

# Das Bestrahlungsalter und die präatmosphärische Größe des Eisenmeteoriten Unter-Mässing

H. Voshage, H. Feldmann und L. Schultz

Max-Planck-Institut für Chemie (Otto-Hahn-Institut) Mainz

Z. Naturforsch. **35a**, 50–56 (1980); eingegangen am 28. Oktober 1979

*Herrn Prof. Dr. Heinrich Hintenberger zum 70. Geburtstag*

*Cosmic-ray Exposure Age and Pre-atmospheric Size of the Iron Meteorite Unter-Mässing*

The cosmic-ray produced rare gas nuclides and the isotopic composition of potassium have been measured in a sample from the iron meteorite Unter-Mässing. Unusually high concentrations of the rare gas nuclides have been found. Accordingly, an unusually high exposure age of  $\approx 1400$  Ma was determined by the  $^{41}\text{K}/^{40}\text{K}$ -method. Unter-Mässing is a meteorite of the chemical group IIC. Thereby, it is the third one found among  $\approx 80$  meteorites heretofore dated which belongs to one of the sparsely populated side-groups or to no group at all, and at the same time exhibits an extraordinarily high exposure age (anomalous iron Deep Springs:  $\approx 2300$  Ma, IIIF-Clark County:  $\approx 1400$  Ma). The experimental data allow, by procedures developed recently, to estimate the pre-atmospheric size of the meteoroid to have been  $\approx 2000$  kg and the sample investigated to come from a shielding depth of  $\approx 16$  cm. According to this size estimation, Unter-Mässing cannot be a fragment broken off from the impact projectile of the Nördlinger Ries crater either in the atmosphere at high altitudes or at the explosive impact event.

## 1. Einführung

Meteoroiden sind im interplanetaren Raum der kosmischen Strahlung ausgesetzt. Von den in Eisenmeteoriten nachweisbaren „kosmogenen“ Spallationsprodukten sind mit massenspektrometrischen Methoden zwei Gruppen von Elementen untersucht worden: die Edelgase und einige durch thermische Oberflächenionisierung ionisierbare Elemente, darunter insbesondere Kalium.

Für die Auswahl dieser Elementgruppen waren zunächst experimentelle Gesichtspunkte maßgebend: Bei den Edelgasen die Tatsache, daß sie durch vollständige Verdampfung der Meteoritenprobe in einem UHV-Ofen quantitativ extrahiert und durch Getterung der dabei ebenfalls freigesetzten reaktionsfähigen Gase gereinigt werden können; auch in extrem kleinen Mengen gehen zumindest He, Ne und Ar nicht durch Sorption an den Wänden des Vakuumsystems verloren und können deshalb mit statisch betriebenen Massenspektrometern analysiert werden. Die andere Gruppe von Elementen (K, Li, Ca) zeichnet sich durch niedrige Ionisierungsarbeiten ihrer Atome aus. Bei der Desorption von heißen Metalloberflächen werden die Atome

durch Mitwirkung eines elektrischen Ziehfeldes sehr effektiv und selektiv ionisiert und lassen sich auf Grund dieser Tatsache sauber von Elementen mit hoher Ionisierungsarbeit trennen.

Von den erwähnten kosmogenen Elementen ist Kalium das interessanteste: Abb. 1 zeigt, daß das Massenspektrum von kosmogenem Kalium wegen des radioaktiven Zerfalls von  $^{40}\text{K}$  vom Bestrahlungsalter des Meteoriten abhängt. Zur genauen Bestimmung des Alters müssen allerdings zusätzlich Edelgasmessungen durchgeführt werden [1]. Die Zusammenfassung von Ergebnissen aus Edelgas- und Kaliummessungen gestattet dann nicht nur die Bestimmung des Bestrahlungsalters  $T$  (time), sondern auch der (präatmosphärischen) Größe  $S$  (size  $\triangleq$  Masse) des Meteoroiden und der Tiefe  $D$  (depth), aus der die Probe stammt [2]. Damit die Bestrahlungsgeschichte einer Meteoritenprobe durch nur diese drei Kenngrößen charakterisiert werden kann, werden modellmäßig kugelförmige Meteoroiden vorausgesetzt, auf die eine zeitlich konstante Strahlung eingewirkt hat.

