agreement with the idea that the primordial gases were incorporated in the meteoritic material after solidification.

Wie aus einer Reihe von Edelgasmessungen<sup>1–6</sup> am Chondriten Fayetteville bekannt ist, besitzt dieser Meteorit den höchsten bisher bekannten Uredelgasgehalt. Die Uredelgase befinden sich offenbar ausschließlich in der dunklen Phase dieses Meteoriten. Es erschien uns daher interessant, an diesem Material das Diffusionsverhalten der Uredelgase zu studieren, obwohl wir uns der Schwierigkeit bewußt sind, aus solchen Messungen quantitative Schlüsse zu ziehen. Ein Vergleich der Resultate mit denen von nichturgashaltigen Meteoriten sollte jedoch prinzipielle Unterschiede aufdecken und gewisse Schlüsse zulassen.

Das Meßprogramm erfolgte in zwei Teilen. Im ersten Teil wird eine Probe sukzessive von Zimmertemperatur bis zu 1000 °C getempert. Die bei den einzelnen Zwischentemperaturen entweichenden Gase wurden aufgefangen und in einem Massenspektrometer auf ihre Isotope analysiert. In einem zweiten Teil wurden verschiedene Proben bei jeweils konstanter Temperatur erhitzt und die durch Diffusion nach verschiedenen langen Zeiten entwichenen Gase aufgefangen und im Massenspektrometer analysiert.

Die Gasextraktionsapparatur ist in Abb. 1 dargestellt. Die Probe befindet sich in einem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Rohr, das mit Hilfe eines Regelofens auf beliebiger Temperatur zwischen Zimmertemperatur und 1000 °C gehalten werden kann mit einem Regelintervall von 1%. Die entweichenden Gase werden in der skizzierten Glasapparatur aufgefangen. Die Reinigung des Gasgemisches erfolgte mit Titan-Schwamm bei ca. 800 °C. Nach jedem Meßschritt wird ein Teilvolumen  $V_i$  abgeschmolzen und mit dem Massenspektrometer analysiert. Die Teilvolumina  $V_i$  sind zuvor ausgemessen worden, das Apparatevolumen wurde mit Hilfe eines Stickstoffreservoirs und eines Hg-Manometers ausgemessen. Die gesamte Glasapparatur konnte bei 300 °C ausgeheizt werden, ebenso die verwendeten Metallventile.

### I. Kontinuierliche Messungen

Die Einwaage für die Meßreihe der kontinuierlichen Messung bestand in einem kompakten Stück der dunklen Phase des Chondriten Fayetteville von 81,6 mg. Für jeweils 1 Stunde wurde diese Probe bei 100, 150, 300, 350, 400, 500, 600, 800 und 1000 °C getempert und die entwichenen Helium-, Neon- und Argonmengen in der oben beschriebenen Weise aufgefangen, gereinigt und im Massenspektrometer gemessen.

<sup>1</sup> P. SIGNER, Trans. Am. Geophys. Union **44**, 87 [1963].

<sup>2</sup> O. K. MANUEL, Thesis, University of Arkansas 1964.

<sup>3</sup> O. K. MANUEL u. P. K. KURODA, J. Geophys. Res. **69**, 1413 [1964].

<sup>4</sup> H. HINTENBERGER, H. KÖNIG, L. SCHULTZ u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **19 a**, 327 [1964].

<sup>5</sup> O. R. PEPIN u. P. SIGNER, Science **149**, 253 [1965].

<sup>6</sup> O. MÜLLER u. J. ZÄHRINGER, Earth and Planetary Science Letters **1**, 25 [1966].



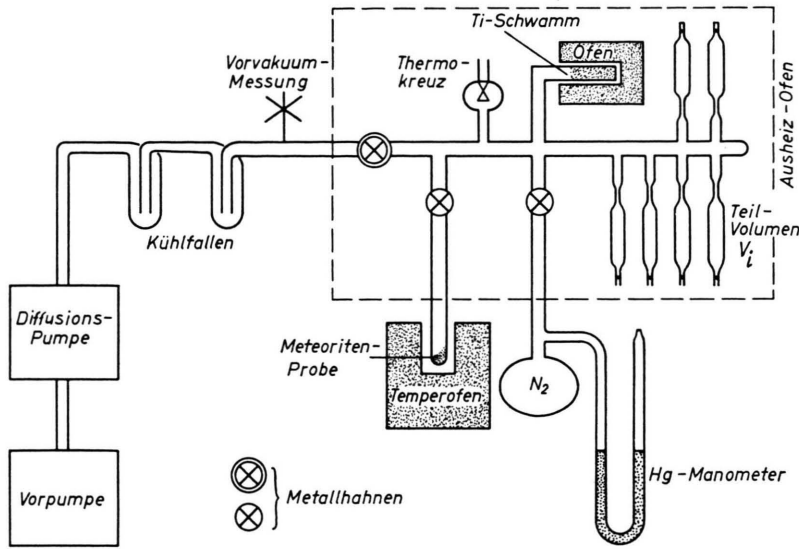


Abb. 1. Edelgas-Diffusionsapparat.

