

Zur Frage der Diffusionsverluste von radiogenen und spallogenen Edelgasen aus Steinmeteoriten

Von H. HINTENBERGER, E. VILCSEK und H. WÄNKE

Max-Planck-Institut für Chemie (Otto-Hahn-Institut), Mainz
(Z. Naturforsch. **19 a**, 219—224 [1964]; eingegangen am 29. November 1963)

Using a newly developed technique of specific solvents we succeeded in measuring the rare gas contents of the main mineral fractions of stone meteorites separately. In this way we studied the diffusion loss of the radiogenic and spallogenic rare gases in 5 chondrites which all had U-Th-He ages considerably below 4.5 billion years. The results showed that in 4 of these meteorites, which all belong to the UREY-CRAIG group L, no diffusion losses occurred during the time of cosmic ray exposure. Only in one of the meteorites, i. e. Breitscheid, (group H) large diffusion losses of the cosmic ray produced ^3He were found. Considerable losses of radiogenic ^4He could be proved for the meteorites Breitscheid and Bruderheim. For the meteorite Breitscheid the loss of ^4He seems to be approximately a factor of 2 lower than that of ^3He .

Während bei irdischen Gesteinen Altersbestimmungen an getrennten Mineralen bereits seit längerer Zeit allgemein üblich sind, ist ein solches Verfahren noch niemals für Altersbestimmungen an Meteoriten angewendet worden. Der Grund hierfür liegt in der Kostbarkeit und Begrenztheit der zur Verfügung stehenden Proben. Während es beispielsweise bei irdischen Gesteinen praktisch nichts ausmacht, von dem 100- bis 1000-fachen der benötigten Probenmenge auszugehen, und es einzig und allein darauf ankommt, die jeweilige Endfraktion möglichst sauber zu haben, ist ein solches Vorgehen im Falle der Meteorite von vornherein ausgeschlossen. Außerdem kam es uns speziell darauf an, mögliche Diffusionsverluste sowohl von radiogenen als auch von spallogenen durch die Höhenstrahlung in den Meteoriten erzeugten Edelgasen aufzuspüren. Methoden, mit denen es zwar möglich ist, kleine Fraktionen mit relativ sauber getrennten Mineralen zu gewinnen, bei denen aber die Hauptmenge der Ausgangsprobe in zahlreichen recht inhomogenen Fraktionen anfällt, mußten daher ausscheiden. Für uns kam nur ein Verfahren in Frage, das es erlaubt, die Gesamtprobe in einigermaßen einheitliche Fraktionen zu zerlegen. Dies ist jedoch mit den klassischen Methoden der Mineraltrennung so gut wie unmöglich, auch können hierbei nur jeweils Minerale von einer bestimmten Korngröße ab getrennt werden. Hinsichtlich etwaiger Diffusionsverluste sind aber gerade die sehr kleinen Korngrößen von entscheidender Bedeutung.

1. Problemstellung

Wie schon in einer vorhergehenden Arbeit ausgeführt¹, zeigt ein großer Teil der von uns untersuchten Steinmeteorite deutliche Anzeichen von Diffusionsverlusten der beiden radiogenen Edelgase ^4He und ^{40}Ar . Während Altersbestimmungen an Steinmeteoriten nach der Rubidium-Strontium-^{2,3} bzw. nach der Blei-Bleimethode^{4,5} stets Alterswerte von ca. 4,5 Milliarden Jahren ergeben, liegen die Kalium-Argon- und Uran-Thorium-Heliumalter teilweise beträchtlich tiefer, selbst Alterswerte unter 1 Milliarde Jahre treten bei den Edelgasmethoden auf^{1,6}. Da überdies die Uran-Thorium-Heliumalter häufig und zum Teil wesentlich tiefer liegen als die Kalium-Argonalter, ist der Unterschied zu den Rubidium-Strontium- bzw. Blei-Bleialtern in vielen Fällen auch nicht durch eine einmalige zwischenzeitliche starke Erwärmung, bei der dann alle bisher gebildeten Edelgase ausgetrieben wurden, zu erklären. Es besteht vielmehr der berechtigte Verdacht, daß man es mit partiellen Diffusionsverlusten von Edelgasen bei relativ geringer Temperatur zu tun hat. Stimmen Uran-Thorium-Heliumalter und Kalium-Argonalter überein, so haben Proben mit Edelgasalterswerten unter $4,5 \cdot 10^9$ Jahren entweder eine einmalige stärkere Erhitzung zu dem Zeitpunkt, der durch den Alterswert gegeben ist, durchgemacht, oder aber, diese Meteorite waren seit ihrer Phasentrennung, also seit etwa 4,5 Milliarden Jahren (Rb-Sr- oder

¹ H. HINTENBERGER, H. KÖNIG u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **17 a**, 1092 [1962].

