

# Über den Helium- und Neongehalt von Steinmeteoriten und deren radiogene und kosmogene Alter

Von H. HINTENBERGER, H. KÖNIG und H. WÄNKE

Aus dem Max-Planck-Institut für Chemie (Otto-Hahn-Institut), Mainz

(Z. Naturforsch. **17 a**, 1092–1102 [1962]; eingegangen am 11. Oktober 1962)

The total content as well as the isotopic composition of helium and neon of 19 chondrites and 5 achondrites have been determined. A description of the analytical method is given. Large variations of the ratios  $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$  were observed and it is shown that these variations cannot be explained by differences in the chemical compositions of the meteorites only.

Radiogenic helium ages and cosmic ray exposure ages have been calculated. The calculation of the helium ages was mainly based on uranium determinations by means of the xenon-method previously developed in this laboratory. The radiogenic helium ages range from  $0.42 \cdot 10^9$  to  $4.5 \cdot 10^9$  years. The values obtained for the helium ages are compared with the figures for the potassium-argon ages formerly derived by a neutron activation method newly developed and of those stated in the literature. It turns out that in most cases the radiogenic helium ages are lower, sometimes considerably lower than the potassium-argon ages indicating diffusion loss of helium and certainly in smaller quantities also of argon.

Using tritium and sodium 22 decay rates from the literature for the calculations of the production rates for helium 3 and neon 22 cosmic ray exposure ages for all the meteorites analysed were obtained. These exposure ages vary between  $0.3 \cdot 10^6$  and  $29 \cdot 10^6$  years. No correlation between radiogenic ages and cosmic ray exposure ages and no grouping of the exposure ages have been found.

Während der Edelgasgehalt der Eisenmeteorite schon seit mehr als 30 Jahren das Ziel vieler Untersuchungen in den verschiedensten Laboratorien ist, liegen die ersten zuverlässigen Messungen an Steinmeteoriten erst wenige Jahre zurück<sup>1–11</sup>. Mit Ausnahme der uns erst nach Abschluß unserer Messungen bekannt gewordenen Arbeit von KIRSTEN, KRANKOWSKY und ZÄHRINGER<sup>12</sup> beschränkten sich alle Autoren, die sich mit solchen Messungen beschäftigten, stets auf eine relativ kleine Zahl von Meteoriten. Unsere Untersuchungen wurden bereits vor 3 Jahren begonnen, und wir haben in diesem Programm bisher 24 verschiedene Steinmeteoriten untersucht. Gemessen wurden Helium 3 und 4 sowie Neon 20, 21 und 22. Argonmessungen an einem Teil dieser Proben wurden bereits früher mitgeteilt<sup>13</sup>, ebenso Kalium-<sup>13, 14</sup> und auch Uranbestimmungen<sup>15</sup>. Wegen der Inhomogenität der Proben und anderer Unsicherheiten erschien es uns von be-

sonderem Wert, daß sowohl Helium- als auch Uranbestimmungen an möglichst eng benachbarten Proben in ein und demselben Laboratorium ausgeführt wurden.

Neben den radiogenen Heliumaltern lassen sich aus den Messungen dieser Arbeit auch Werte für die Strahlungsalter der einzelnen Meteorite berechnen. Darüber hinaus wurden diese Untersuchungen mit dem Ziel begonnen, möglicherweise den einen oder anderen Meteoriten zu entdecken, der sogenannte Uredelgase enthält. Das Vorhandensein von größeren Mengen von Edelgasen, die weder durch die Höhenstrahlung erzeugt, noch radiogenen Ursprungs sind, wurde erstmals in dem Meteoriten Pesyanoe durch GERLING und LEVSKII<sup>1</sup> entdeckt. Später wurden diese überschüssigen Edelgase allgemein als Uredelgase bezeichnet. GERLING und LEVSKII hatten in ihrer 1956 erschienenen Arbeit insgesamt 9 Meteorite auf ihren Edelgasgehalt untersucht, wo-

<sup>1</sup> E. K. GERLING u. L. K. LEVSKII, Dokl. Akad. Nauk, SSSR **110**, 750 [1956].

<sup>2</sup> J. H. REYNOLDS u. J. I. LIPSON, Geochim. Cosmochim. Acta **12**, 330 [1957].

<sup>3</sup> F. BEGEMANN, J. GEISS u. D. C. HESS, Phys. Rev. **107**, 540 [1957].

<sup>4</sup> J. GEISS u. D. C. HESS, Astrophys. J. **127**, 224 [1958].

<sup>5</sup> F. BEGEMANN, P. EBERHARDT u. D. C. HESS, Z. Naturforsch. **14 a**, 500 [1959].

<sup>6</sup> J. GEISS, H. OESCHGER u. P. SIGNER, Z. Naturforsch. **15 a**, 1016 [1960].

<sup>7</sup> J. ZÄHRINGER u. W. GENTNER, Z. Naturforsch. **15 a**, 600 [1960].

<sup>8</sup> P. EBERHARDT u. D. C. HESS, Astrophys. J. **131**, 38 [1960].

<sup>9</sup> P. u. A. EBERHARDT, Z. Naturforsch. **16 a**, 236 [1961].

<sup>10</sup> H. STAUFFER, J. Geophys. Res. **66**, 1513 [1962].

<sup>11</sup> H. STAUFFER, J. Geophys. Res. **67**, 2023 [1962].

<sup>12</sup> T. KIRSTEN, D. KRANKOWSKY u. J. ZÄHRINGER, Geochim. Cosmochim. Acta, im Druck.

<sup>13</sup> H. WÄNKE u. H. KÖNIG, Z. Naturforsch. **14 a**, 860 [1959].

<sup>14</sup> H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **16 a**, 127 [1961].

<sup>15</sup> H. KÖNIG u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **14 a**, 866 [1959].



von sich einer als uredelgashaltig erwies. Unter den 24 von uns untersuchten Meteoriten fanden sich auch zwei Meteorite, nämlich Pantar<sup>16a</sup> und Breitscheid<sup>17</sup>, die größere Mengen von leichten Uredelgasen enthielten. Ein weiterer Meteorit mit leichten Uredelgasen, Tabor, wurde durch gezielte Suche auf Grund der an den Meteoriten Pantar und Breitscheid entdeckten Strukturmerkmale gefunden<sup>16b</sup>. Diese Ergebnisse wurden bereits in gesonderten Arbeiten<sup>16a, 16b, 17</sup> mitgeteilt, und es wird daher hier nicht weiter darauf eingegangen.

Es ist geplant, diese Edelgasuntersuchungen an Steinmeteoriten weiter fortzusetzen, doch glauben wir, daß das bisher angesammelte Zahlenmaterial, das an Umfang nur durch die kürzlich veröffentlichte Arbeit von KIRSTEN, KRANKOWSKY und ZÄHRINGER<sup>12</sup> übertroffen wird, von größerem allgemeinem Interesse ist. Dies dürfte um so mehr der Fall sein, als sich beim Vergleich dieser beiden bisher umfangreichsten Statistiken noch immer Unterschiede zeigen, die, wie wir glauben, nicht durch experimentelle Fehler bedingt sind, sondern darauf hinweisen, daß auch jetzt noch das vorhandene Zahlenmaterial nicht vollständig dazu ausreicht, wirklich zuverlässige Schlüsse zu ziehen. Darüber hinaus ist geplant, die Uranbestimmungen nach der in unserem Laboratorium entwickelten Xenonmethode, die sich als außerordentlich zuverlässig erwiesen hat, weiter fortzusetzen.

### Durchführung der Experimente

Die Absolutmessungen der Edelgase Helium und Neon erfolgten mit der in Mainz seit 7 Jahren in Betrieb befindlichen Hochvakuumapparatur zur Messung kleinster Edelgasmengen unter Verwendung von Methoden, die in vielen Jahren von PANETH und seinen Schülern<sup>18, 19</sup> entwickelt wurden. Eine ausführliche Beschreibung dieses Verfahrens haben CHACKETT, REASBECK und WILSON<sup>20</sup> gegeben. Die Meßgenauigkeit dieser Apparatur allein beträgt bei Edelgasmessungen von etwa  $10^{-7}$  cm<sup>3</sup> 1–2%. Diese Genauigkeit wird allerdings durch Fehler bei der Extraktion vermindert. Das Grundprinzip des Verfahrens ist folgendes: In einer 15-stufigen automatisch gesteuerten Trennkolonne werden Helium und Neon durch fraktionierte Adsorption und Desorption an Aktivkohle bei der Temperatur des siedenden

Stickstoffs von allen anderen Gasen und voneinander getrennt. Diese Trennung kann durch geeignete Wahl der Versuchsparameter mit einer allen Erfordernissen genügenden Reinheit erfolgen. Die getrennten Edelgase werden mit einem empfindlichen Wärmeleitfähigkeitsmanometer mengenmäßig gemessen und dann zur massenspektroskopischen Analyse abgefüllt. Das Wärmeleitfähigkeitsmanometer wird nach jeder Messung mit reinem Helium und Neon neu kalibriert. Hierbei wird außerdem darauf geachtet, daß die Mengen von Helium und Neon bei der Eichung stets ungefähr mit den Edelgasmengen übereinstimmen, die aus den Meteoritproben extrahiert werden. Die Abmessung der bei der Eichung verwendeten Edelgasmengen erfolgt über ein äußerst sorgfältig kalibriertes Eichsystem.