Zur Berechnung der Diffusionsparameter  $D/a^2$  aus den Entgasungsraten kann man unter Annahme der üblichen Idealisierungen (Einzelkristallite haben Kugelgestalt mit Radius  $a$ , isotrope Diffusion, homogene Anfangskonzentration) die Näherungsformel von CARSLAW und JAEGER<sup>7</sup> benutzen:

$$\frac{C_0 - C}{C_0} = \frac{6}{\sqrt{\pi}} \times \left( \frac{Dt}{a^2} \right)^{1/2} - 3 \frac{Dt}{a^2} \quad (1)$$

$$\frac{D_k}{a^2} = \frac{\pi}{36} \times \frac{F_k^2 - F_{k-1}^2}{t_k - t_{k-1}} \quad \text{für } F_k < 10\%, \quad (2a)$$

$$\frac{D_k}{a^2} = \frac{1}{\pi^2 (t_k - t_{k-1})} \left\{ -\frac{\pi^2}{3} (F_k - F_{k-1}) - 2\pi \left( \sqrt{1 - \frac{\pi}{3} F_k} - \sqrt{1 - \frac{\pi}{3} F_{k-1}} \right) \right\} \quad \text{für } F_k < 90\% \quad (2b)$$

mit  $C_k$  = Konzentration nach der  $k$ -ten Entgasung,  $t_k - t_{k-1}$  = Dauer der  $k$ -ten Entgasung.

Die eingewogene Probe von 81,6 mg hatte folgenden gesamten Edelgasgehalt:

$$\left. \begin{array}{r} 290 \\ 824\,800 \\ 353 \\ 307,6 \\ 57,6 \\ 5\,809 \end{array} \right\} \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g NTP} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{He}^3 \\ \text{He}^4 \\ \text{Ne}^{22} \\ \text{Ar}^{36} \\ \text{Ar}^{38} \\ \text{Ar}^{40} \end{array} \right.$$

Zur Berechnung der Diffusionsparameter  $D/a^2$  aus den einzelnen Entgasungsraten wurde ausschließlich die einfachere Beziehung (2 a) verwendet, die auch bei größeren Gasverlusten mit Gleichung (2 b) innerhalb eines Faktors 2 übereinstimmt. Da es sich bei den weiteren Betrachtungen stets um Größenord-

nungen handelt, kann dieser Fehler in Kauf genommen werden. Als Ergebnis sind in Abb. 2 die Diffusionsparameter  $D/a^2$  als Funktion der reziproken absoluten Temperatur  $1000/T$  aufgetragen. Infolge des Zusammenganges

Diese Beziehung kann man für Gasverluste unterhalb 10% unter Vernachlässigung des zweiten Gliedes benutzen. Als Lösung ohne oder mit dem linearen Term von Gl. (1) ergibt sich unter Verwendung von  $F_k = (C_0 - C_k)/C_0$  folgende Rekursionsformel:

$D_0 = \text{const}$ ,  $R$  = Gaskonstante,  $T$  = absolute Temperatur, muß sich für diskrete Werte von  $D$  und  $a$  im  $\log D/a^2 - 1/T$ -Diagramm eine Gerade ergeben, wenn die Aktivierungsenergie  $Q$  im betrachteten Tempera-

$$\frac{D}{a^2} = \frac{D_0}{a^2} \cdot \exp\{-Q/RT\} \quad (3)$$

<sup>7</sup> H. S. CARSLAW u. J. C. JAEGER, Conduction of Heat in Solids, 2nd Edition, Clarendon Press, Oxford 1959; p. 92.

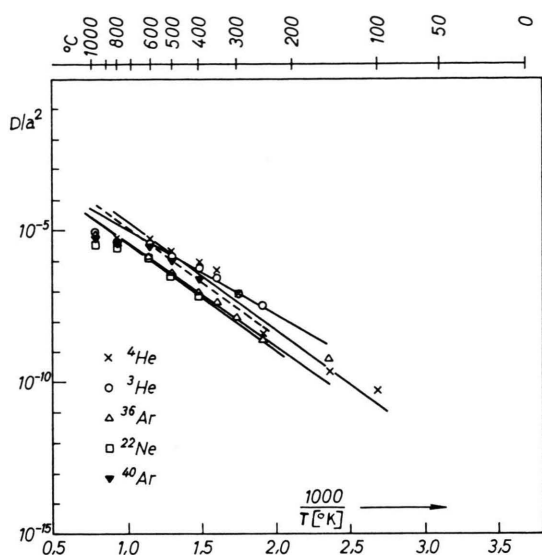


Abb. 2. Diffusionsparameter  $\log D/a^2$  als Funktion der reziproken absoluten Temperatur ( $1000/T$ ) für Helium, Neon und Argon der kontinuierlichen Entgasung einer Probe des Meteoriten Fayetteville.

turintervall konstant ist. Diese einfache, lineare Beziehung verliert ihre Gültigkeit für ein Spektrum von  $D$ -Werten (entsprechend den verschiedenen mineralogischen Komponenten) oder für eine breite Korngrößenverteilung, da der relative Beitrag der einzelnen Komponenten dann selbst eine Funktion des Entgasungsgrades ist. Die Meßergebnisse in Abb. 2 können in ungefähre Übereinstimmung mit einem linearen Zusammenhang gebracht werden.