Wir berichten hier über Edelgas- und Kaliummessungen und daraus folgende Bestimmungen der Bestrahlungskenngrößen  $T$ ,  $S$  und  $D$  an einer Probe des Meteoriten Unter-Mässing.

Sonderdruckanforderungen an Prof. Dr. H. Voshage, Max-Planck-Institut für Chemie, Postfach 3060, D-6500 Mainz.

0340-4811 / 80 / 0100-0050 \$ 01.00/0. — Please order a reprint rather than making your own copy.



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.

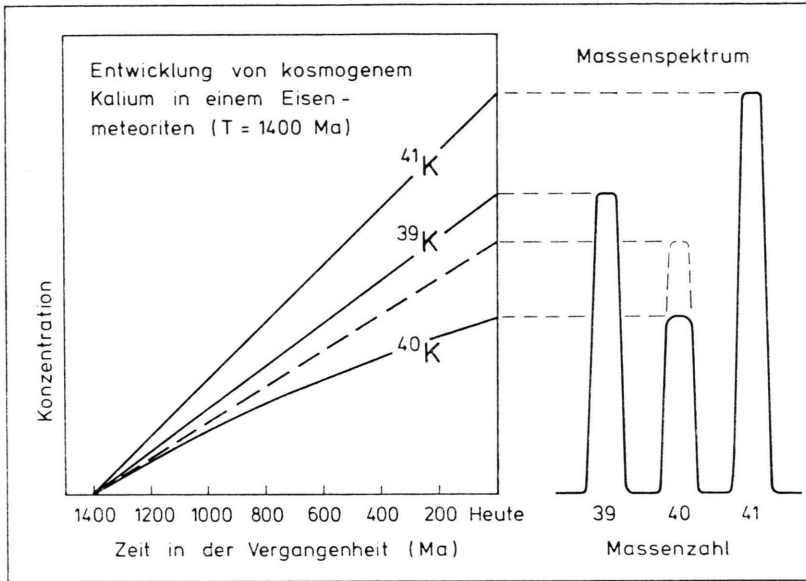


Abb. 1. Die zeitliche Entwicklung der Isotopenzusammensetzung und das Massenspektrum von kosmogenem Kalium in einem Eisenmeteoriten mit einem Bestrahlungsalter von 1400 Ma. Das Spektrum hängt außer vom Alter auch von den Verhältnissen der Produktionsraten und damit von der effektiven Bestrahlungshärte ab. Die wirklich gemessenen Spektren entstehen durch Superposition dieses Spektrums mit dem von gewöhnlichem Kalium.

## 2. Methodik

### 2.1. Bestrahlungsalter

Infolge der zeitlichen Entwicklung der drei kosmogenen (k) Kaliumnuklide (Abb. 1) ergeben sich nach einer Bestrahlungsdauer  $T$  die Konzentrationen

$$[^{39}\text{K}]_k = P_{39} T, \quad (1)$$

$$[^{40}\text{K}]_k = P_{40} \lambda^{-1} \cdot (1 - e^{-\lambda T}), \quad (2)$$

$$[^{41}\text{K}]_k = P_{41} T, \quad (3)$$

wobei die  $P$ 's die zeitlich konstanten, spezifischen Produktionsraten und  $\lambda$  die Zerfallskonstante von  $^{40}\text{K}$  sind. Eisenmeteorite enthalten neben dem kosmogenen aber auch gewöhnliches (g) Kalium mit einer Isotopenzusammensetzung, die mit der von irdischem Kalium übereinstimmt. Wegen der extrem kleinen Kaliumkonzentrationen in Eisenmeteoriten liefert zusätzlich auch die nicht ganz vermeidbare irdische Kaliumkontamination einen Beitrag. Bei der massenspektrometrischen Analyse einer aus einem Eisenmeteoriten abgetrennten Kaliumprobe erhält man demnach Massenspektren, die Überlagerungen der Spektren von kosmogenem und gewöhnlichem Kalium sind:

$$^{39}\text{K} = ^{39}\text{K}_k + ^{39}\text{K}_g, \quad (4)$$

$$^{40}\text{K} = ^{40}\text{K}_k, \quad (5)$$

$$^{41}\text{K} = ^{41}\text{K}_k + ^{41}\text{K}_g. \quad (6)$$

Wenn die kosmogene Komponente einen wesentlichen Beitrag zum Massenspektrum liefert (nur dann ist eine Datierung möglich), ist der aus gewöhnlichem Kalium stammende Anteil an  $^{40}\text{K}$  wegen der kleinen Isotopenhäufigkeit von  $\approx 0,01\%$  gegenüber dem kosmogenen Anteil vernachlässigbar. Aus den Gln. (1) bis (6) folgt mit den Definitionen

$$a = : (^{41}\text{K}/^{39}\text{K})_g, \quad (7)$$

$$M = : ^{41}\text{K}/^{40}\text{K} - a \cdot ^{39}\text{K}/^{40}\text{K}, \quad (8)$$

$$N = : P_{41}/P_{40} - a \cdot P_{39}/P_{40} \quad (9)$$

die Beziehung

$$\lambda T / (1 - e^{-\lambda T}) = M/N \quad (10)$$

für die Berechnung des Bestrahlungsalters.

Das primäre und eigentliche Ergebnis der Kaliumanalyse ist demnach der „ $M$ -Wert“ nach Gl. (8), der unabhängig davon ist, in welchem Verhältnis die kosmogene und die gewöhnliche Komponente zum Massenspektrum beitragen. („Der  $M$ -Wert ist invariant gegen den Grad der Beimischung von gewöhnlichem zum kosmogenen Kalium und damit invariant gegen terrestrische Kontamination“.)

Hinsichtlich des  $N$ -Wertes (Gl. (9)) muß berücksichtigt werden, daß alle Verhältnisse zwischen Produktionsraten verschiedener kosmogener Nuklide im wesentlichen nur von der effektiven Be-

strahlungshärte in der Probe abhängen, die ihrerseits am besten durch das Verhältnis  ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$  gemessen werden kann [3]. Danach ist also der  $N$ -Wert eine Funktion von  ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ , für die wir schon früher [4] die Gleichung

$$N = 1,346 + 0,515 \cdot 10^{-3} \cdot {}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne} \quad (11)$$

ermittelt haben. Drei Häufigkeitsverhältnisse, nämlich  ${}^{41}\text{K}/{}^{40}\text{K}$ ,  ${}^{39}\text{K}/{}^{40}\text{K}$  und  ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$  müssen demnach für die Bestimmung des  ${}^{41}\text{K}/{}^{40}\text{K}$ - ${}^{39}\text{K}/{}^{40}\text{K}$ - ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ -Bestrahlungsalters (kurz:  ${}^{41}\text{K}/{}^{40}\text{K}$ -Alters) gemessen werden.

## 2.2. Meteoroidengröße und Probentiefe

Die Bestimmung der Meteoroidengröße  $S$  und der Probentiefe  $D$  kann am besten durch Messung des  ${}^{41}\text{K}/{}^{40}\text{K}$ -Alters  $T$ , der  ${}^{21}\text{Ne}$ -Konzentration ( $= C_{21}$ ) und des  ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ -Verhältnisses erfolgen [2]. Dabei wird das in Abb. 2 gezeigte  $P_{21}$ - ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ -Diagramm benutzt, das die Abhängigkeit der  ${}^{21}\text{Ne}$ -Produktionsrate  $P_{21} = C_{21}/T$  und des  ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ -Verhältnisses von der Meteoroidengröße und der Probentiefe voraussagt (in das Diagramm sind Ergebnisse eingetragen, auf die wir weiter unten zurückkommen).