In den meisten Fällen wurden zu den Analysen Meteoritproben von 5 bis 10 g verwendet. Manchmal wurden jedoch mangels genügender Probenmengen auch Messungen mit weniger als 1 g ausgeführt. Stets wurde darauf geachtet, daß eventuell vorhandene Schmelzkruste und die Oberflächenschichten bis mindestens 2 mm Tiefe entfernt worden waren. Die Empfindlichkeit unserer Meßmethode hätte durchaus ausgereicht, mit noch kleineren Probenmengen zu arbeiten, doch wurde dies wegen der damit verbundenen Gefahr der Meteoriteninhomogenität unterlassen. Die Probe wurde nach Möglichkeit als ganzes Stück aufgeschlossen, jedoch haben Testversuche ergeben, daß auch zerkleinerte, aber nicht fein gepulverte Meteoritproben die gleichen Werte ergaben wie die als unversehrte Stücke analysierten Proben.

Die Extraktion der Edelgase erfolgte durch induktive Erhitzung mittels Hochfrequenz auf etwa 1500 °C. Es wurde hierzu eine Vorrichtung verwendet, die ein vorheriges Ausheizen des Schmelztiegels und nachfolgende Beschickung mit der zu analysierenden Probe ohne Unterbrechung des Vakuums gestattet. Diese Vorrichtung ist in Abb. 1 wiedergegeben. Der Schmelztiegel T, ein Molybdäntiegel mit einem Degussit-Einsatz, hängt an einer feingliedrigen Platin-Kette mit einem Bügel aus Molybdändraht und wird von einem Gegengewicht G<sub>1</sub> aus ferromagnetischem Edelstahl gehalten. In gleicher Weise ist der Deckel des Tiegels mit dem Gegengewicht G<sub>2</sub> verbunden, das gestattet, den Deckel in jeder beliebigen Höhe des Tiegels zu lüften; der Deckel ist notwendig, um das gesamte Probegut auf gleichmäßige Temperatur zu bringen. Die Probe wird durch den Einfüllstutzen E in dem schwenkbaren tiegelförmigen Glasgefäß des Probenhalters H eingeführt, der durch eine geeignete Magnetanordnung im Vakuum bewegt werden kann. Die Probe wird zunächst in der abgebildeten Stellung des Halters belassen und der Tiegel im Quarzrohr Q der Vorrichtung, die im übrigen Teil aus Weichglas besteht, induktiv im Hoch-

<sup>16a</sup> H. KÖNIG, K. KEIL, H. HINTENBERGER, F. WLOTZKA u. F. BEGEMANN, Z. Naturforsch. **16a**, 1124 [1961].

<sup>16b</sup> H. KÖNIG, K. KEIL u. H. HINTENBERGER, Z. Naturforsch. **17a**, 357 [1962].

<sup>17</sup> H. HINTENBERGER, H. KÖNIG u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **17a**, 306 [1962].

<sup>18</sup> F. A. PANETH u. K. PETERS, Z. Phys. Chem. **134**, 353 [1928].

<sup>19</sup> E. GLÜCKAUF, Proc. Roy. Soc., Lond. **185**, 98 [1945].

<sup>20</sup> K. F. CHACKETT, P. REASBECK u. E. J. WILSON, Geochim. Cosmochim. Acta **3**, 261 [1953].

vakuum erhitzt. Dabei wird das Quarzrohr bis über den Schliff S mit fließendem Wasser gekühlt. Nach dem Ausheizen des Tiegels wird dieser mit Hilfe des Gegengewichtes  $G_1$  in die Höhe des Einfüllstutzens gezogen, der Deckel mit Hilfe des Gewichtes  $G_2$  gehoben und die Probe mit Hilfe geeigneter Magnetanordnungen aus dem Probenhalter H in den Tiegel gefüllt.

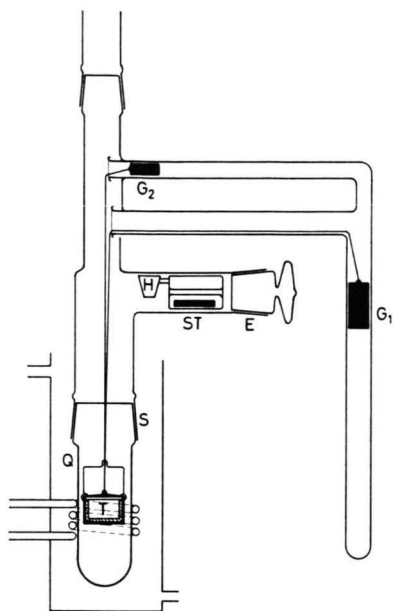


Abb. 1. Entgasungsvorrichtung.

Die Meteoritprobe wurde zunächst etwa 50 Stunden bei Zimmertemperatur in der beschriebenen Anordnung entgast, um alles oberflächlich aus der Luft adsorbierte Helium und Neon zu entfernen. Nach zweistündigem Vorerhitzen des Tiegels bei  $1500^\circ\text{C}$  wurden dann ohne Unterbrechung des Vakuums die Proben in den Schmelztiegel eingebracht und eine Stunde lang auf  $1500^\circ\text{C}$  erhitzt. Nacherhitzungen ergaben stets Edelgasmengen, die kleiner als 1% der bei der ersten Extraktion gefundenen Mengen waren. Um Gasentladungen und damit eventuell verbundene Verluste an Helium und Neon zu vermeiden, wurde in das Extraktionssystem sorgfältig gereinigter Wasserstoff von etwa 20 Torr gegeben. Der Großteil dieses Wasserstoffs wurde anschließend an mit siedendem Stickstoff gekühlter Aktivkohle adsorbiert. Helium und Neon sowie ein Teil des Wasserstoffs wurden abgepumpt und in die oben erwähnte Apparatur zur Mikroanalyse von Edelgasen übergeführt. Der noch vorhandene Wasserstoff wurde im Sauerstoffüberschuß an einem auf  $400^\circ\text{C}$  erhitzten Palladiumkontakt zu Wasser verbrannt.

In regelmäßig zwischen den Analysen durchgeführten Versuchen ohne Meteorite wurde der Blindwert des Analysenverfahrens bestimmt. Der Blindwert kommt zum überwiegenden Teil aus dem bei der Erhitzung verwendeten Quarzrohr. Ein allerdings verschwindend

kleiner Teil ist den Verunreinigungen der zugesetzten Wasserstoffmenge und dem zum Transport der Edelgase verwendeten Sauerstoff zuzuschreiben. Für alle Heliumanalysen ist die Blindwertkorrektur vernachlässigbar; selbst für die geringsten gefundenen Heliummengen betrug die Blindwert-Korrektur weniger als  $1/2\%$ ; bei den um etwa zwei Größenordnungen kleineren Neonmengen betrug sie bis zu 10%, in einigen wenigen Fällen auch mehr.

Die Isotopenhäufigkeiten der abgefüllten Edelgasproben wurden in einem  $60^\circ$ -Ganzmetall-Massenspektrometer im statischen Betrieb gemessen. Der Ionennachweis erfolgte mit einem Schwingkondensator-Meßverstärker entweder über einen Auffänger oder einen als Gleichstromvorverstärker benutzten CuBe-Multiplier. Das Instrument wurde gegen Massendiskriminierung mit einer  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischung geeicht.

## Meßergebnisse und Diskussion

### a) Edelgasgehalte

Insgesamt wurden 19 Chondrite und 5 Achondrite untersucht, deren Fall- bzw. Funddaten in Tab. 1 aufgeführt sind. Tab. 2 enthält die Meßdaten dieser Steinmeteorite. Wie Mehrfachbestimmungen gezeigt haben, liegt die Genauigkeit der Gesamtheliummenge bei etwa 5%, die der Gesamtneonmenge bei etwa 10%. Die Zahl der Mehrfachbestimmungen ist wesentlich größer als aus Tab. 2 hervorgeht. Tatsächlich wurde in allen Fällen mindestens eine weitere Kontrollanalyse durchgeführt. In Tab. 2 werden jedoch nur solche Doppelbestimmungen aufgeführt, bei denen größere Abweichungen auftreten. Die absolute Genauigkeit der Isotopenhäufigkeitsverhältnisse liegt zwischen 3 und 5%.