Die aus der Steigung der Kurven gemäß Gl. (3) berechneten Werte für die Aktivierungsenergien  $Q$  der gemessenen Isotope liegen zwischen 12 und 17 kcal/mol. Bei den auf Zimmertemperatur extrapolierten Werten des Diffusionsparameters von  $D/a^2 \approx 10^{-12} \text{ sec}^{-1}$  und bezüglich der gemessenen Aktivierungsenergien zeigt sich bereits eine merk-

liche Abweichung gegenüber den von FECHTIG, GENTNER und LÄMMERZAHN<sup>8</sup> für die Spallationsgase in Meteoriten gemessenen Werten. Es scheint, daß sich eine erhöhte oder scheinbar erhöhte Diffusionsrate bei Fayetteville für die Uredelgase ergibt.

## II. Messungen bei konstanten Temperaturen

Um die am Ende des Abschnitts I geäußerte Vermutung erhöhter Diffusionsraten bei Uredelgasen zu überprüfen und um insbesondere den von LÄMMERZAHN<sup>9</sup> diskutierten Korngrößeneffekt zu erfassen und zu korrigieren, wurden an verschiedenen, jeweils frischen Probestücken von Fayetteville Entgasungsexperimente bei konstanter Temperatur durchgeführt. Anschließend wurden die durch diese Experimente teilweise entgasten Proben aufgeschmolzen, um den Gesamtgasgehalt der einzelnen Proben zu ermitteln.

Um die Aussagen genauer dem Diffusionsverhalten der Uredelgase zuordnen zu können, wurden die bei den einzelnen Diffusionsmessungen erhaltenen Gasmengen von den spallogenen bzw. radiogenen Komponenten getrennt. Das Isotopenverhältnis des Spallationsneons bei Chondriten ist aus vielen Messungen (KIRSTEN, KRANKOWSKI und ZÄHRINGER<sup>10</sup>, ZÄHRINGER<sup>11</sup>) bekannt und beträgt im Mittel

$$\text{Ne}_{\text{Sp}}^{20} : \text{Ne}_{\text{Sp}}^{21} : \text{Ne}_{\text{Sp}}^{22} = 0,9 : 1 : 1,15;$$

Isotopenverschiebungen des Urneons sind von der Massenzahl-Differenz abhängig, wobei stets

$$\delta(\text{Ne}_{\text{Ur}}^{20}/\text{Ne}_{\text{Ur}}^{22}) = 2 \delta(\text{Ne}_{\text{Ur}}^{21}/\text{Ne}_{\text{Ur}}^{22})$$

gilt. Das genügt für die Korrektur, die beim  $\text{Ne}^{20}$  unbedeutend und auch beim  $\text{Ne}^{22}$  nur geringfügig ist. Das Spallationshelium läßt sich über die für Chondrite gefundenen Beziehungen

$$\text{He}_{\text{Sp}}^3/\text{Ne}_{\text{Sp}}^{21} = 5 \quad \text{und} \quad \text{He}_{\text{Sp}}^4/\text{He}_{\text{Sp}}^3 = 4$$

°C	He <sup>3</sup>	He <sup>3</sup> <sub>ur</sub>	He <sup>4</sup>	He <sup>4</sup> <sub>ur</sub>	Ne <sup>20</sup>	Ne <sup>20</sup> <sub>ur</sub>	Ne <sup>21</sup>	Ne <sup>21</sup> <sub>ur</sub>	Ne <sup>22</sup>	Ne <sup>22</sup> <sub>ur</sub>	Ar <sup>36</sup>	Ar <sup>36</sup> <sub>ur</sub>	Ar <sup>38</sup>	Ar <sup>38</sup> <sub>ur</sub>	Ar <sup>40</sup>	Ar <sup>40</sup> <sub>ur</sub>
200	98	91	304600	303000	1799	1798	6,2	4,8	156	154	119,4	119,4	22,5	22,5	2864	<239
400	230	205	707100	705000	3711	3706	14,7	9,7	312	306	243,1	241,8	47,8	45,9	5623	<484
500	58	26	77200	76000	371	365	7,4	1,0	41	33	26,6	25,6	6,4	4,9	5417	< 51
600	341	311	962400	961000	2495	2490	12,7	6,7	228	221	136,8	135,3	28,0	25,7	4138	<270

Tab. 1. Gesamt- und Urgasgehalt der untersuchten Proben von Fayetteville in  $10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g}$ .