Das Diagramm folgt aus der räumlichen Verteilung der Edelgasnuklide im Meteoriten Grant [5, 6], aus der Anpassung eines theoretischen Modells [7, 8] für die kosmogene Nuklidproduktion in kugelförmigen Meteoroiden an die experimentellen Grant-Resultate [6] und aus dem für Grant gemessenen  ${}^{41}\text{K}/{}^{40}\text{K}$ -Alter von 695 Ma [2]. Diese Daten und Überlegungen führen zunächst zu einer Voraussage der Produktionsraten und Häufigkeitsverhältnisse als Funktion der Probentiefe und Meteoroidengröße. Die kürzeste Form der Darstellung dieser Modellvoraussagen ist das in Abb. 2 gezeigte  $P_{21}$ - ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ -Diagramm [2]. Es zeigt ein von Iso-Größen-Linien und Iso-Tiefen-Linien durchsetztes „erlaubtes“ Gebiet, das von drei Grenzkurven eingeschlossen ist. Die linke Grenzkurve stellt die  $P_{21}$ - ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ -Korrelation für Oberflächenproben von Meteoroiden variabler Größe dar, die obere gilt für Mittelpunktsproben aus Meteoroiden variabler Größe und die untere zeigt die Tiefenabhängigkeit von  $P_{21}$  und  ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$  in „unendlich großen“ Meteoroiden. Die experimentelle Bestimmung von  ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$  und  $P_{21}$  liefert somit modellabhängige Werte für die Meteoroidengröße  $S$  und die Probentiefe  $D$ .

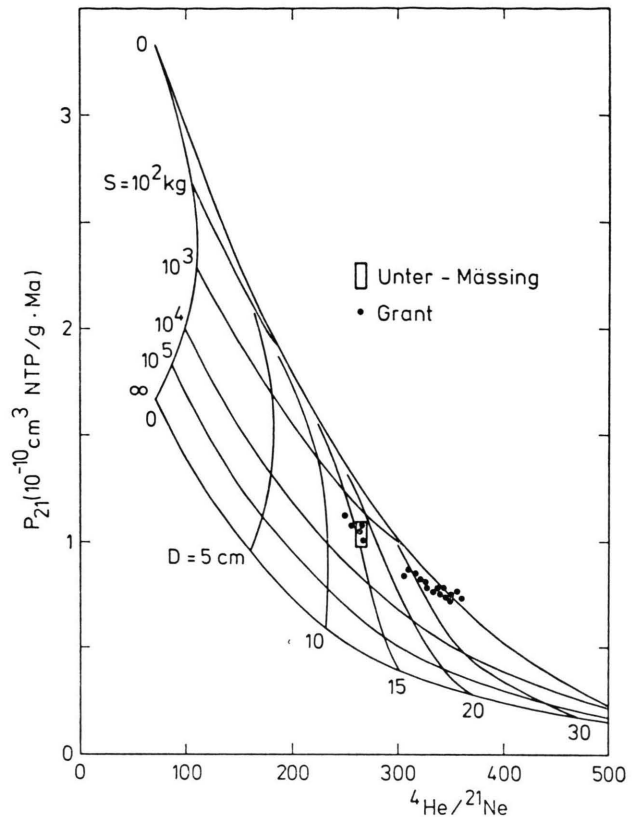


Abb. 2. Die  ${}^{21}\text{Ne}$ -Produktionsrate  $P_{21}$  und das Verhältnis  ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Meteoroidengröße  $S$  und Probentiefe  $D$  für kugelförmige Meteoroiden nach Voraussagen des Modells von Signer und Nier [6]. Bei den Berechnungen wurde ein Wert von 695 Ma [2] für das Bestrahlungsalter von Grant verwendet. Eingezeichnet sind das Ergebnis für Unter-Massing (Kasten) und die von Signer und Nier [6] gemessenen Daten für Grant (Punkte).

## 3. Messungen und Ergebnisse

### 3.1. Isotopenhäufigkeitsverhältnisse von Kalium und $M$ -Wert

Zur Kaliumextraktion dient die in Abb. 3 in ihren wesentlichen Teilen gezeigte Hochvakuumapparatur. Hier wird die Meteoritenprobe sehr langsam geschmolzen, während ein vom Ionenkollektordraht ausgehendes elektrisches Ziehfeld bis ins Innere des Tiegels durchgreift. Das sich beim Schmelzen der Probe verflüchtigende Kalium wird durch Oberflächenionisierung ionisiert, „ionenoptisch abtransportiert“, auf dem Kollektordraht gesammelt und dadurch von anderen in Eisenmeteoriten häufig vorkommenden, flüchtigen, aber schwer ionisierbaren Elementen wie z.B. S und P