Die Spalten 7 bis 9 der Tab. 2 geben die tatsächlich gemessenen Neon-Isotopenverhältnisse wieder, während bei den in Spalte 6 (Tab. 2) angegebenen Gesamtneonwerten bereits die entsprechenden Blindwerte abgezogen sind. Auch bei den in den Spalten 10 und 11 angeführten Häufigkeitsverhältnissen der Neonisotope sind die Blindwerte in Rechnung gesetzt worden. Für die urgas haltigen Meteorite Breitscheid und Pantar sind nur die in den hellen Anteilen vorhandenen Edelgasmengen angegeben. Da im Falle des Meteoriten Pantar helle und dunkle Phase nur sehr schwer voneinander zu trennen sind, können wir nicht mit Sicherheit sagen, ob es sich bei der aufgeführten Probe um vollständig reinen hellen Anteil handelte. Das hohe  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ -Verhältnis könnte auf die Anwesenheit kleiner Mengen dunklen Anteils hinweisen, doch brachte die kleine Einwaage

| Nr. | Name, Fundort |                      | Falldatum    | Gesamtgewicht (kg) | Klassifikation                            | Herkunft der Probe                         | Kartei-Nr. |
|-----|---------------|----------------------|--------------|--------------------|---|--|------------|
| 1   | Akaba         | Transjordanien       | 2. 9. 1949   | 1,2                | weißer Chondrit                           | F. A. PANETH                               | —          |
| 2   | Beardsley     | Kansas (U.S.A.)      | 15. 10. 1929 | 16                 | grauer Chondrit                           | Amer. Met. Museum                          | 4/4        |
| 3   | Beddgelert    | Wales (England)      | 21. 9. 1949  | 0,8                | schwarzer, kristall. Ch.                  | F. A. PANETH                               | —          |
| 4   | Breitscheid   | Deutschland          | 11. 8. 1956  | 1,5                | grauer Bronzit-Olivin-Ch.                 | M. P. I. für Chemie, Mainz                 | 7/1        |
| 5   | Bruderheim    | Alberta (Kanada)     | 4. 3. 1960   | 300                | grauer Hypersthen-Ch.                     | Univ. of California, La Jolla              | 10/1       |
| 6   | Hayes Center  | Nebraska U.S.A.)     | Fund 1941    | 4,5                | schwarzer Chondrit                        | Amer. Met. Lab. Nr. 481.11                 | 30/1       |
| 7   | Holbrook      | Arizona (U.S.A.)     | 19. 7. 1912  | ~ 227              | kristall. Hypersthen-Kügelchenchondrit    | Gregory, Bottley and Co., London           | —          |
| 8   | L'Aigle       | Frankreich           | 26. 4. 1803  | ~ 37               | brecciöser intermed. Hypersthen-Chondrit  | Mineral. Inst. Univ. Tübingen              | 68/1       |
| 9   | Leedey        | Oklahoma (U.S.A.)    | 25. 11. 1943 | 50                 | weißer Chondrit                           | Amer. Met. Lab. Nr. 498.17                 | 42/1       |
| 10  | Mocs          | Transylvanien        | 3. 2. 1882   | ~ 300              | geaderter, weißer Hypersthen-Chondrit     | A. BERGER, Wien-Mödling                    | 44/2       |
| 11  | Modoc         | Kansas (U.S.A.)      | 2. 9. 1905   | ~ 35               | geaderter, weißer Hypersthen-Chondrit     | Amer. Met. Museum, Nr. 81.5                | 47/1       |
| 12  | Mooresfort    | Irland               | Aug. 1810    | ~ 3,5              | geaderter, grauer Ch.                     | Mineral. Inst. Univ. Tübingen              | 69/1       |
| 13  | Okniny        | West-Ukraine (UdSSR) | 8. 1. 1834   | ~ 12               | brecciöser, grauer Ch.                    | Mineral. Inst. Univ. Tübingen              | 70/1       |
| 14  | Pantar        | Philippinen          | 16. 6. 1938  | —                  | geaderter Chondrit                        | Amer. Met. Lab. Nr. 503.17                 | 45/1       |
| 15  | Plainview     | Texas (U.S.A.)       | Fund 1917    | ~ 700              | polymikt., brecciös. geadert. interm. Ch. | Amer. Met. Lab. Nr. 92.363                 | 54/1       |
| 16  | Pultusk       | Polen                | 30. 1. 1868  | 210                | geaderter, grauer Bronzit-Chondrit        | A. BERGER, Wien-Mödling                    | 57/1       |
| 17  | Ramsdorf      | Deutschland          | 26. 7. 1958  | 4,7                | polym., brecc. Ch.                        | M. P. I. für Chemie, Mainz                 | 58/1       |
| 18  | Seres         | Griechenland         | Juni 1818    | ~ 8,5              | grauer Hypersthen-Ch.                     | Mineral.-Petrograph. Inst. Univ. Göttingen | —          |
| 19  | Temple        | Texas (U.S.A.)       | Fund 1959    | 5,63               | Chondrit                                  | Amer. Met. Lab. Nr. 689.9                  | 63/1       |
| 20  | Johnstown     | Colorado (U.S.A.)    | 6. 7. 1924   | 40,3               | monomikt.brecc. Diogenit                  | Amer. Met. Museum Nr. 125.23               | 35/1       |
| 21  | Juvinas       | Frankreich           | 15. 6. 1821  | > 91               | monomikt.brecc. Eukrit                    | Mineral. Inst. Univ. Tübingen              | 36/1       |
| 22  | Pasamonte     | Neu-Mexiko (U.S.A.)  | 24. 3. 1933  | 3,62               | Howardit                                  | Amer. Met. Museum Nr. 197.66               | 53/1       |
| 23  | Sioux County  | Nebraska (U.S.A.)    | 8. 8. 1933   | 4,1                | Howardit                                  | Amer. Met. Museum Nr. 198.16               | 60/1       |
| 24  | Stannern      | Tschechoslowakei     | 22. 5. 1808  | ~ 52               | monomikt.brecc. Eukrit                    | Mineral. Inst. Univ. Tübingen              | 61/1       |

Tab. I. Fall- bzw. Funddaten und Klassifizierung der untersuchten Meteorite (im wesentlichen nach PRIOR und HEY<sup>21</sup> und KEIL<sup>22</sup>).<sup>21</sup> G. T. PRIOR u. M. H. HEY, "Catalogue of Meteorites", printed by order of the trustees of the British Museum, London 1953.<sup>22</sup> K. KEIL, Fortschr. Miner. **38**, 202 [1960].