<sup>8</sup> H. FECHTIG, W. GENTNER u. P. LÄMMERZAHN, *Geochim. Cosmochim. Acta* **27**, 1149 [1963].

<sup>9</sup> P. LÄMMERZAHN, Diplomarbeit, Universität Heidelberg 1963.

<sup>10</sup> T. KIRSTEN, D. KRANKOWSKI u. J. ZÄHRINGER, *Geochim. Cosmochim. Acta* **27**, 13 [1963].

<sup>11</sup> J. ZÄHRINGER, Preprint 1967.

<sup>12</sup> P. LÄMMERZAHN u. J. ZÄHRINGER, *Geochim. Cosmochim. Acta* **30**, 1059 [1966].

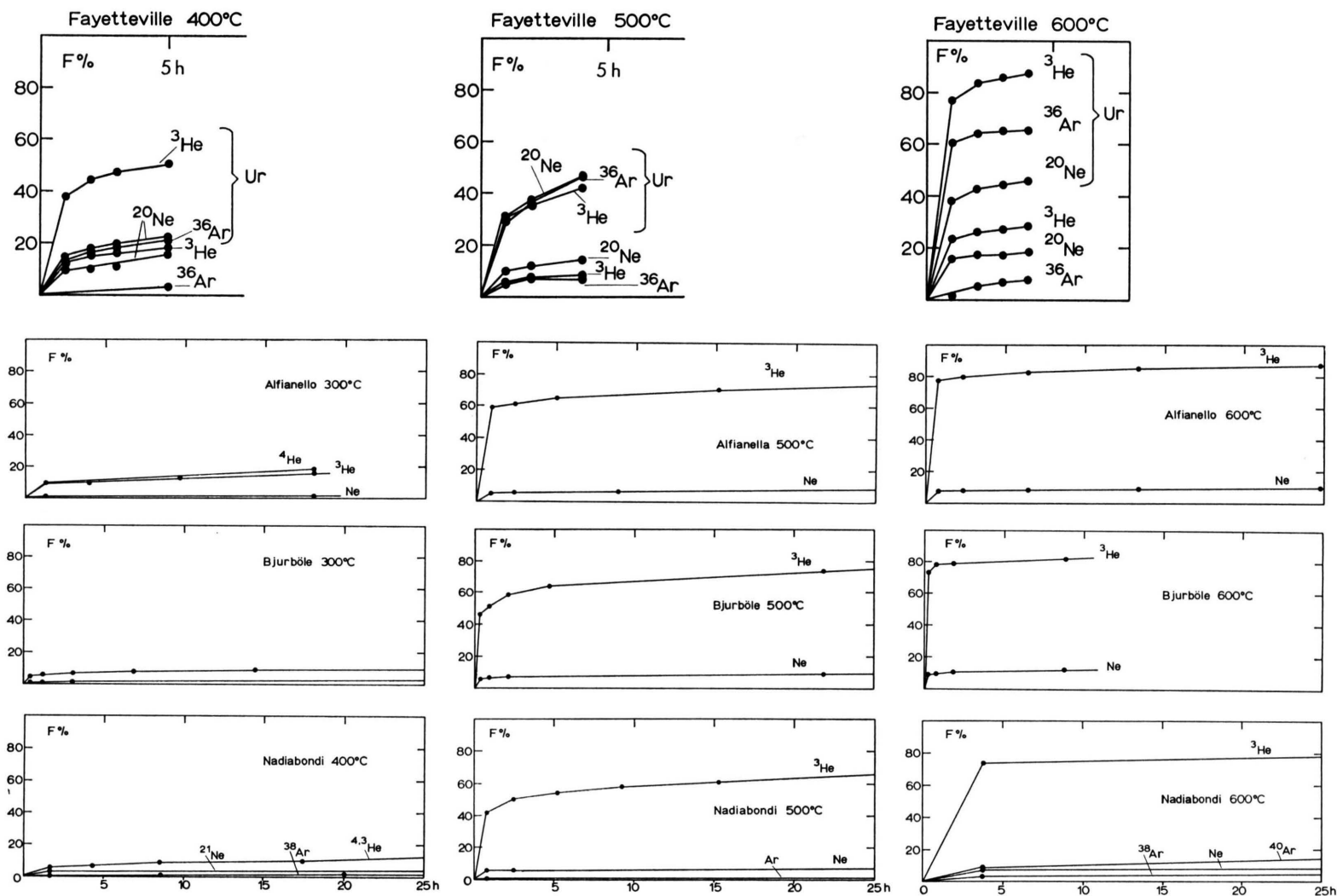


Abb. 3. Vergleich der relativen Entgasungsraten der Spallationsedelgase der Meteoriten Fayetteville, Alfianello, Bjurböle und Nadiabondi mit den relativen Entgasungsraten der Uredelgase in Fayetteville. (Der Deutlichkeit wegen sind die Fayetteville-Diagramme vergrößert dargestellt.)