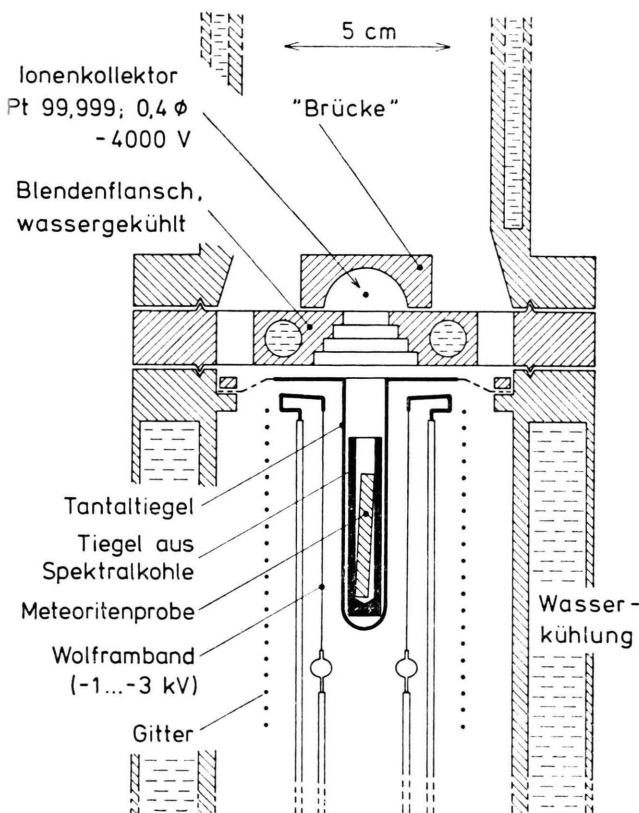


Abb. 3. Vakuumofen zur Extraktion von Kalium aus Eisenmeteoriten. Von den vier Wolframkathoden für die Elektronenbombardement-Erhitzung des Tiegelsystems sind hier nur zwei zu sehen. Maximale Ausheiztemperatur des leeren Tiegels  $\approx 1900^\circ\text{C}$  bei einem Elektronenstrom von 400 mA, 3000 V. Der Ionenkollektordraht verläuft senkrecht zur Zeichenebene und kann nach Abheben der „Brücke“ ausgebaut und in das Massenspektrometer überführt werden.

getrennt. Zur Isotopenhäufigkeitsanalyse des gesammelten Kaliums wird der Kollektordraht als Ionenquellen-Heizfaden verwendet. Nach dem Einbau in das Massenspektrometer wird das Kalium bei relativ niedriger Drahttemperatur verdampft und dabei wiederum sehr effektiv und selektiv ionisiert, so daß im Spektrometer reine Kalium-Ionenströme erhalten werden.

Die Extraktion und Isotopenhäufigkeitsanalyse des Kaliums aus dem Eisenmeteoriten Unter-Mässig ist in folgender Weise durchgeführt worden:

Um den Anteil der gewöhnlichen irdischen Komponente im Massenspektrum klein zu halten, wurden das Tiegelsystem in der Extraktionsapparatur und der Kollektor-Ionenquellen-Platindraht in der

Ionenquellenposition zunächst  $\approx 12$  bzw. 50 Stunden lang weit oberhalb der späteren Arbeitstemperatur ausgeglüht. Danach wurde ein Probentstück von 3,5 g nach einer Ätzbehandlung in den Kohletiegel der Extraktionsapparatur eingeführt und 1 Stunde lang bei einer Temperatur knapp unter der Schmelztemperatur (im Kontakt mit Kohle, d.h. bei rund  $1150^\circ\text{C}$ ) geglüht, um die oberflächliche Kaliumkontamination sowie das sich vermutlich relativ leichter verflüchtigende nicht-kosmogene Kalium aus Mikrospalten und offenen Mikroeinschlüssen abzudestillieren. Der im Massenspektrometer ausgeglühte Kollektor-Ionenquellen-Draht wurde nach erfolgter Probenvorheizung in die aus Abb. 3 ersichtliche Kollektorposition überführt.