| 1                              | 2          | 3             | 4                                     | 5                              | 6                                     | 7                     | 8                     | 9                     | 10                                   | 11                                   |
|--------------------------------|------------|---------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Meteorit                       | Datum      | Einwaage<br>g | He<br>$10^{-6} \text{ cm}^3$<br>NTP/g | $^4\text{He}$<br>$^3\text{He}$ | Ne<br>$10^{-8} \text{ cm}^3$<br>NTP/g | $^{20}\text{Ne}$<br>% | $^{21}\text{Ne}$<br>% | $^{22}\text{Ne}$<br>% | $^{20}\text{Ne}$<br>$^{22}\text{Ne}$ | $^{21}\text{Ne}$<br>$^{22}\text{Ne}$ |
| <i>Chondrite</i>               |            |               |                                       |                                |                                       |                       |                       |                       |                                      |                                      |
| Akaba                          | 19. 10. 61 | 8,302         | 8,47                                  | 20,2                           | 16,6                                  | 33,4                  | 30,7                  | 35,9                  | 0,79*                                | 0,87*                                |
| Akaba                          | 7. 5. 62   | 4,463         | 8,46                                  | 19,3                           | 17,3                                  | 34,5                  | 30,3                  | 35,1                  | 0,86                                 | 0,88                                 |
| Beardsley                      | 19. 4. 61  | 9,876         | 12,9                                  | 193                            | 5,06                                  | 42,2                  | 27,4                  | 30,4                  | 1,17                                 | 0,92                                 |
| Beddgelert                     | 25. 4. 61  | 9,495         | 2,76                                  | 33,8                           | 5,27                                  | —                     | —                     | —                     | —                                    | —                                    |
| Beddgelert                     | 9. 5. 62   | 7,006         | 2,50                                  | 32,6                           | 5,17                                  | 38,6                  | 29,0                  | 32,4                  | 0,93*                                | 0,92*                                |
| Breitscheid<br>(heller Anteil) | 11. 12. 61 | 5,940         | 6,43                                  | 17,2                           | 27,2                                  | 31,7                  | 32,7                  | 35,5                  | 0,80*                                | 0,93*                                |
| Bruderheim                     | 29. 6. 61  | 10,596        | 5,73                                  | 11,1                           | 24,4                                  | 31,1                  | 32,7                  | 35,2                  | 0,83*                                | 0,94*                                |
| Hayes Center                   | 30. 10. 61 | 6,877         | 3,97                                  | 7,1                            | 35,0                                  | 41,4                  | 27,9                  | 30,3                  | 1,40                                 | 1,00                                 |
| Holbrook                       | 21. 3. 61  | 7,739         | 17,6                                  | 72                             | 17,4                                  | 32,8                  | 32,0                  | 35,2                  | 0,86*                                | 0,91*                                |
| L'Aigle                        | 13. 11. 61 | 0,979         | 8,37                                  | 62                             | 7,66                                  | 36,8                  | 30,2                  | 32,8                  | 0,81                                 | 0,95                                 |
| (dunkler Anteil)               |            |               |                                       |                                |                                       |                       |                       |                       |                                      |                                      |
| Leedey                         | 26. 6. 61  | 9,266         | 6,70                                  | 47,9                           | 7,02                                  | 36,3                  | 30,0                  | 33,7                  | 0,84*                                | 0,92*                                |
| Mocs                           | 10. 2. 61  | 12,025        | 7,73                                  | 32,2                           | 16,5                                  | 33,5                  | 32,5                  | 34,0                  | 0,96*                                | 0,96*                                |
| Modoc                          | 14. 3. 61  | 10,582        | 10,6                                  | 17,6                           | 33,1                                  | 37,4                  | 28,8                  | 33,8                  | 1,06                                 | 0,86                                 |
| Modoc                          | 11. 4. 61  | 5,858         | 9,71                                  | 17,75                          | 31,4                                  | 34,7                  | 30,9                  | 34,2                  | 0,94*                                | 0,91*                                |
| Moorefort                      | 16. 11. 61 | 2,750         | 8,46                                  | 59                             | 8,98                                  | 34,4                  | 31,6                  | 33,9                  | 0,73                                 | 0,96                                 |
| (dunkler Anteil)               |            |               |                                       |                                |                                       |                       |                       |                       |                                      |                                      |
| Okniny                         | 27. 11. 61 | 0,981         | 9,94                                  | 108                            | 10,46                                 | 48,5                  | 24,1                  | 27,3                  | 1,58                                 | 0,90                                 |
| (dunkler Anteil)               |            |               |                                       |                                |                                       |                       |                       |                       |                                      |                                      |
| Pantar                         | 19. 3. 62  | 4,775         | 12,3                                  | 317                            | 3,59                                  | 53,1                  | 21,6                  | 25,3                  | 1,53                                 | 0,92                                 |
| (heller Anteil)                |            |               |                                       |                                |                                       |                       |                       |                       |                                      |                                      |
| Plainview                      | 20. 6. 61  | 10,348        | 9,31                                  | 159,5                          | 7,52                                  | 53,4                  | 21,4                  | 25,3                  | 1,94                                 | 0,86                                 |
| Pultusk                        | 27. 2. 61  | 10,179        | 6,33                                  | 24,2                           | 16,7                                  | 34,0                  | 31,3                  | 34,8                  | 0,92*                                | 0,91*                                |
| Ramsdorf                       | 12. 6. 61  | 9,848         | 1,43                                  | 19,7                           | 4,33                                  | 41,7                  | 27,7                  | 30,6                  | 0,99*                                | 0,94*                                |
| Seres                          | 6. 11. 61  | 4,703         | 1,37                                  | 1100                           | 1,66                                  | 70,4                  | 8,52                  | 15,4                  | 4,14                                 | 0,62                                 |
| Temple                         | 25. 5. 61  | 9,188         | 9,75                                  | 27,6                           | 23,3                                  | 38,4                  | 29,5                  | 32,1                  | 1,13                                 | 0,93                                 |
| <i>Achondrite</i>              |            |               |                                       |                                |                                       |                       |                       |                       |                                      |                                      |
| Johnstown                      | 8. 5. 61   | 12,139        | 5,02                                  | 11,4                           | 21,0                                  | 33,5                  | 31,3                  | 35,2                  | 0,90                                 | 0,90                                 |
| Juvinas                        | 15. 5. 61  | 8,697         | 47,9                                  | 317,5                          | 5,54                                  | 41,3                  | 26,4                  | 32,3                  | 0,97                                 | 0,84                                 |
| Pasamonte                      | 13. 3. 58  | 1,520         | 49,5                                  | 719                            | 2,10                                  | 33,4                  | 30,9                  | 35,6                  | 0,70                                 | 0,89                                 |
| Sioux County                   | 18. 3. 58  | 1,953         | 47,0                                  | 230                            | 13,4                                  | 57,9                  | 18,0                  | 24,1                  | 1,96                                 | 0,79                                 |
| Stannern                       | 5. 6. 61   | 8,934         | 67,1                                  | 207,5                          | 13,4                                  | 36,3                  | 29,5                  | 34,3                  | 0,99                                 | 0,87                                 |

Tab. 2. Die angegebenen Helium- und Neonmengen sowie deren Isotopenverhältnisse sind — mit Ausnahme der in den Spalten 7—9 angegebenen Isotopenhäufigkeiten — für Luftbeimischungen gemäß dem Apparaturblindwert korrigiert. In den Spalten 10 und 11 sind die zur Mittelwertbildung verwendeten Daten mit einem \* gekennzeichnet (siehe Text).

in diesem Falle eine hohe Blindwertkorrektur, so daß das  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ -Verhältnis ziemlich unsicher ist.

Läßt man solche Messungen weg, die eine Gesamtneonmenge (Neongehalt pro Gramm mal Einwaage) von  $< 35 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ NTP Ne}$  ergaben, so erhält man für die Chondrite, bei welchen es sich um Fälle handelt, nach Spalte 11 ein mittleres  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ -Verhältnis von  $0,92 \pm 0,02$ . Wie Tab. 2 zeigt, geben die Analysen von „Funden“ deutlich abweichende Isotopenverhältnisse, die auf einen Zusatz von atmosphärischem Neon hinweisen. In den Spalten 10 und 11 der Tab. 2 wurden die zur Mittelwertbil-

dung benutzten Daten mit einem \* bezeichnet. Unser Mittelwert von 0,92 liegt etwas tiefer als der von P. und A. EBERHARDT<sup>9</sup> für 4 Chondrite gefundene Wert von 0,95, den auch ZÄHRINGER<sup>23</sup> in einer neueren Arbeit angibt. Innerhalb der Fehlergrenzen herrscht aber etwa Übereinstimmung. Auf jeden Fall scheint das  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ -Verhältnis für Steinmeteorite tiefer zu liegen als für Eisenmeteorite. Aus den Arbeiten von WÄNKE und HINTENBERGER<sup>24</sup> ergab sich für die Eisenmeteorite für dieses Verhältnis ein Wert von  $0,98 \pm 0,01$ . Dieser kleine, jedoch vermutlich außerhalb der Fehlergrenzen liegende Unter-

<sup>23</sup> J. ZÄHRINGER, Z. Naturforsch., in Vorbereitung.

<sup>24</sup> H. WÄNKE u. H. HINTENBERGER, Z. Naturforsch. **13a**, 895 [1958].

schied der Neon-Isotopenverhältnisse von Stein- und Eisenmeteoriten paßt gut in das allgemeine Bild der Spallationsreaktionen. Für die Eisenmeteorite sind die Neonisotope ja sehr weit von den in Frage kommenden Targetkernen Eisen und Nickel entfernt. Die Kurve für die Produktionsraten der Spallationsprodukte sollte daher im Bereich der Neonisotope bereits außerordentlich flach verlaufen. Im Falle der Steinmeteorite werden die Neonisotope im wesentlichen aus näherliegenden Targetkernen erzeugt, und somit ist eine größere Steilheit der Kurve der Produktionsraten im Bereich der Neonisotope durchaus zu erwarten. Allerdings muß man hinzufügen, daß die fast vollkommene Gleichheit der Produktionsraten der drei Neonisotope im Falle der Steinmeteorite ziemlich überraschend ist und als ein guter Beweis dafür angesehen werden kann, daß irgendwelche spezielle Reaktionen, z. B. (n, $\alpha$ )- oder (p, $\alpha$ )-Reaktionen, in Meteoriten für die Bildung der Neonisotope nur von relativ kleiner Bedeutung sind. Wiederum nur unter Berücksichtigung der in Tab. 2 Spalten 10 und 11 mit \* gekennzeichneten Daten er-

gibt sich aus unserer Tabelle für das  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ -Verhältnis ein mittlerer Wert von  $0,89 \pm 0,05$ . Die entsprechenden Werte von P. und A. EBERHARDT<sup>9</sup> und ZÄHRINGER<sup>23</sup> lauten 0,92 und 0,95; WÄNKE und HINTENBERGER<sup>24</sup> fanden für die Eisenmeteorite  $0,94 \pm 0,03$ .