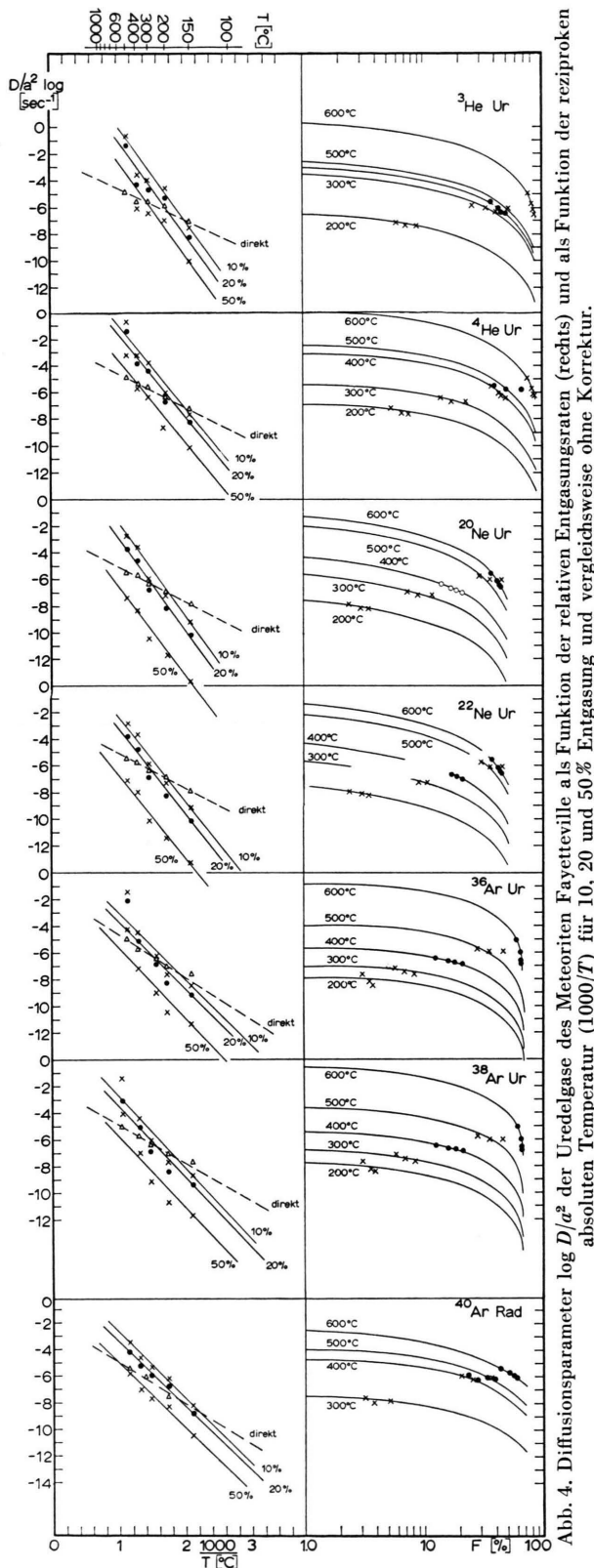


Abb. 4. Diffusionsparameter  $\log D/a^2$  der Uredelgase des Meteoriten Fayetteville als Funktion der relativen Entgasungsrate (rechts) und als Funktion der reziproken absoluten Temperatur ( $1000/T$ ) für 10, 20 und 50% Entgasung und vergleichsweise ohne Korrektur.

abschätzen und fällt bei den meisten Messungen kaum ins Gewicht. Der radiogene  $\text{He}_{\text{Rad}}^4$ -Gehalt von Chondriten liegt bei etwa  $10^{-5} \text{ cm}^3/\text{g}$  und ist hier zu vernachlässigen. Bei  $\text{Ar}^{36}$  und  $\text{Ar}^{38}$  lassen sich Spallations- und Urgasanteil mittels  $\text{Ar}_{\text{Sp}}^{38}/\text{Ar}_{\text{Sp}}^{36} = 1,6$  und  $\text{Ar}_{\text{Ur}}^{38}/\text{Ar}_{\text{Ur}}^{36} = 0,19$  leicht trennen, die Spallationskorrektur ist stets klein.  $\text{Ar}^{40}$  ist fast ausschließlich radiogen, denn es ist  $\text{Ar}_{\text{Sp}}^{40} = 0,2 \text{ Ar}_{\text{Sp}}^{38}$  (LÄMMERZAHL und ZÄHRINGER<sup>12</sup>) und es gilt ferner<sup>11</sup>