² E. SCHUMACHER, Z. Naturforsch. **11 a**, 206 [1956].

³ P. W. GAST, Geochim. Cosmochim. Acta **26**, 927 [1962].

⁴ C. C. PATTERSEN, Geochim. Cosmochim. Acta **7**, 151 [1955].

⁵ D. C. HESS u. R. R. MARSHALL, Geochim. Cosmochim. Acta **20**, 284 [1960].

⁶ T. KIRSTEN, D. KRANKOWSKY u. J. ZÄHRINGER, Geochim. Cosmochim. Acta **27**, 13 [1963].



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.

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.

This work has been digitalized 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.

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.

Pb-Pb-Alter), einer gegenüber den übrigen Meteoriten wesentlich höheren Aufbewahrungstemperatur ausgesetzt, die dann erst zu dem Zeitpunkt, der durch das Edelgasalter beschrieben wird, plötzlich abfiel. Alle diese Probleme wurden kürzlich in einer Arbeit von ANDERS⁷ ausführlich diskutiert.

Neben den radiogenen Edelgasen sind in Steinmeteoriten manchmal auch bei den durch die Höhenstrahlung erzeugten Edelgasen Andeutungen von Diffusionsverlusten vorhanden. So zeigte das Verhältnis $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ für die von uns untersuchten Steinmeteorite überraschend hohe Schwankungen^{1, 8}. Berücksichtigt man die gemessenen Extremwerte für dieses Verhältnis, so hat man es sogar mit Schwankungen von über einem Faktor 10 zu tun. Bei den normalen Chondriten sind die extrem niedrigen $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Werte ($^3\text{He}/^{21}\text{Ne} \leq 3$) so gut wie sicher auf Diffusionsverluste zurückzuführen. Wir wollten aber vor allem auch untersuchen, ob vielleicht das spallogene ^3He ebenso oft Diffusionsverluste zeigt wie das radiogene ^4He . Im Falle einer Parallelität zwischen spallogenen ^3He - und radiogenen ^4He -Verlusten wäre es naheliegend, diese Diffusionsverluste während der Zeitdauer der Einwirkung der kosmischen Strahlung anzunehmen. Die Ursache für derartige Diffusionsverluste wäre dann vermutlich auf Grund der jeweiligen Meteoritbahnen in einer größeren Annäherung an die Sonne und einer damit verbundenen stärkeren Erwärmung zu suchen.

Die Steinmeteorite und besonders die Chondrite sind glücklicherweise aus mehreren, hinsichtlich ihrer Diffusionskonstanten sicherlich recht unterschiedlichen Mineralien zusammengesetzt. Das durch die Höhenstrahlung gebildete ^3He wird in allen Meteoritmineralien mit praktisch denselben Produktionsraten gebildet, ausgenommen nur das metallische Nickeleisen, in dem die ^3He -Produktionsrate etwas tiefer liegt. ^{21}Ne wird im Nickeleisen mit wesentlich geringeren Produktionsraten gebildet als in den silikatischen Meteoritbestandteilen. Hingegen hat man für die Bildung von ^{21}Ne im Pyroxen mit praktisch den gleichen oder doch nur unwesentlich geringeren Produktionsraten zu rechnen als im Olivin.

Im Falle des radiogenen ^4He würde man zunächst eine Anreicherung in den Meteoritmineralien mit höherem Urangehalt vermuten. Da aber die mittlere Korngröße der Meteoritmineralien vergleichbar ist

mit der Reichweite der α -Teilchen aus der Uran- bzw. Thoriumreihe, so sollte auch das radiogene ^4He einigermaßen homogen verteilt sein, ausgenommen natürlich nur die sehr groben Körner.