In Tab. 3 sind diejenigen Meteorite nochmals aufgeführt, für die Helium- und Neonmessungen anderer Autoren vorliegen. Berücksichtigt man die Tatsache, daß geringe Unterschiede bei den Spallationsedeltgasen wegen etwa vorhandener Tiefeneffekte durchaus zu erwarten sind, so ist die Übereinstimmung der Werte anderer Autoren mit unseren Ergebnissen recht gut. Wie aus den angegebenen  $\Delta$ -Werten, die sich stets auf unsere Ergebnisse beziehen, ersichtlich ist, liegt beim Heliumgehalt die mittlere absolute Abweichung bei 13% und beim Neon bei 24%. Eine starke Ausnahme ergibt sich nur für den Meteoriten Pultusk. Hier fanden KIRSTEN, KRANKOWSKY und ZÄHRINGER<sup>12</sup> mehr als doppelt so viel Helium, jedoch nur etwa  $\frac{1}{3}$  des Neongehaltes wie wir. Daß eine solche Abweichung nicht durch Meß-

| Meteorit     | He<br>10 <sup>-6</sup> cm <sup>3</sup> /g |  | Δ<br>%         | <sup>3</sup> He<br>10 <sup>-8</sup> cm <sup>3</sup> /g |  | Ne<br>10 <sup>-8</sup> cm <sup>3</sup> /g |  | Δ<br>%           | <sup>21</sup> Ne<br>10 <sup>-8</sup> cm <sup>3</sup> /g |   | <sup>3</sup> He/ <sup>21</sup> Ne |   |
|--------------|---|--|----------------|--|--|---|--|------------------|---|---|-----------------------------------|---|
|              | eigene                                    | Lit.                                     |                | eigene   | Lit.   | eigene                                    | Lit.                                     |                  | eigene  | Lit.  | eigene                            | Lit.  |
|              | Werte                                     |  |                | Werte  |  | Werte                                     |  |                  | Werte   |   | Werte                             |   |
| Beardsley    | 12,9                                      | 13,7 <sup>8</sup>                        | + 6,2          | 6,7  | 9,1 <sup>8</sup>   |   |  |                  |   |   |                                   |   |
| Bruderheim   | 5,73                                      | 5,47 <sup>12</sup><br>5,68 <sup>25</sup> | — 4,5<br>— 0,9 | 47,4   | 47 <sup>12</sup><br>49,5 <sup>25</sup><br>43,5 <sup>11</sup> | 24,4                                      | 30,4 <sup>12</sup>                       | + 24,6           | 8,17  | 10,1 <sup>12</sup><br>11,9 <sup>25</sup><br>9,0 <sup>11</sup> | 5,80                              | 4,65 <sup>12</sup><br>4,16 <sup>25</sup><br>4,8 <sup>11</sup> |
| Hayes Center | 3,97                                      | 3,39 <sup>12</sup>                       | — 14,6         | 49,0   | 39 <sup>12</sup>   | 35,0                                      | 32,1 <sup>12</sup>                       | — 8,3            | 10,02   | 10,7 <sup>12</sup>  | 4,89                              | 3,65 <sup>12</sup>  |
| Holbrook     | 17,6                                      | 18,6 <sup>8</sup><br>18,32 <sup>12</sup> | + 5,7<br>+ 4,1 | 24,1   | 27,5 <sup>8</sup><br>31,5 <sup>12</sup>                      | 17,4                                      | 20,18 <sup>9</sup><br>24,6 <sup>12</sup> | + 16,0<br>+ 41,4 | 5,74  | 6,70 <sup>9</sup><br>8,2 <sup>12</sup>                        | 4,20                              | 3,84 <sup>12</sup>  |
| L'Aigle      | 8,37                                      | 9,49 <sup>12</sup>                       | + 13,4         | 13,3   | 14,0 <sup>12</sup>   | 7,66                                      | 10,9 <sup>12</sup>                       | + 42,2           | 3,26  | 3,6 <sup>12</sup>   | 4,08                              | 3,89 <sup>12</sup>  |
| Plainview    | 9,31                                      | 12,72 <sup>12</sup>                      | + 36,6         | 5,80   | 6,55 <sup>12</sup>   | 7,52                                      | 5,60 <sup>12</sup>                       | — 25,6           | 1,71  | 1,75 <sup>12</sup>  | 3,39                              | 3,74 <sup>12</sup>  |
| Pultusk      | 6,33                                      | 13,1 <sup>12</sup>                       | + 107          | 25,1   | 10 <sup>12</sup>   | 16,7                                      | 5,50 <sup>12</sup>                       | — 67             | 5,38  | 1,75 <sup>12</sup>  | 4,67                              | 5,71 <sup>12</sup>  |
| Ramsdorf     | 1,43                                      | 1,38 <sup>12</sup><br>1,46 <sup>25</sup> | — 3,5<br>+ 2,1 | 6,9  | 8,2 <sup>12</sup><br>6,55 <sup>25</sup>                      | 4,33                                      | 6,08 <sup>12</sup>                       | + 40,4           | 1,39  | 1,88 <sup>12</sup><br>1,70 <sup>25</sup>                      | 4,97                              | 4,36 <sup>12</sup><br>3,85 <sup>25</sup>                      |
| Johnstown    | 5,02                                      | 6,59 <sup>12</sup>                       | + 31,3         | 40,5   | 49 <sup>12</sup>   | 21,0                                      | 25,2 <sup>12</sup>                       | + 20,0           | 6,74  | 8,1 <sup>12</sup>   | 6,04                              | 6,05 <sup>12</sup>  |
| Juvinas      | 47,9                                      | 40,83 <sup>12</sup>                      | — 14,8         | 15,04  | 13 <sup>12</sup>   | 5,54                                      | 6,45 <sup>12</sup>                       | + 16,4           | 1,66  | 2,0 <sup>12</sup>   | 9,06                              | 6,5 <sup>12</sup>   |
| Pasamonte    | 49,5                                      | 61,08 <sup>8</sup>                       | + 23,4         | 6,88   | 7,9 <sup>8</sup>   | 2,10                                      |  |                  | 0,72  | 1,06 <sup>11</sup>  | 9,56                              | 7,5 <sup>11</sup>   |
| Sioux County | 47,0                                      | 54,24 <sup>12</sup>                      | + 15,4         | 20,4   | 24 <sup>12</sup>   | 13,4                                      | 11,75 <sup>12</sup>                      | — 12,3           | 2,82  | 3,85 <sup>12</sup>  | 7,22                              | 6,23 <sup>12</sup>  |
| Stannern     | 67,1                                      | 79,61 <sup>12</sup>                      | + 18,7         | 32,2   | 35,7 <sup>12</sup><br>33,8 <sup>11</sup>                     | 13,4                                      | 15,45 <sup>12</sup>                      | + 15,3           | 4,07  | 4,8 <sup>12</sup><br>5,32 <sup>11</sup>                       | 7,91                              | 7,44 <sup>12</sup><br>6,4 <sup>11</sup>                       |

Tab. 3. Vergleich unserer Meßwerte mit bereits in der Literatur vorhandenen Daten. Die  $\Delta$ -Werte geben die Differenzen der Literaturwerte in bezug auf unsere Werte in % an.

<sup>25</sup> P. SIGNER, Privatmitteilung.

fehler erklärt werden kann, zeigt gerade die recht gute Übereinstimmung mit den anderen aufgeführten Beispielen. Für diese sind auch die Abweichungen gegenüber unseren Meßwerten in positiver bzw. negativer Richtung etwa gleich häufig. Da alle, die sich mit solchen Messungen beschäftigen, die Proben in den meisten Fällen erst erhalten, nachdem sie teilweise durch viele Hände gegangen sind, wäre es durchaus denkbar, daß es sich in einem der beiden Laboratorien bei dem unter Pultusk geführten Meteoriten in Wahrheit um einen anderen Meteoriten handelt. Andererseits war die Gesamtmasse des Meteoriten Pultusk vor dem Eintritt in die irdische Atmosphäre sicher sehr groß, so daß die Unterschiede bei den Spallationsedelgasen möglicherweise als Tiefeneffekt erklärt werden können. Schwieriger zu erklären sind die Unterschiede im Gehalt an radiogenem Helium 4.

#### b) Radiogene Alter

Zur Berechnung der radiogen gebildeten  $^4\text{He}$ -Menge (Tab. 4) wurde für das durch die kosmische Strahlung gebildete Helium ein Produktionsverhältnis  $^4\text{He}/^3\text{He} = 3$  angenommen. Die in Tab. 4 aufgeführten Uranwerte entstammen größtenteils eigenen Messungen<sup>15</sup>, zum kleineren Teil Messungen von GOLES und ANDERS<sup>26</sup> und HAMAGUCHI, REED und TURKEYVICH<sup>27</sup>. Für diejenigen Meteorite, für die keine Uranbestimmungen vorlagen, wurde zur Berechnung des Uran-Helium-Alters ein mittlerer Urangelhalt von  $1,1 \cdot 10^{-8}$  g/g zugrunde gelegt. Für die beiden Eukrite Juvinas und Stannern wurde der Mittelwert des Urangelhaltes der beiden von uns gemessenen Howardite Pasamonte und Sioux County verwendet, da sich diese beiden Klassen von Achondriten hinsichtlich ihres Urangelhaltes vermutlich nicht allzu sehr unterscheiden. Außerdem wurde zur Berechnung des Alters im allgemeinen ein Thorium/Uran-Verhältnis von 3,5 angenommen mit Ausnahme derjenigen 4 Meteorite, für die Thoriumbestimmungen von BATE, HUIZENGA und POTRATZ<sup>28</sup> vorliegen. Für die Berechnung des Uran-Thorium-Helium-Alters wurden folgende Konstanten benutzt:  $\lambda_{238} = 1,537 \cdot 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ ,  $\lambda_{235} = 9,77 \cdot 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ , Häufigkeit von  $^{235}\text{Uran} = 0,72\%$  und  $\lambda_{232} = 0,499 \cdot 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ . Die Ergebnisse sind zur besseren Übersicht in einem Histo-

gramm (Abb. 2) dargestellt. In Tab. 4 sind auch noch die Kalium-Argon-Alter der untersuchten Meteorite aufgeführt, und in Abb. 3 sind zum Vergleich der beiden Alter in einem Diagramm auf der Abszisse die Kalium-Argon-Alter und auf der Ordinate die Helium-Alter eingetragen. Man sieht deutlich,

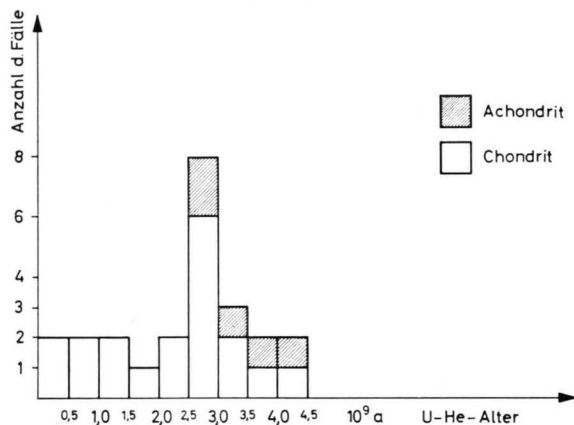


Abb. 2. Histogramm der radiogenen Helium-Alter von Steinmeteoriten. Die Achondrite sind durch Schraffierung besonders gekennzeichnet. Daten aus Tab. 4.