$$\text{Ar}_{\text{Ur}}^{40} \leq 2 \text{ Ar}_{\text{Ur}}^{36}.$$

Mit Hilfe der angegebenen Beziehungen wurden sowohl für die einzelnen Entgasungsfraktionen als auch für die Gesamtgehalte der untersuchten Proben die Urgasanteile abgeschätzt. Für die Gesamtgehalte sind die Ergebnisse der bei 200, 400, 500 und 600 °C entgasten Proben in Tab. 1 zusammengefaßt. Daraus folgt, daß (mit Ausnahme von  $\text{Ne}^{21}$  und  $\text{Ar}^{40}$ ) der überwiegende Anteil Urgase sind. Die Abtrennung der spallogenen Gase hat somit den Charakter einer Korrektur, weshalb die folgenden Betrachtungen von ihr nicht beeinflußt werden.

Durch Verwendung von Diffusionsdaten der Spallationsedelgase einiger Chondriten, gemessen von LÄMMERZAHL<sup>9</sup>, lassen sich die relativen Gasverluste als Funktion der Zeit graphisch auftragen. Dieses ist in Abb. 3 für die Chondriten Alfianello, Bjurböle und Nadiabondi für verschiedene Temperaturen dargestellt. Diesen Diagrammen sind die entsprechenden Diagramme für die Spallations- und Urgase des Chondriten Fayetteville gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, daß sich die Spallationsgase des Chondriten Fayetteville ähnlich verhalten wie die Spallationsgase der Vergleichsmeteoriten. Eine weitaus größere Entgasungsrate zeigen demgegenüber die Urgase von Fayetteville.

Für die vorhandenen Meßwerte wurden die Diffusionsparameter  $D/a^2$  gemäß der Beziehung (2 a) berechnet. Die Ergebnisse sind in den Diagrammen der Abb. 4 zusammengestellt. Auf dem rechten Teil der Abb. 4 sind für die einzelnen Temperaturen die ermittelten  $D/a^2$ -Werte als Funktion der relativen Entgasung  $F$  aufgetragen. Nach der von LÄMMERZAHL<sup>9</sup> angegebenen Methode läßt sich durch diese Meßpunkte eine Parallelkurvenschar zeichnen, die es erlaubt, für interessierende Entgasungsgrade die  $D/a^2$ -Werte zu extrapolieren. Dieses wurde für die Entgasungsgrade 10, 20 und 50% durchgeführt und die so erhaltenen Werte für  $D/a^2$  in den Diagrammen der linken Seite der Abb. 4 als Funktion der



Meteorit	Helium		Neon		Argon <sup>38</sup>		Argon <sup>40</sup> (radiogen)	
	$Q$ kcal mol	$D/a^2$ (10%) sec <sup>-1</sup>	$Q$ kcal mol	$D/a^2$ (10%) sec <sup>-1</sup>	$Q$ kcal mol	$D/a^2$ (10%) sec <sup>-1</sup>	$Q$ kcal mol	$D/a^2$ (10%) sec <sup>-1</sup>
Fayetteville	32 (11)	$2 \cdot 10^{-7}$ ( $1 \cdot 10^{-7}$ )	$1 \cdot 10^{-6}$ ( $1 \cdot 10^{-7}$ )	$3 \cdot 10^{-9}$ ( $3 \cdot 10^{-8}$ )	$8 \cdot 10^{-8}$ ( $3 \cdot 10^{-8}$ )	$5 \cdot 10^{-8}$ ( $2 \cdot 10^{-8}$ )	$2 \cdot 10^{-8}$ ( $9 \cdot 10^{-9}$ )	$1 \cdot 10^{-7}$ ( $9 \cdot 10^{-9}$ )
Alfanello	43 (25)	$1 \cdot 10^{-10}$ ( $9 \cdot 10^{-10}$ )	$8 \cdot 10^{-9}$ ( $9 \cdot 10^{-10}$ )	$1 \cdot 10^{-15}$ ( $1 \cdot 10^{-11}$ )	$4 \cdot 10^{-11}$ ( $1 \cdot 10^{-11}$ )	$2 \cdot 10^{-12}$ ( $2 \cdot 10^{-12}$ )	$8 \cdot 10^{-41}$ ( $3 \cdot 10^{-12}$ )	$8 \cdot 10^{-13}$ ( $3 \cdot 10^{-12}$ )
Bjurböle	43 (25)	$5 \cdot 10^{-11}$ ( $6 \cdot 10^{-10}$ )	$2 \cdot 10^{-9}$ ( $6 \cdot 10^{-10}$ )	$6 \cdot 10^{-14}$ ( $2 \cdot 10^{-10}$ )	$7 \cdot 10^{-10}$ ( $2 \cdot 10^{-10}$ )	$2 \cdot 10^{-9}$ ( $2 \cdot 10^{-9}$ )	$8 \cdot 10^{-12}$ ( $2 \cdot 10^{-9}$ )	$3 \cdot 10^{-8}$ ( $2 \cdot 10^{-9}$ )
Nadiabondi	35 (23)	$1 \cdot 10^{-11}$ ( $1 \cdot 10^{-10}$ )	$1 \cdot 10^{-10}$ ( $1 \cdot 10^{-10}$ )	$2 \cdot 10^{-15}$ ( $2 \cdot 10^{-10}$ )	$8 \cdot 10^{-10}$ ( $3 \cdot 10^{-8}$ )	$3 \cdot 10^{-17}$ ( $5 \cdot 10^{-15}$ )	$1 \cdot 10^{-17}$ ( $2 \cdot 10^{-13}$ )	$5 \cdot 10^{-15}$ ( $2 \cdot 10^{-13}$ )