VILCSEK und WÄNKE⁹ haben nun kürzlich ein Verfahren entwickelt, bei dem mittels spezifischer Lösungsmittel jeweils nur bestimmte Minerale aufgeschlossen werden, so daß die in diesen Mineralien enthaltenen Edelgase getrennt gemessen werden können. Dieses Verfahren haben wir benutzt, um die Fragen der Diffusionsverluste der radiogenen und spallogenen Edelgase in Steinmeteoriten zu klären.

2. Durchführung der Experimente

Die Meteoritproben werden so weit pulverisiert, daß sie ein Sieb von 60μ Maschengröße passieren können. Das schwer zu zerkleinernde metallische Nickeleisen muß allerdings teilweise in größeren Korngrößen dazugenommen werden. Die gepulverten Meteoritproben (in unseren Versuchen hatten wir mit Einwaagen zwischen 5 und 10 g gearbeitet) wurden nun nacheinander folgenden Lösungsschritten unterworfen:

1. CuCl_2 -Lösung (Lösen des Nickeleisens),
2. Bromwasser (Troilit),
3. Salzsäure (Olivin).

Sämtliche Operationen erfolgten im Vakuum.

Die verbleibenden unlöslichen Silikate (Pyroxene und Feldspäte) wurden zur Edelgasextraktion im Hochfrequenzofen auf etwa 1500°C erhitzt.

Die hierzu verwendete Apparatur und das Verfahren wurden in der Arbeit von HINTENBERGER, KÖNIG und WÄNKE¹ beschrieben.

Sowohl die durch Lösen als auch die durch Erhitzen extrahierten Gase wurden einer Apparatur zur Mikroanalyse von Edelgasen zugeführt, Helium und Neon untereinander und von allen anderen Gasen abgetrennt, gemessen und anschließend die Isotopenverhältnisse massenspektrometrisch bestimmt. Der genaue Vorgang der Edelgasanalysen wurde schon an anderen Stellen mehrfach ausführlich beschrieben^{1, 10}.

Die Lösungen aus den einzelnen Fraktionen wurden chemisch aufgearbeitet und die in Lösung gegangenen Elemente quantitativ bestimmt. Die einzelnen Lösungsfraktionen enthielten beinahe die Gesamtmenge des betreffenden Minerals. Nur die Bromfraktionen enthielten neben dem Troilit auch noch beträchtliche Mengen von Olivin sowie Reste des metallischen Nickeleisens, das in der CuCl_2 -Fraktion nicht ganz vollständig gelöst wurde. Es hätte jedoch durch eine Verlängerung der Einwirkungsdauer bereits in der CuCl_2 -Fraktion vollständig in Lösung gebracht werden können. Wie wir in Vorversuchen zeigen konnten, enthält die HCl-Fraktion

⁷ E. ANDERS, Rev. Mod. Phys. **34**, 287 [1962].

⁸ H. HINTENBERGER, H. KÖNIG, L. SCHULTZ u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **19 a**, [1964], im Druck.

⁹ E. VILCSEK u. H. WÄNKE, in Vorbereitung, erscheint voraussichtlich in Z. Naturforsch. **19 a**, [1964].

¹⁰ K. H. EBERT u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **12 a**, 766 [1957].

praktisch nur Eisen, Magnesium und Kieselsäure, während Calcium und Aluminium nur in Spuren nachweisbar sind. Aus den Analysendaten geht deutlich hervor, daß in der HCl-Fraktion praktisch nur reiner Olivin in Lösung geht. Im unlöslichen Rückstand ist der gesamte Pyroxen und der Großteil der Feldspäte enthalten. Es wäre allerdings denkbar, daß ein Teil dieses unlöslichen Rückstandes während des Einwirkens der Salzsäure einer gewissen Veränderung unterzogen wird. Hierbei könnten auch kleine Mengen der in den praktisch ungelösten Mineralien enthaltenen Edelgasmengen in Freiheit gesetzt werden. Der Prozentsatz solcher etwa aus dem unlöslichen Rückstand bereits in der HCl-Fraktion extrahierten Edelgasmengen ist sicher sehr klein und muß, da wir einen solchen Effekt niemals nachweisen konnten, unter etwa 5% liegen.