Beim Schmelzen von Eisenmeteoritproben in dem in Abb. 3 gezeigten Kohletiegel spielt die Lösung von Kohlenstoff im Nickeleisen eine wesentliche Rolle. Das Schmelzen kann schon bei  $\approx 1200^\circ\text{C}$  erfolgen, wobei die Schmelzgeschwindigkeit aber durch Diffusionsprozesse begrenzt ist. Dadurch wird der Schmelzvorgang steuerbar. Zum Extrahieren von Kaliumionen wählen wir eine kleine Schmelzgeschwindigkeit, damit die Oberflächenionisierung des sich verflüchtigenden Kaliums möglichst ungestört und mit hoher Ausbeute erfolgt. Im Falle der Probe Unter-Mässig dauerte das Schmelzen  $3\frac{1}{2}$  Stunden. Es wurde durch Beobachtung der Probenentgasung mit dem Ionisationsmanometer verfolgt und durch Feinregelung der Elektronenbombardement-Heizung (1000 V,  $\approx 120$  mA) gesteuert. Der Druck in der Extraktionsapparatur betrug während des Schmelzens meistens  $< 2 \cdot 10^{-6}$  mbar. Am Kollektordraht lag eine Ionenziehspannung von  $-4000$  V an.

Nach dem vollständigen Schmelzen der Probe wurde der Platindraht mit dem gesammelten Kalium in das Massenspektrometer überführt. Das Spektrometer ist mit einem Sekundärelektronenvervielfacher und einem Hewlett-Packard Rechner Typ 9825 A für die automatische Datenerfassung und Auswertung ausgerüstet.

Bei massenspektrometrischen Analysen von Kalium aus Eisenmeteoriten werden zeitliche Änderungen der Massenspektren beobachtet, die auf die unvollständige Durchmischung der gewöhnlichen und kosmogenen Komponente auf dem Kollektor-Ionenquellen-Draht zurückzuführen sind [4]. Bei der Beurteilung der Messungen ist noch zu be-



achten, daß die Kaliumextraktion zwar nicht quantitativ ist, aber doch ohne wesentliche Isotopenfraktionierung erfolgt [9]. Das auf dem Kollektordraht gesammelte Kalium stellt deshalb eine Stichprobe dar, die hinsichtlich der Isotopenzusammensetzungen jeder der beiden Komponenten, nicht aber hinsichtlich des Mischungsverhältnisses der beiden Komponenten für die Meteoritenprobe repräsentativ ist. Die Isotopenfraktionierung kommt erst bei der massenspektrometrischen Analyse ins Spiel. Ihr Einfluß auf das Endergebnis bleibt aber gering, wenn die Spektren bei etwa konstanten Ionenströmen in gleichmäßigen Zeitabständen aufgenommen werden, bis die Kaliummenge auf dem Draht praktisch aufgebraucht ist. Die Bildung von Mittelwerten aus den Isotopenhäufigkeiten und  $M$ -Werten aller Einzelspektren ist dann mit einer Analyse durch Ionenstromintegration äquivalent.

Bei der Analyse des Kaliums aus dem Meteoriten Unter-Mässing wurden an zwei aufeinanderfolgenden Tagen in einer Gesamtzeit von 16 Stunden 450 Massenspektren mit einem guten Anteil an kosmogenem Kalium registriert. Die  $^{40}\text{K}$ -Häufigkeiten stiegen schnell von 4 auf über 6% an, erreichten am zweiten Tag 7% und fielen etwas ab, als der Kaliumvorrat auf dem Draht zur Neige ging (der prozentuale Anteil aller drei kosmogenen Isotope im Spektrum beträgt rund das 5fache dieser Werte, vgl. Abbildung 1). Die Isotopenfraktionierung beim Verdampfen des Kaliums zeigte sich in einem zeitlichen Anwachsen der  $M$ -Werte am Anfang und am Ende der Analyse. Die dazwischen erhaltenen Plateauwerte stimmen gut mit dem aus allen einzelnen  $M$ -Werten gebildeten Mittel überein.