Tab. 2. Aktivierungsenergien  $Q$  (kcal/mol) und Diffusionsparameter  $D/a^2$  (sec<sup>-1</sup>) bei 500 °K für Entgasungsgrade von 10% und 1% nach Korngrößenkorrektur. Die eingeklammerten Werte sind Vergleichswerte ohne Korngrößenkorrektur.

reziproken Temperatur aufgetragen. Dadurch ist der sogen. „Korngrößeneffekt“ zumindest formal berücksichtigt. Zum Vergleich sind die mit „direkt“ bezeichneten Geraden eingetragen, das sind die zum jeweils ersten Meßpunkt der einzelnen Temperaturen gehörenden Werte von  $D/a^2$ .

Gemäß der Beziehung (3) kann man die Aktivierungsenergien  $Q$  und die Werte für  $D/a^2$  bei bestimmten Temperaturen ablesen und mit denen der Spallationsgase anderer Meteoriten vergleichen. Dieser Vergleich wurde für die Entgasungsgrade von 10% und 1% jeweils für die auf den Korngrößeneffekt korrigierten und nichtkorrigierten Werte ausgeführt. Für einen Vergleichswert bei  $1000/T = 2$  sind diese Werte in Tab. 2 aufgeführt, und zwar für die Uredelgase des Meteoriten Fayetteville und für die von LÄMMERZAHL<sup>9</sup> gegebenen Werte der entsprechenden Spallationsgase der Chondriten Alfanello, Bjurböle und Nadiabondi. Aus Tab. 2 ergibt sich eine sehr starke Abweichung der jeweiligen Werte der Uredelgase in Fayetteville von dem Mittel der Werte der entsprechenden Spallationsgase der drei Vergleichschondriten.

Dieser Sachverhalt, der sich bereits am Ende des Abschnittes I zeigte, kann in Zusammenhang gebracht werden mit den von HINTENBERGER, VILCZEK und WÄNKE<sup>13</sup>, EBERHARDT, GEISS und GRÖGLER<sup>14</sup>, sowie von ZÄHRINGER<sup>15</sup> publizierten Ergebnissen, wonach das Urgas in Meteoriten vorwiegend in oberflächennahen Schichten der Einzelkristalle eingebaut ist. Die Ausgangsverteilung der Spallationsgase ist gemäß Abb. 5 a als homogen anzunehmen, für Uredelgase dagegen nur in einer oberflächennahen Schicht, gemäß der Darstellung in Abb. 5 b. Diese Ausgangsverteilung der Urgase bewirkt, daß die relative Gasabgabe bedeutend größer ist als im Falle der homogenen Ausgangsverteilung. Es ist damit zu rechnen, daß die Belegschichten für Helium, Neon und Argon verschieden groß sind (siehe Abb. 5 c).

Es soll nun versucht werden, die Unterschiede in den Diffusionsparametern  $D/a^2$  mit der Verletzung der homogenen Ausgangsverteilung quantitativ zu erklären. Dazu wird angenommen, daß die Diffusionskonstanten  $D$  für Ur- und Spallationsgase bei gleicher Temperatur gleich sind und die Unterschiede

<sup>13</sup> H. HINTENBERGER, E. VILCZEK u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **20 a**, 939 [1965].

<sup>14</sup> P. EBERHARDT, J. GEISS u. N. GRÖGLER, Mineral. Petrog. Mitt. **10**, 535 [1965].

<sup>15</sup> J. ZÄHRINGER, Earth and Planetary Science Letters **1**, 20 [1966].