Die Summe der einzelnen Mineralfraktionen blieb meistens unter 100%. Dies ist jedoch nicht verwunderlich, da bei dem mehrmaligen Umspülen der noch ungelöst gebliebenen Proben Verluste unvermeidbar waren. Der Verlust war jedoch niemals größer als 6%.

3. Meßergebnisse

Die Meßergebnisse der extrahierten Edelgasmengen für die 5 von uns bisher untersuchten Meteorite sind in Tab. 1 wiedergegeben; außerdem sind in dieser Tabelle noch die in den einzelnen Fraktionen aufgeschlossenen Mineralanteile aufgeführt. In den Spalten 7, 8 und 9 der Tab. 1 sind die in den einzelnen Fraktionen extrahierten Mengen von ^3He , ^4He und ^{21}Ne in 10^{-8} cm^3 pro Gramm Meteorit aufgeführt. Die Summe der 4 Einzelfraktionen kann somit sofort mit den von uns schon früher bestimmten Edelgasgehalten in der Gesamtprobe verglichen werden. Die Spalten 10 bis 13 enthalten die entsprechenden Edelgaswerte, bezogen auf 1 g der in der entsprechenden Fraktion in Lösung gegangenen Minerale. In der Zeile HCl handelt es sich somit beispielsweise um die in 1 g Olivin enthaltenen Edelgasmengen. Der Fehler der Edelgasbestimmungen liegt im allgemeinen zwischen 5 und 10%, für besonders kleine Neonkonzentrationen von unter $0,5 \cdot 10^{-8}\text{ cm}^3/\text{g Met.}$ steigt er auf etwa 10 bis 20% an.

Der Anteil an $^4\text{He}_{\text{rad}}$ wurde jeweils durch Subtraktion des der ^3He -Menge entsprechenden Spallationsanteils von ^4He berechnet. Hierzu gingen wir von der Annahme aus, daß durch die Höhenstrahlung viermal soviel ^4He gebildet wird wie ^3He . Die Spalte 14 enthält das Verhältnis der beiden nur durch die Höhenstrahlung gebildeten Edelgasisotope ^3He und ^{21}Ne .

Im Falle des Meteoriten Breitscheid ist zu beachten, daß wir zur Lösung des metallischen Nickels anstatt der später verwendeten Kupferchloridlösung eine Lösung von Eisen-(III)-Chlorid verwendet hatten. Der Troilit bleibt sowohl bei Verwendung von Eisen-(III)-Chlorid als auch in der Kupferchloridlösung vollständig unangegriffen. Die Edelgasmengen der Bromfraktion von Breitscheid gingen leider verloren.

Betrachtet man Spalte 10 in Tab. 1, so sieht man sofort, daß, wie nach den Erzeugungsquerschnitten zu erwarten, die ^3He -Konzentrationen im metallischen Nickeisen nur etwa $2/3$ der Konzentrationen von ^3He im Olivin bzw. Pyroxen ausmachen. Die kleinen ^3He -Konzentrationen im Troilit von Hayes Center und vor allem im Troilit von Mocs sind schwer verständlich, und wir haben hierfür bis jetzt keine überzeugende Erklärung. Wir möchten jedoch weitere Messungen an diesen Meteoriten abwarten, bevor wir näher hierauf eingehen.

Während das Verhältnis der ^3He -Mengen im Nickeisen zu denen im Olivin bzw. Pyroxen in allen Meteoriten annähernd konstant ist, liegt der ^3He -Gehalt des Pyroxens (unlöslicher Rückstand) von Breitscheid (hell) nur bei ca. 20% des ^3He -Gehalts des Olivins. Nimmt man annähernd gleiche Korngrößenverteilung zwischen Olivin und Pyroxen an, so muß man auf größere Diffusionskonstanten der Edelgase im Pyroxen gegenüber denen im Olivin schließen. Dies könnte auf die unterschiedliche Struktur zurückgeführt werden. ^3He wird ausschließlich durch die Höhenstrahlung erzeugt, und man müßte somit Diffusionsverluste während der Einwirkung der Höhenstrahlung für diesen Meteoriten annehmen. Das von uns früher¹ in einer Gesamtprobe vom Breitscheid (hell) gefundene $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis von 3,82 liegt in der Tat sehr niedrig und läßt auf einen solchen Diffusionsverlust von ^3He schließen. Auch das Verhältnis der ^{21}Ne -Mengen in der Olivin- und Pyroxenfraktion liegt mit 0,46 für Breitscheid (hell) wesentlich unter den Werten der anderen untersuchten Meteorite. Da offenkundig neben dem ^3He -Verlust auch ein solcher von ^{21}Ne , wenn auch in geringerem Umfang, eintrat, so ist damit bewiesen, daß das $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis nicht ganz so empfindlich auf Diffusionsverluste ist, wie man zunächst annehmen möchte.