Die durch Mittelung über alle Spektren gewonnenen Resultate sind in Tab. 1 zusammengefaßt.  $M_0$  ist der Mittelwert aller unkorrigierten  $M$ -Werte, die sich direkt nach Gl. (8) aus den Spektren ergeben. Die Massenabhängigkeit der Ionen-Elektronen-Konversionsausbeute im Sekun-

därelektronenvervielfacher erfordert eine Korrektur, die nach den Gleichungen

$$M = M_0 + m, \quad (12a)$$

$$m = 0,01 (^{41}\text{K}/^{40}\text{K} + a ^{39}\text{K}/^{40}\text{K}) \quad (13)$$

durchgeführt wird [4]; dabei ist angenommen, daß die Massendiskriminierung pro Masseneinheit 1% beträgt. Die Diskussion einer großen Zahl von Kaliummessungen [4] hat gezeigt, daß die Unsicherheit der  $M$ -Wert-Bestimmung durch  $\pm m$  charakterisiert werden kann und damit umso größer ist, je weniger die kosmogene Komponente zum Spektrum beiträgt. Mit

$$M = (M_0 + m) \pm m \quad (12b)$$

und den Werten aus Tab. 1 erhalten wir als Ergebnis der Kaliumanalyse  $M = 2,113 \pm 0,037$ .

### 3.2. Edelgasnuklide

Die Edelgasnuklide wurden im Labor für Isotopengeochemie und Massenspektrometrie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich gemessen. Eine 282,5 mg-Probe, die der für die Kaliumanalyse benutzten Probe benachbart gewesen war, wurde in einem Widerstands-beheizten UHV-Edelgasextraktionssofen mit Mo-Tiegel bei etwa 1800 °C vollständig verdampft. Die Edelgase wurden mit Ti- und Cu-CuO-Gettern gereinigt und das Argon durch Sorption in einer mit flüssigem Stickstoff gekühlten Zeolithfalle vom Helium und Neon abgetrennt. Helium und Neon wurden in einem Ganzmetall-Massenspektrometer analysiert, das Argon desorbiert und in einem zweiten Spektrometer gemessen. Vor und nach der Analyse des meteoritischen Gases wurden die Spektrometer durch Messung der Edelgasempfindlichkeiten geeicht. Die Apparaturen und Prozeduren sind an anderer Stelle [10] genauer beschrieben.

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse. Die Probe enthält außerordentlich hohe Edelgaskonzentrationen; nur in den Eisenmeteoriten Deep Springs und Morden wurden noch größere spallogene Edelgasgehalte gemessen [2, 11, 12]. Die Daten erfüllen die Korrelationen zwischen verschiedenen Konzentrations-

Tab. 1. Ergebnis der Isotopenhäufigkeitsanalyse von Kalium aus dem Eisenmeteoriten Unter-Mässing; Mittelwerte aus 450 Spektren.  $M_0$ ,  $m$ ,  $M$ : Siehe Gl. (8), (13) bzw. (12a).

$h(^{39}\text{K})$ %	$h(^{40}\text{K})$ %	$h(^{41}\text{K})$ %	$M_0$	$m$	$M$
73,63	6,80	19,57	2,076	0,037	2,113

Tab. 2. Konzentrationen (in  $10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ NTP/g}$ ) der Edelgasnuklide im Eisenmeteoriten Unter-Mässing.

$^3\text{He}$	$^4\text{He}$	$^{20}\text{Ne}$	$^{21}\text{Ne}$	$^{22}\text{Ne}$	$^{36}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}$
1070 $\pm 15$	3810 $\pm 40$	13,45 $\pm 0,16$	14,35 $\pm 0,18$	15,40 $\pm 0,18$	39,7 $\pm 0,9$	62,2 $\pm 1,3$	39 $\pm 4$

verhältnissen (z. B. die  $^3\text{He}/^4\text{He}$ - $^4\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Korrelation), die das normale Häufigkeitsmuster kosmogener Edelgasnuklide in Eisenmeteoriten kennzeichnen [2, 3].

### 3.3. Ergebnisse

Mit  $^4\text{He}/^{21}\text{Ne} = 265 \pm 5$  (Tab. 2) und Gl. (11) folgt  $N = 1,4827 \pm 0,0023$  und mit  $M = 2,113 \pm 0,037$  und Gl. (10) das Bestrahlungsalter  $T = 1385 \pm 75$  Ma. Die  $^{21}\text{Ne}$ -Produktionsrate ergibt sich zu  $P_{21} = C_{21}/T = (1,036 \pm 0,058) \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{NTP/g} \cdot \text{Ma}$ . Damit folgt aus Abb. 2 für die prä-atmosphärische Meteoroidenmasse  $S = 2000 \pm 500$  kg und für die Probentiefe  $D = 16,5 \pm 2$  cm.