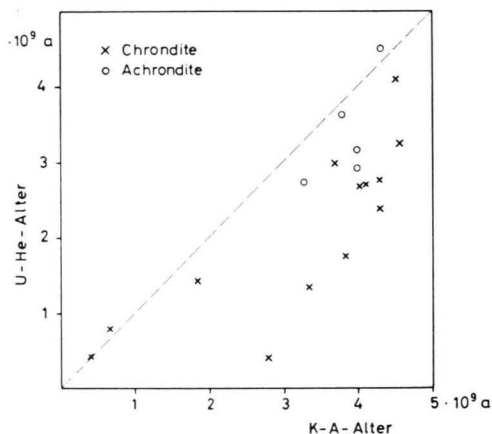


Abb. 3. Vergleich zwischen radiogenem Argon- und Helium-Alter der untersuchten Steinmeteorite. Daten aus Tab. 4.

daß die  $^4\text{He}$ -Alter häufig wesentlich niedriger als die Argonalter liegen. Wie das Histogramm Abb. 2 zeigt, fanden wir bei den 19 untersuchten Chondriten nur in einem Fall ein Heliumalter von über  $4 \cdot 10^9$  Jahren, während bei KIRSTEN, KRANKOWSKY und ZÄHRINGER<sup>12</sup> 28% aller Heliumalter über  $4 \cdot 10^9$

<sup>26</sup> G. G. GOLES u. E. ANDERS, *Geochim. Cosmochim. Acta* **26**, 723 [1962].

<sup>27</sup> H. HAMAGUCHI, G. W. REED u. A. TURKEYVICH, *Geochim. Cosmochim. Acta* **12**, 337 [1957].

<sup>28</sup> G. L. BATE, J. R. HUIZENGA u. H. A. POTRATZ, *Geochim. Cosmochim. Acta* **16**, 88 [1959].

| Meteorit                       | $^4\text{He}$ rad.<br>$10^{-6}$<br>$\text{cm}^3/\text{g}$ | U<br>$10^{-8}$ g/g | Lit.   | Th<br>$10^{-8}$ g/g | Lit. | U-Th-He-<br>Alter<br>$10^9$ a | K-A-<br>Alter<br>$10^9$ a | Lit.          | Kosmog.<br>Alter<br>$10^6$ a |
|--------------------------------|---|--------------------|--------|---------------------|------|-------------------------------|---------------------------|---------------|------------------------------|
| <i>Chondrite</i>               |   |                    |        |                     |      |                               |                           |               |                              |
| Akaba                          | 6,83  | 0,82               | 15     |                     |      | 2,98                          | 3,57<br>3,8               | 13<br>29      | 18,9                         |
| Beardsley                      | 12,62   | 1,13               | 15, 26 | 4,77                | 28   | 3,50                          | 4,30<br>4,82              | 4<br>30       | 4,03                         |
| Beddgelert                     | 2,32  | 2,45               | 15     |                     |      | 0,42                          | 2,78                      | 13            | 4,32                         |
| Breitscheid<br>(heller Anteil) | 5,02  | 1,24               | 15     |                     |      | 1,35                          | 3,33                      | 13            | 23,3                         |
| Bruderheim                     | 3,83  | 1,1                | 26     |                     |      | 1,43                          | 1,85                      | 12            | 24,7                         |
| Hayes Center                   | 2,01  |                    |        |                     |      | 0,78                          | 0,65                      | 12            | 28,0                         |
| Holbrook                       | 16,64   | 1,26               | 27     | 3,80                | 28   | 4,10                          | 4,40<br>4,76<br>4,44      | 4<br>31<br>12 | 15,0                         |
| L'Aigle<br>(dunkler Anteil)    | 7,84  |                    |        |                     |      | 2,67                          | 4,03                      | 12            | 7,46                         |
| Leedey                         | 6,15  |                    |        |                     |      | 2,18                          |                           |               | 7,11                         |
| Mocs                           | 6,80  | 1,1                | 26     |                     |      | 2,37                          | 4,30                      | 4             | 14,3                         |
| Modoc                          | 7,98  | 1,07               | 15     | 3,92                | 28   | 2,75                          | 4,19                      | 13            | 29,2                         |
| Mooresfort<br>(dunkler Anteil) | 7,90  |                    |        |                     |      | 2,69                          |                           |               | 8,56                         |
| Okniny                         | 9,58  |                    |        |                     |      | 3,07                          |                           |               | 6,51                         |
| Pantar<br>(heller Anteil)      | 12,1  |                    |        |                     |      | 3,60                          |                           |               | 2,47                         |
| Plainview                      | 9,08  | 1,25               | 26     |                     |      | 2,70                          | 4,12                      | 12            | 4,12                         |
| Pultusk                        | 5,33  | 1,22               | 15     |                     |      | 1,75                          | 3,75<br>3,93              | 13<br>12      | 14,7                         |
| Ramsdorf                       | 1,15  |                    |        |                     |      | 0,44                          | 0,37<br>0,42              | 32<br>12      | 3,91                         |
| Seres                          | 1,365   |                    |        |                     |      | 0,54                          |                           |               | 0,31                         |
| Temple                         | 8,39  |                    |        |                     |      | 2,80                          |                           |               | 19,6                         |
| <i>Achondrite</i>              |   |                    |        |                     |      |                               |                           |               |                              |
| Johnstown                      | 3,39  | 0,22               | 15     | 0,59                | 28   | 4,50                          | 4,32                      | 12            | 20,8                         |
| Juvinas                        | 47,3  |                    |        |                     |      | 2,92                          | 4,0                       | 12            | 6,42                         |
| Pasamonte                      | 49,2  | 5,42               | 15     |                     |      | 3,16                          | 4,25<br>3,80              | 13<br>4       | 2,87                         |
| Sioux County                   | 46,2  | 6,30               | 15     |                     |      | 2,72                          | 3,26                      | 12            | 9,55                         |
| Stannern                       | 65,8  |                    |        |                     |      | 3,63                          | 3,79                      | 12            | 14,6                         |

Tab. 4. Gehalte der Meteorite an radiogenem Helium, Uran und Thorium und die daraus errechneten radiogenen Heliumalter im Vergleich mit den Kalium-Argon-Altern und den Strahlungsaltern.

Jahren liegen. Wir glauben, daß diese Diskrepanz statistisch bedingt ist, um so mehr als in den Fällen, in denen Untersuchungen des gleichen Meteoriten in beiden Laboratorien vorliegen, gute Übereinstimmung vorhanden ist, ein weiterer Beweis für die Wichtigkeit einer möglichst großen Statistik.

Der Einfluß von Diffusionsverlusten auf die Uran-Helium- und Kalium-Argon-Alter wurde von ANDERS<sup>33</sup> ausführlich diskutiert. Stimmen beide Alter überein, so ist man geneigt anzunehmen, daß dieses Alter dann ein wahres Alter ist und das Zeitinter-

vall seit dem letzten vollständigen Entgasen wiedergibt. Die Alterswerte von Meteoriten, auf die das zutrifft, müssen natürlich in Abb. 3 auf der gestrichelten Geraden liegen.

Es ist aber auch der Fall denkbar, daß die Übereinstimmung vom Heliumalter mit dem Argonalter rein zufällig ist, ja daß sich sogar höhere Werte für das Heliumalter ergeben als für das Argonalter. Die Reichweite der  $\alpha$ -Teilchen in den Uran- und Thoriumreihen sind etwa vergleichbar mit den Korngrößen der Meteoritenminerale, weshalb das radio-

<sup>29</sup> S. G. THOMSON u. K. J. MAYNE, Geochim. Cosmochim. Acta **7**, 169 [1955].

<sup>30</sup> G. J. WASSERBURG u. R. J. HAYDEN, Phys. Rev. **97**, 86 [1955].

<sup>31</sup> G. J. WASSERBURG, R. J. HAYDEN u. K. J. JENSEN, Geochim. Cosmochim. Acta **10**, 153 [1956].