Deutliche Diffusionsverluste von radiogenem ^4He zeigen die Meteorite Breitscheid (hell) sowie Bruderheim. Da im Bruderheim praktisch kein Verlust von

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Meteorit		Σ Metall	FeS	Olivin	Pyro- xen	Σ	^3He	^4He	^{21}Ne	^3He	^4He	$^4\text{He}_{\text{rad}}$	^{21}Ne	^3He ^{21}Ne
		Gewichtsprozent bezogen auf die Einwaage				in $10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g Met.}$				in $10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g gelöst}$				
Akaba	CuCl ₂	7,91		0,50		8,41	2,35	24,9	0,060	28,0	296	184	0,72	39
	Br ₂	1,78	4,29	1,46		7,53	2,95	70,6	0,240	39,2	940	783	3,19	12,3
	HCl			33,1		33,1	15,8	269	2,27	47,8	815	624	6,88	6,95
	Rü.				47,1	47,1	18,9	421	2,54	40,2	895	734	5,40	7,44
	Σ Lit. ¹	9,69	4,29	35,1	47,1	96,1	40,0 40,9	786 805	5,11 5,48					7,82 7,46
Rü./HCl = Pyroxen/Olivin										0,84	1,10	1,17	0,78	
Breitscheid (hell)	FeCl ₃	17,1		0,48		17,6	8,8	91,0	0,196	50,0	516	316	1,11	45
	Br ₂		5,6	3,3		8,9								
	HCl			24,6		24,6	16,5	291	3,98	67	1183	915	16,2	4,14
	Rü.				49,3	49,3	7,16	267	3,64	14,5	541	483	7,38	1,97
	Σ Lit. ¹	17,1	5,6	28,4	49,3	100,4	32,5 35,3	649 608	7,82 9,25					4,16 3,82
Rü./HCl = Pyroxen/Olivin										0,22	0,46	0,53	0,46	
Bruderheim	CuCl ₂	8,75		0,82		9,57	2,90	29,3	0,17	30,3	306	185	1,78	17,0
	Br ₂	2,09	5,35	3,79		11,23	3,68	50,7	0,33	32,8	452	321	2,94	11,2
	HCl			32,4		32,4	19,3	220	3,95	59,6	678	440	12,2	4,89
	Rü.				41,3	41,3	17,2	142	2,98	41,7	344	178	7,23	5,77
	Σ Lit. ¹	10,84	5,35	37,0	41,3	94,5	43,1 47,4	442 526	7,43 8,17					5,80 5,80
Rü./HCl = Pyroxen/Olivin										0,70	0,51	0,40	0,59	
Hayes Center	CuCl ₂	8,65		0,24		8,89	2,70	14,6	0,090	30,4	164	42	1,02	29,8
	Br ₂	1,44	5,25	3,31		10,0	1,53	25,8	0,417	15,3	258	197	4,17	3,67
	HCl			26,5		26,5	13,7	94,8	3,70	51,8	358	151	14,0	3,70
	Rü.				51,5	51,5	22,8	170,2	5,51	44,3	331	158	10,7	4,14
	Σ Lit. ¹	10,09	5,25	30,0	51,5	96,9	40,7 49,0	305 348	9,72 10,02					4,48 4,89
Rü./HCl = Pyroxen/Olivin										0,84	0,92	1,05	0,76	
Mocs	CuCl ₂	6,92		0,44		7,36	0,78	22,8	0,048	10,6	310	268	0,65	16,3
	Br ₂	0,91	5,31	0,95		7,17	0,22	9,9	0,033	3,1	138	126	0,47	6,6
	HCl			31,9		31,9	9,37	232	2,10	29,4	728	610	6,60	4,45
	Rü.				49,3	49,3	9,92	313	2,63	20,2	635	554	5,34	3,78
	Σ Lit. ¹	7,83	5,31	33,3	49,3	95,7	20,3 25,1	577 608	4,81 5,38					4,22 4,67
Rü./HCl = Pyroxen/Olivin										0,69	0,87	0,91	0,81	