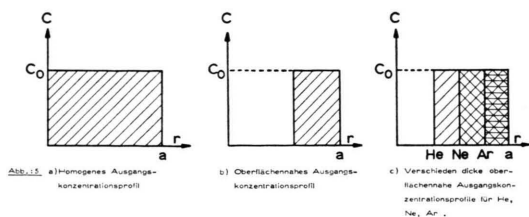


Abb. 5. a) Homogenes Ausgangskonzentrationsprofil. b) Oberflächennahes Ausgangskonzentrationsprofil. c) Verschieden dicke oberflächennahe Ausgangskonzentrationsprofile für He, Ne, Ar.

der Diffusionsparameter  $D/a^2$  durch verschiedene effektiven Korngrößen  $a$  im Falle der Spallationsgase und Dicken  $b$  der Belegschichten im Falle der Urgase verursacht werden. Daraus kann man unter Verwendung der Werte aus Tab. 2 das Verhältnis  $a/b$  als Funktion des Entgasungsgrades bestimmen. Diese Zahl repräsentiert das Verhältnis der mittleren effektiven Korngrößen zum Mittelwert der mit Urgas belegten Schichtdicken. In Tab. 3 ist dieses Verhältnis für die Entgasungsgrade 10%, 1% und <1% für die Uredelgase Helium, Neon und Argon angegeben.

Edelgas	10%	1%	<1%
Helium	45	22	17
Neon	1400	14	14
Argon	500000	14000	1700

Tab. 3. Verhältnisse von Kristallradien zu urgasbelegten Schichtdicken ( $a/b$ ) für 10%, 1% und <1% Entgasungsgrad für Helium, Neon und Argon.

Daraus geht hervor, daß die mit Urhelium und Urneon belegten Schichten im Mittel 10- bis 20-mal kleiner sind als der effektive Kornradius. Dabei sind die angegebenen Werte für Helium eher zu groß, da die Vergleichsmeteorite wahrscheinlich schon bei Beginn der Diffusionsmessungen einen Gasverlust in der Größenordnung von 1% erlitten haben. Für Argon dagegen ist die urgashaltige Schicht um ca. 3 Größenordnungen kleiner als der effektive Korn-

radius. Wegen der wenigen zur Verfügung stehenden Vergleichswerte für Spallationsargon darf man dieser Aussage nur einen qualitativen Wert geben.

Der Unterschied der Belegschichtdicken für Helium, Neon und Argon läßt sich am zwanglosesten durch unterschiedliche Eindringtiefen von Atomen bzw. Ionen in die Einzelkristalle erklären und würde damit den Ursprung dieser Gase in einem sekundären Prozeß wahrscheinlich erscheinen lassen. Als möglicher Prozeß dieser Art ist die Exponierung von meteoritischem Material in solarem Wind anzusehen, wie von SUESS, WÄNKE und WLOTZKA<sup>16</sup> diskutiert wurde. In einer Arbeit von BÜHLER et al.<sup>17</sup> wurde über Beschußexperimente von Aluminiumfolien mit Helium-, Neon- und Argonionen berichtet. Dabei wurde ein Teil des Gases in das Material hineingeschossen. Die nachträgliche Entgasung der Aluminiumfolien zeigte Entgasungsraten, die sich ähnlich den in Abschnitt I referierten Gasverlusten verhielten. Wie diese sogen. Sonnenwindhypothese, die ausführlich von WÄNKE<sup>18</sup> diskutiert wird, ist noch die von FREDRIKSSON und KEIL<sup>19</sup> vorgeschlagene Stoßwellenhypothese für den Einbau von Urgasen in Materie in Diskussion. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind mit beiden Vorstellungen in Übereinstimmung.

#### Anerkennungen

Der größte Teil dieser Arbeit wurde anlässlich eines mehrmonatigen Besuches von H. FECHTIG an der Universität von Kalifornien San Diego, La Jolla, ausgeführt. Die Proben wurden uns freundlicherweise von Herrn Professor Dr. H. SUESS zur Verfügung gestellt. Herrn Professor SUESS danken wir für die Unterstützung dieser Arbeit. Die Finanzierung derselben erfolgte aus Mitteln der National Aeronautics and Space Administration (Grant NsG-322). — Den Herren P. LÄMMERZahl und T. KIRSTEN vom Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg, sind wir für zahlreiche Diskussionen zu Dank verpflichtet. Herr H. RICHTER, Heidelberg, hat freundlicherweise einige Edelgasbestimmungen ausgeführt, wofür wir ihm an dieser Stelle ebenfalls danken.

<sup>16</sup> H. E. SUESS, H. WÄNKE u. F. WLOTZKA, *Geochim. Cosmochim. Acta* **28**, 595 [1964].

<sup>17</sup> F. BÜHLER, J. GEISS, J. MEISTER, P. EBERHARDT, J. C. HUNNEKE u. P. SIGNER, *Earth and Planetary Science Letters* **1**, 249 [1966].

<sup>18</sup> H. WÄNKE, „Meteoritenalter und verwandte Probleme“ in „Fortschritte der Chemischen Forschung“ Band 7, Heft 2. Herausgeber: E. HEILBRONNER, U. HOFMANN, KL. SCHAEFER, G. WITTIG, Springer-Verlag, Berlin 1966.

<sup>19</sup> K. FREDRIKSSON u. K. KEIL, *Geochim. Cosmochim. Acta* **27**, 717 [1963].