<sup>32</sup> K. GOEBEL u. P. SCHMIDLIN, Z. Naturforsch. **14 a**, 996 [1959].

<sup>33</sup> E. ANDERS, Rev. Mod. Phys. **34**, 287 [1962].



gene Helium stets relativ homogen über alle Meteoritbestandteile verteilt sein wird; so ist radiogenes Helium z. B. sicherlich auch im metallischen Nickel-eisen der Steinmeteorite enthalten. Hingegen ist das radiogene Argon natürlich nur auf die kaliumhaltigen Minerale konzentriert. Auf Grund der unterschiedlichen Diffusionskonstanten in den Meteoritbestandteilen — z. B. wird Helium von Nickeleisen sicher sehr viel stärker festgehalten als von Silikaten — sind bei hohen Diffusionsverlusten gleich hohe, ja sogar höhere Heliumalter als Argonalter denkbar.

Beschränken wir uns auf den Zeitraum nach dem letzten stärkeren Erhitzen, d. h. auf den Zeitraum, in dem es keine vollständige oder nahezu vollständige Entgasung mehr gab, so ergeben sich zwei grundlegend verschiedene Möglichkeiten für die thermische Geschichte der Steinmeteorite, aus denen die Diffusionsverluste entstehen können:

1. Die Diffusion fand während des gesamten Zeitintervalls vom Zeitpunkt der letzten vollständigen Entgasung an statt.
2. Die Diffusion fand nur in der letzten, relativ kurzen Zeit, die identisch mit dem Strahlungsalter ist, statt.

Aus unseren Messungen geht das häufige Vorhandensein größerer Diffusionsverluste deutlich hervor (s. Abb. 3). Wir haben deshalb mit Hilfe unserer Meßergebnisse versucht zu prüfen, ob es möglich ist, daß die Diffusionsverluste nur in dem Zeitintervall, das dem Strahlungsalter entspricht, also nur in der allerletzten Zeit, stattgefunden haben. Es stellte sich heraus, daß nur einige Fälle auf diese Weise erklärt werden können. Wiederum muß man jedoch bedenken, daß exakte Aussagen hierüber wegen des unterschiedlichen Sitzes von radiogenem Helium und radiogenem Argon unmöglich sind. Da man die Diffusionsverluste der einzelnen Meteoritenminerale exakt messen kann und solche Experimente in unserem Laboratorium auch im Gange sind, möchten wir hier auf diese Frage nicht weiter eingehen.

### c) Strahlungsalter

Unter Strahlungsalter versteht man seit dem Modell von MARTIN<sup>34</sup> im allgemeinen die Zeit seit dem Ausbrechen des Meteoriten aus einem größeren Mutterkörper, in welchem der Meteorit bis dahin von der Höhenstrahlung abgeschirmt war. Verschiedene Strahlungsalter weisen also auf verschiedene katastrophische Zerstörungen größerer Körper hin. WHIPPLE und FIREMAN<sup>35</sup> haben darauf hingewiesen, daß durch Weltraumerosion die Strahlungsalter stark verfälscht sein können oder daß eventuell die Strahlungsalter allein durch die Erosionsrate bestimmt sein könnten. Über die Größe der Erosionsrate sind nur sehr indirekte Abschätzungen möglich, während katastrophische Zusammenstöße von Meteoriten im Weltraum experimentell nachgewiesen wurden<sup>36</sup>. Daher haben wir zur Berechnung des Strahlungsalters der von uns untersuchten Meteorite am Modell des plötzlichen Zerbrechens von Meteoritenmutterkörpern festgehalten.

In Tab. 5, Spalten 2 und 3, sind die gemessenen <sup>3</sup>He- und <sup>21</sup>Ne-Werte aufgeführt, mit deren Hilfe sich Strahlungsalter errechnen lassen. Eine exakte Berechnung ist nur dann möglich, wenn man neben der Konzentration eines stabilen Reaktionsproduktes der Höhenstrahlung in einem Meteoriten auch noch die Zerfallsrate eines radioaktiven, durch die Höhenstrahlung gebildeten Atomkernes an der gleichen Stelle gemessen hat. Besonders günstig liegen die Verhältnisse im Falle der Steinmeteorite für die Paare T-<sup>3</sup>He und <sup>22</sup>Na-<sup>22</sup>Ne. Sowohl Tritium als im besonderen auch <sup>22</sup>Na-Messungen liegen nur für eine relativ kleine Zahl von Meteoriten vor. Glücklicherweise variieren die Tritiumzerfallsraten, wie sie an verschiedenen Steinmeteoriten gemessen wurden<sup>3, 5, 6, 32, 37–41</sup>, nur relativ wenig. Ähnliches gilt wohl auch für die <sup>22</sup>Na-Zerfallsraten<sup>43–45</sup>. Nimmt man daher einen Fehler von etwa 30% in Kauf, so kann man unter der Annahme einer für alle Meteorite gleichen Tritium- bzw. <sup>22</sup>Na-Zerfallsrate Strahlungsalter auch für solche Meteorite berechnen, für

<sup>34</sup> G. R. MARTIN, *Geochim. Cosmochim. Acta* **3**, 288 [1953].

<sup>35</sup> F. L. WHIPPLE u. E. L. FIREMAN, *Nature, Lond.* **183**, 1315 [1959].

<sup>36</sup> E. VILČEK u. H. WÄNKE, *Z. Naturforschg.* **16 a**, 379 [1961].

<sup>37</sup> G. GOEBEL u. P. SCHMIDLIN, *Z. Naturforschg.* **15 a**, 79 [1960].

<sup>38</sup> J. GEISS, B. HIRT u. H. OESCHGER, *Helv. Phys. Acta* **33**, 590 [1960].

<sup>39</sup> E. L. FIREMAN u. J. DEFELICE, *Geochim. Cosmochim. Acta* **24**, 183 [1960].

<sup>40</sup> E. L. FIREMAN, *J. Geophys. Res.* **67**, 2592 [1962].

<sup>41</sup> ST. CHARALAMBUS u. K. GOEBEL, *Geochim. Cosmochim. Acta* **26**, 659 [1962].

<sup>42</sup> A. E. BAINBRIDGE, H. E. SUESS u. H. WÄNKE, *Geochim. Cosmochim. Acta* **26**, 471 [1962].

<sup>43</sup> E. VILČEK u. H. WÄNKE, *Z. Naturforschg.* **15 a**, 1004 [1960].

<sup>44</sup> M. HONDA, S. UMEMOTO u. J. R. ARNOLD, *J. Geophys. Res.* **66**, 3541 [1961].

<sup>45</sup> M. W. ROWE u. M. A. VAN DILLA, *J. Geophys. Res.* **66**, 3553 [1961].

| Meteorit                    | $^3\text{He}$<br>$10^{-8}$<br>$\text{cm}^3 \text{ NTP/g}$ | $^{21}\text{Ne}$<br>$10^{-8}$<br>$\text{cm}^3 \text{ NTP/g}$ | $^3\text{He}$<br>$^{21}\text{Ne}$ | $^3\text{He}$ -Alter<br>$10^6 \text{ a}$ | $^{22}\text{Ne}$ -Alter<br>$10^6 \text{ a}$ | Mittelwert<br>der kosmog.<br>Alter $10^6 \text{ a}$ |
|-----------------------------|---|--|-----------------------------------|--|---|---|
| <i>Chondrite</i>            |   |  |                                   |  |   |   |
| Akaba                       | 40,0  | 5,42   | 7,37                              | 20,4                                     | 16,7  | 18,9  |
| Akaba                       | 41,7  | 5,54   | 7,53                              | 21,3                                     | 17,1  |   |
| Beardsley                   | 6,65  | 1,51   | 4,44                              | 3,40                                     | 4,66  | 4,03  |
| Beddgelert                  | 7,93  | —  | —                                 | 4,05                                     | —   |   |
| Beddgelert                  | 7,44  | 1,66   | 4,48                              | 4,80                                     | 5,12  | 4,32  |
| Breitscheid (heller Anteil) | 35,3  | 9,25   | 3,82                              | 18,0                                     | 28,6  |   |
| Bruderheim                  | 47,4  | 8,17   | 5,80                              | 24,2                                     | 25,2  | 23,3  |
| Hayes Center                | 49,0  | 10,02  | 4,89                              | 25,0                                     | 30,9  | 24,7  |
| Holbrook                    | 24,1  | 5,74   | 4,20                              | 12,3                                     | 17,7  | 28,0  |
| L'Aigle (dunkler Anteil)    | 13,3  | 2,63   | 5,06                              | 6,80                                     | 8,12  | 15,0  |
| Leedey                      | 13,7  | 2,34   | 5,85                              | 7,00                                     | 7,22  | 7,46  |
| Mocs                        | 23,3  | 5,41   | 4,30                              | 11,9                                     | 16,7  | 7,11  |
| Modoc                       | 57,0  | 9,74   | 5,85                              | 29,1                                     | 30,0  | 14,3  |
| Modoc                       | 51,8  | 10,05  | 5,15                              | 26,5                                     | 31,0  |   |
| Mooresfort (dunkler Anteil) | 14,1  | 3,21   | 4,39                              | 7,21                                     | 9,90  | 29,2  |
| Okniny (dunkler Anteil)     | 9,12  | 2,71   | 3,37                              | 4,66                                     | 8,36  |   |
| Pantar (heller Anteil)      | 3,88  | 0,96   | 4,04                              | 1,98                                     | 2,96  | 8,56  |
| Plainview                   | 5,80  | 1,71   | 3,39                              | 2,96                                     | 5,27  | 6,51  |
| Pultusk                     | 25,1  | 5,38   | 4,67                              | 12,8                                     | 16,6  | 2,47  |
| Ramsdorf                    | 6,91  | 1,39   | 4,97                              | 3,53                                     | 4,29  | 4,12  |
| Seres                       | 0,12  | 0,18   | 0,67                              | 0,063                                    | 0,55  | 14,7  |
| Temple                      | 34,1  | 7,08   | 4,81                              | 17,4                                     | 21,8  | 3,91  |
| <i>Achondrite</i>           |   |  |                                   |  |   |   |
| Johnstown                   | 40,7  | 6,74   | 6,04                              | 20,8                                     | 20,8  | 0,31  |
| Juvinas                     | 15,04   | 1,66   | 9,06                              | 7,69                                     | 5,12  | 19,6  |
| Pasamonte                   | 6,88  | 0,72   | 9,56                              | 3,52                                     | 2,22  |   |
| Sioux County                | 20,35   | 2,82   | 7,22                              | 10,40                                    | 8,70  | 6,42  |
| Stannern                    | 32,2  | 4,07   | 7,91                              | 16,5                                     | 12,6  | 2,87  |