Tab. 1. Mineralzusammensetzung und Edelgasgehalt der untersuchten Meteorite. Die Edelgaswerte der Spalten 10 bis 13 beziehen sich auf 1 Gramm der in der entsprechenden Fraktion in Lösung gegangenen Minerale.

^3He nachweisbar ist, muß für diesen Meteoriten der Verlust von radiogenem ^4He offenbar vor der Einwirkung der Höhenstrahlung stattgefunden haben. Obwohl das Uran-Thorium-Helium-Alter des Meteoriten Hayes Center nur 780 Millionen Jahre beträgt

(siehe Tab. 3), zeigt dieser Meteorit keinerlei Anzeichen für einen Diffusionsverlust von radiogenem Helium. Hierzu ist zu bemerken, daß für Hayes Center das Uran-Thorium-Helium-Alter gut mit dem Kalium-Argon-Alter⁶ übereinstimmt und somit par-

tielle Diffusionsverluste bei niedrigen Temperaturen auszuschließen sind.

Nicht verständlich erscheint auf den ersten Blick die Tatsache, daß bei Breitscheid (hell) das Verhältnis der ^3He -Menge im Pyroxen zu der im Olivin wesentlich niedriger ist als das Verhältnis der entsprechenden ^4He -Mengen. Nach dem Vorhergesagten kann man das Verhältnis der Konzentration eines bestimmten Edelgasisotops im Pyroxen und Olivin als Maß für den Grad der Diffusionsverluste dieses Edelgasisotops in dem betreffenden Meteoriten betrachten. Unter keinen Umständen kann jedoch nach den zur Zeit allgemein akzeptierten Vorstellungen über die Lebensgeschichte der Meteorite der Diffusionsverlust von ^3He größer sein als der Diffusionsverlust von radiogenem ^4He . Da schon in der Zeit, bevor ^3He durch Spallation gebildet wurde, radiogenes ^4He verlorengegangen sein kann, ist abgesehen von Isotopeneffekten der Verlust an ^4He stets größer oder höchstens gleich dem Verlust an ^3He . Die Meßdaten im Meteoriten Breitscheid (hell) scheinen jedoch zu beweisen, daß der prozentuale Verlust von ^3He größer ist als der von ^4He . Da jedoch Breitscheid ein Meteorit mit sogenannter Hell-Dunkel-Struktur ist, und der dunkle Anteil dieses Meteoriten große Mengen von Uredelgasen enthält (HINTENBERGER, KÖNIG, WÄNKE¹¹), so wäre es denkbar, daß auch im hellen Anteil des Meteoriten ein Teil des ^4He nicht radiogenen Ursprungs ist, sondern daß es sich um Urgas handelt. Letztere Möglichkeit ist aber ziemlich unwahrscheinlich, da sich im ungelösten Rückstand des uredelgashaltigen Anteils von Breitscheid prozentuell nur wenig des gesamten Uredelgases fand¹². Somit könnte man annehmen, daß Breitscheid schon einmal zu einem früheren Zeitpunkt der Einwirkung der Höhenstrahlung ausgesetzt war und die dabei gebildeten Spallationsedelgase teilweise durch Diffusion verloren gingen, bevor noch die Hauptmengen des radiogenen Heliums gebildet wurden.