Tab. 5. Die durch die Höhenstrahlung erzeugten  $^3\text{He}$ - und  $^{21}\text{Ne}$ -Mengen und die daraus errechneten Strahlungsalter. Zur Berechnung der T- $^3\text{He}$ -Alter wurde eine T-Zerfallsrate von 0,5 dpm/g, für die  $^{22}\text{Na}$ - $^{22}\text{Ne}$ -Alter eine  $^{22}\text{Na}$ -Zerfallsrate von 0,9 dpm/g zugrunde gelegt. Die  $^{22}\text{Ne}$ -Werte wurden aus den  $^{21}\text{Ne}$ -Werten unter Berücksichtigung des Produktionsverhältnisses  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}=0,92$  errechnet.

die nur  $^3\text{He}$ - bzw.  $^{22}\text{Ne}$ -Messungen vorliegen. Für den von uns untersuchten Meteoriten Bruderheim erhielten BAINBRIDGE, SUESS und WÄNKE<sup>42</sup> eine Tritium-Zerfallsrate von 0,50 dpm/g für den Zeitpunkt des Falles. Mit der Annahme eines Produktionsverhältnisses  $\text{T}/^3\text{He}=1$  erhalten wir für den Meteoriten ein Strahlungsalter von  $25,2 \cdot 10^6$  Jahren. Wir haben ferner für alle übrigen Meteorite die Strahlungsalter unter der Annahme einer gleichen Tritiumzerfallsrate, wie sie im Bruderheim gemessen wurde, berechnet (Tab. 5, Spalte 5). Wie oben erwähnt, sind die so ermittelten Werte nur auf etwa 30% genau. Analog konnten wir mit der von VILCSEK und WÄNKE<sup>43</sup> gemessenen Zerfallsrate für  $^{22}\text{Na}$  im Meteoriten Breitscheid von 0,0898 dpm/g und einem Produktionsverhältnis von  $^{22}\text{Na}/^{22}\text{Ne}=1$  für Breitscheid ein  $^{22}\text{Na}$ - $^{22}\text{Ne}$ -Strahlungsalter von  $21,9 \cdot 10^6$  Jahren berechnen. Die gleiche Zerfallsrate für  $^{22}\text{Na}$  kann näherungsweise auch für alle übrigen Meteorite angenommen werden<sup>44, 45</sup>. Mit dieser Voraus-

setzung haben wir auch die  $^{22}\text{Na}$ - $^{22}\text{Ne}$ -Strahlungsalter berechnet (Tab. 5, Spalte 6). Da die  $^{21}\text{Ne}$ -Werte im allgemeinen zuverlässiger sind als die Werte für  $^{22}\text{Ne}$  — im Falle von  $^{22}\text{Ne}$  sind geringe Verfälschungen entweder durch Luftneon oder aber durch eine kleine Beimischung von Urneon möglich —, wurden zur Berechnung der Strahlungsalter an Stelle der  $^{22}\text{Ne}$ - die  $^{21}\text{Ne}$ -Werte verwendet unter Berücksichtigung des Produktionsverhältnisses  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}=0,92$ . Wie Tab. 5 zeigt, ergeben sich zwischen den aus dem  $^3\text{He}$  zu denen aus  $^{21}\text{Ne}$  berechneten Strahlungsaltern gewisse Diskrepanzen. Diese Diskrepanzen sind nicht weiter verwunderlich, zeigen doch die  $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnisse ziemlich große Variationen. STAUFFER<sup>11</sup> glaubte diesen Unterschied in den  $^3\text{He}/^{21}\text{Na}$ -Verhältnissen durch die Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung erklären zu können. Er fand im Falle der Achondrite ein etwa doppelt so hohes  $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis als für Chondrite. Ein solcher Unterschied findet sich auch

für die von uns gemessenen Meteorite, doch zeigt sich aus unseren Messungen, daß der Unterschied in der chemischen Zusammensetzung allein nicht ausreicht, um diese Variationen zu erklären. So zeigt z. B. der Achondrit Johnstown ebenfalls ein relativ hohes  $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis, doch handelt es sich in diesem Fall um einen chondritischen Achondrit, dessen chemische Zusammensetzung vollkommen identisch ist mit derjenigen der Chondrite. Gleichfalls ein sehr hohes  $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis zeigt der Chondrit Akaba. Neben relativ naheliegenden Erklärungen für diese Abweichungen, wie z. B. ein unterschiedliches Energiespektrum der die Spallationsreaktionen auslösenden Strahlung, sind auch andere Ursachen denkbar. Wir möchten jedoch diese Fragen bis zum Abschluß eindeutiger Untersuchungen, insbesondere hinsichtlich der Diffusionsverluste der radiogenen und auch der kosmogenen Edelgase der Steinmeteorite, offen lassen.

In Tab. 4 sind neben den radiogenen Helium- und Argon-Altern in Spalte 7 auch noch die Strahlungsalter der von uns untersuchten Meteorite angegeben. Hierbei wurden für die Strahlungsalter jeweils die Mittelwerte aus den  $^3\text{He}$ - und  $^{21}\text{Ne}$ -Altern verwendet. Wie man sieht, findet sich zumindest für die von uns gemessenen Meteorite keine Beziehung zwischen den radiogenen Altern und den Strahlungsaltern. So zeigen z. B. die hinsichtlich der Kalium-Argon-Alter jungen Meteorite Bruderheim und Hayes Center hohe Strahlungsalter, andererseits hat z. B. der Meteorit Beardsley mit einem hohen Argon- und Helium-Alter ein sehr niedriges Strahlungsalter. Ebenso

zeigen unsere Messungen, wie aus dem Histogramm Abb. 4 hervorgeht, keinerlei Gruppierung der Strahlungsalter um bestimmte Werte, wie von GEISS, OESCHGER und SIGNER<sup>6</sup> vermutet wurde.

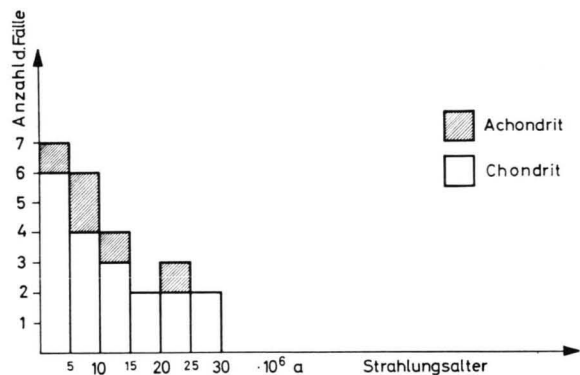


Abb. 4. Histogramm der Strahlungsalter von Steinmeteoriten. Daten aus Tab. 4 und 5.

Für die bereitwillige Überlassung von Meteoritproben danken wir herzlich Herrn Professor Dr. W. v. ENGELHARDT, Tübingen (Juvinas L'Aigle, Mooresfort, Okniny und Stannern), Herrn Professor Dr. C. W. CORRENS, Göttingen (Seres) und Herrn Professor Dr. R. E. FOLINSBEE (Bruderheim; vermittelt durch Professor Dr. H. E. SUSS). Die Meteorite Akaba und Beddgelert entstammen der Sammlung F. A. PANETH. Für ihre Mithilfe bei der Ausführung der experimentellen Arbeiten danken wir Fräulein H. HARASIN, Fräulein M. MONERJAN und den Herren B. SPETTEL und B. WELLNER. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sind wir für die leihweise Überlassung eines HF-Generators und dem Bundesministerium für Atomkernenergie für weitere Sachbeihilfen zu Dank verpflichtet.