Wir werden an anderen Stellen noch näher darauf eingehen, warum man gerade für die uredelgashaltigen Steinmeteorite eine solche erste Zeitdauer der Einwirkung der Höhenstrahlungen möglicherweise erwarten sollte¹²⁻¹⁴. Hierbei ist natürlich noch ungeklärt, ob nicht vielleicht für einen Teil der

Meteorite die Höhenstrahlung während der ganzen Zeit, wie sie ihren radiogenen Altern entspricht, auf diese Meteorite eingewirkt hat. Falls, wie von WÄNKE¹³ vorgeschlagen wurde, tatsächlich eine Verbindung zwischen den Uredelgasen der Steinmeteorite und dem Sonnenwind besteht, müßte sich das Material der uredelgashaltigen Meteorite über längere Zeiträume entweder in Form von Staub im Welt-raum oder aber in den äußersten Schichten des Meteoritenmutterkörpers befunden haben und könnte zeitweise der Einwirkung geringer Intensität der Höhenstrahlung ausgesetzt gewesen sein. Wegen der größeren „Tiefe“ waren sicher die Produktionsraten für ^3He und ^{21}Ne relativ klein, doch ist die Menge irgendeines stabilen Spallationsproduktes der Höhenstrahlung proportional der Strahlungsdosis, der die Meteoritmaterie ausgesetzt war. Wenn die Höhenstrahlungsintensität auch gering war, so kann jedoch die Einwirkung über sehr lange Zeiten hin stattgefunden haben.

In Tab. 2 sind die Isotopenhäufigkeiten des Neons der einzelnen Fraktionen der untersuchten Meteorite aufgezeichnet. Pyroxen, Olivin und teilweise auch die Troilitfraktion zeigen reines Spallationsneon. Nur die Nickeleisenfraktionen enthalten fast durchweg einen gewissen Überschuß an ^{20}Ne . Dieser Überschuß ist wesentlich größer als nach unseren Blindwerten zu erwarten ist (die Werte in Tab. 2 sind bereits blindwert-korrigiert). Es kann natürlich sein, daß es sich hier um adsorbiertes Luftneon handelt, da ja auch die Absolutwerte des Neons in den Nickeleisenfraktionen wesentlich geringer sind als in den übrigen Fraktionen. Es wäre jedoch auch möglich, daß man es hier, zumindest teilweise, mit Urneon zu tun hat. Hierzu ist zu bemerken, daß sowohl von KIRSTEN, KRANKOWSKY und ZÄHRINGER⁶ als auch von SIGNER¹⁵ praktisch in allen Steinmeteoriten kleine Mengen Urargon nachgewiesen wurden. Es könnte somit durchaus sein, daß viele Meteorite außerdem winzige Mengen von Urneon enthalten, die natürlich normalerweise durch das Spallationsneon vollkommen überdeckt werden.

Ebenso sind die ^{21}Ne -Mengen der Nickeleisenfraktionen höher, als man erwarten sollte. Während das Verhältnis $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ in Eisenmeteoriten bei etwa 100

¹¹ H. HINTENBERGER, H. KÖNIG u. H. WÄNKE, Z. Naturforschg. **17 a**, 306 [1962].

¹² H. HINTENBERGER, E. VILČEK u. H. WÄNKE, in Vorbereitung, voraussichtlich Z. Naturforschg. **19 a**, [1964].

¹³ H. WÄNKE, in Vorbereitung, erscheint voraussichtlich in Z. Naturforschg. **19 a** [1964].

¹⁴ H. E. SUESS, H. WÄNKE u. F. WLOTZKA, Geochim. Cosmochim. Acta, im Druck, erscheint 1964.

¹⁵ P. SIGNER, private Mitteilung.

Meteorit		^{21}Ne in 10^{-8} cm ³ /g Met.	^{21}Ne in 10^{-8} cm ³ /g gelöst	Blind- wert in %	20	Neon 21 in %	22
Akaba	CuCl ₂	0,060	0,72	29	50,0	21,8	28,2
	Br ₂	0,240	3,19	6,2	32,5	30,4	37,1
	HCl	2,27	6,88	0,5	31,4	32,4	36,2
	Rü.	2,54	5,40	11,1	29,6	33,0	37,4
Breitscheid	FeCl ₃	0,196	1,11	6,2	47,7	25,0	27,3
	Br ₂	—	—	6,4	—	—	—
	HCl	3,98	16,2	0,7	31,3	33,2	35,5
	Rü.	3,64	7,38	11,8	35,9	30,4	33,7
Bruderheim	CuCl ₂	0,17	1,78	15,5	52,2	22,0	25,8
	Br ₂	0,33	2,94	5,0	34,8	29,6	35,6
	HCl	3,95	12,2	0,3	31,8	33,5	34,7
	Rü.	2,98	7,23	7,8	29,3	34,2	36,5
Hayes Center	CuCl ₂	0,090	1,02	29	31,5	34,5	34,0
	Br ₂	0,417	4,17	3,7	30,5	33,8	35,7
	HCl	3,70	14,0	0,8	31,1	34,0	34,9
	Rü.	5,51	10,7	4,1	32,6	32,8	34,6
Mocs	CuCl ₂	0,048	0,65	20	73,8	10,6	15,6
	Br ₂	0,037	0,52	30	43,0	28,5	28,5
	HCl	2,10	6,60	0,6	33,6	32,2	34,2
	Rü.	2,63	5,34	11,7	31,0	33,0	36,0

Tab. 2. Neon-Isotopenhäufigkeiten und ^{21}Ne -Konzentrationen.

liegt (HINTENBERGER und WÄNKE¹⁶), liegt dieses Verhältnis, wie Tab. 1 zeigt, für das Nickeleisen der Steinmeteorite wesentlich tiefer. Ein Teil, aber kaum der gesamte Überschuss an ^{21}Ne , kann durch Spuren von in der CuCl₂-Fraktion aufgelöstem Silikat erklärt werden. Vor allem in diesem Punkt sind noch genauere Messungen erforderlich, bevor Endgültiges gesagt werden kann.

Wir möchten noch darauf hinweisen, daß es sich bei dem Meteorit Breitscheid um den einzigen von uns auf diese Weise untersuchten Meteoriten der Gruppe H (UREY-CRAIGSche Einteilung¹⁷) handelt, während alle vier übrigen Meteorite zur Gruppe L gehören. Es ist in diesem Zusammenhang vielleicht auffallend, daß alle Meteorite mit großem Gehalt an leichten Uredelgasen der Gruppe H angehören, soweit es sich um Chondrite handelt.

Zusammengefaßt haben unsere Messungen gezeigt, daß 4 der 5 von uns untersuchten Meteorite während der Zeitdauer der Einwirkung der Höhenstrahlung keine nennenswerten Diffusionsverluste von Edelgasen erlitten haben. Einzig Breitscheid zeigt starke Diffusionsverluste von spallogenem ^3He . Verluste von radiogenem ^4He sind für die Meteorite Breitscheid und Bruderheim deutlich nachweisbar. Für Breitscheid scheint der Verlust von radiogenem ^4He um etwa einen Faktor 2 niedriger als der Verlust

von ^3He . Aus diesem Ergebnis scheinen sich Hinweise für eine frühe Einwirkung der Höhenstrahlung auf die Meteoritenmaterie, lange bevor die Meteorite als kleine Körper aus ihrem größeren Mutterkörper ausgebrochen sind, zu ergeben.

Meteorit	K-Ar- Alter 10 ⁹ a	Literatur	U-Th-He- Alter 10 ⁹ a	Literatur
Akaba	3,57	18	2,98	1
Breitscheid	3,33	18	1,35	1
Bruderheim	1,85	6	1,43	1
Hayes Center	0,65	6	0,78	1
Mocs	3,75	18	1,75	1

Tab. 3. K-Ar-Alter und U-Th-He-Alter der untersuchten Meteorite.

Die Meteorite Akaba und Breitscheid entstammen der Sammlung F. A. PANETH. Für die Überlassung der Probe des Meteoriten Bruderheim danken wir Herrn Prof. Dr. R. E. FOLINSBEE und Herrn Prof. Dr. H. E. SUESS für seine Vermittlung.

Für ihre Mitarbeit bei den Analysen, die sie teilweise selbständig durchführten, danken wir Fräulein U. SCHEERER, Fräulein I. SCHÜLER und Herrn B. SPETTEL. Für ihre Mitarbeit bei den massenspektrometrischen Messungen danken wir Fräulein H. HARASIN und Herrn P. JUNG.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sind wir für die leihweise Überlassung eines HF-Generators zu Dank verpflichtet.

¹⁶ H. HINTENBERGER u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **19** a, 210 [1964].

¹⁷ H. C. UREY u. H. CRAIG, Geochim. Cosmochim. Acta **4**, 36 [1953].

¹⁸ H. WÄNKE u. H. KÖNIG, Z. Naturforsch. **14** a, 860 [1959].