### 4. Diskussion

Unter-Massing hat mit  $T \approx 1400$  Ma unter rund 80 bisher nach der  $^{41}\text{K}/^{40}\text{K}$ -Methode datierten Eisenmeteoriten eines der höchsten Bestrahlungsalter. Höhere Alter wurden nur für Deep Springs ( $\approx 2300$  Ma) und Clark County (1420 Ma) gemessen [2]. Es ist bemerkenswert, daß diese drei Meteorite verschiedenen chemischen Gruppen angehören, von denen jeweils nur wenige Exemplare bekannt sind: Unter-Massing gehört zur Gruppe IIC [13, 14], die nur 8 Meteorite umfaßt, Clark County zur Gruppe IIIF mit 6 Meteoriten und Deep Springs kann überhaupt keiner Gruppe zugeordnet werden [14]. Die meisten der anderen nach der  $^{41}\text{K}/^{40}\text{K}$ -Methode datierten Meteorite gehören einer der Hauptgruppen IAB, IIAB, IIIAB oder IVA an; von ihnen haben nur zwei ein  $^{41}\text{K}/^{40}\text{K}$ -Alter  $> 1000$  Ma.

Die für Unter-Massing ermittelte Meteoroidengröße  $S = 2000$  kg stimmt nach Abb. 2 mit der von Grant überein, aber es wurden von Grant etwa 500 kg und von Unter-Massing nur 80 kg gefunden [15, 16]. Möglicherweise ist Unter-Massing in der Hochatmosphäre in mehrere Teile zerbrochen, von denen nur einer gefunden wurde. Es ist jedoch zu bedenken, daß es sich bei den hier angegebenen Meteoroidengrößen um modellabhängige Werte handelt, die vielleicht nur größenordnungsmäßig richtig sind. Die von Nier u. a. [5, 6] gemessene Edelgasverteilung in Grant weist darauf hin, daß dieser Meteoroid näherungsweise als kugelförmig angesehen werden kann und daß er während der gesamten Bestrahlungszeit seine ursprüngliche Form behalten, d. h. eine einstufige Bestrahlung erfahren hat. Für Unter-Massing, von dem bisher nur

eine Probe analysiert worden ist, treffen diese Voraussetzungen für die Anwendung unserer Methodik möglicherweise weniger gut zu.

Unabhängig von diesen Einschränkungen zeigt Abb. 2 im Vergleich mit einer entsprechenden Analyse einer wesentlich größeren Anzahl von Meteoriten [2], daß sowohl Grant als auch Unter-Massing Meteorite von „normaler“, d. h. relativ kleiner Masse gewesen sein müssen. Die Meßpunkte für bekanntermaßen sehr große Meteorite liegen im  $P_{21}$ - $^4\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Diagramm stets deutlich unter den Meßpunkten für Grant und Unter-Massing. Der Meteorit Unter-Massing kann deshalb nicht ein in der Hochatmosphäre von einem sehr großen Meteoriten abgespaltenes Fragment sein.

Da Unter-Massing nur 60 km vom Nördlinger Ries entfernt gefunden worden ist, lag es nahe zu fragen, ob er ein vom Impaktprojektil des Rieskraters abgespaltenes Fragment sein könnte [16]. Ein solcher Zusammenhang kann nun ausgeschlossen werden. Er ist allerdings auch deshalb unwahrscheinlich, weil der von Buchwald [15] für die Oberfläche von Unter-Massing abgeschätzte verwitterungsbedingte Metallverlust von  $< 0,5$  mm auf eine Lagerungszeit im Erdboden hinweist, die erheblich unter dem Alter von 15 Ma [17, 18] des Riesereignisses liegen dürfte. Es sind hier ferner die neueren Analysen von Gesteinsmaterial aus dem Rieskrater zu erwähnen [19, 20], die keine Hinweise dafür erbracht haben, daß das Riesprojektil ein Eisenmeteorit gewesen sein könnte.

Der fragliche Zusammenhang könnte zusätzlich durch Bestimmung von geeigneten kosmogenen Radionukliden ( $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ) in Unter-Massing geprüft werden; vielleicht würde sich dabei ergeben, daß das terrestrische Alter [21–24] von Unter-Massing weit unter 15 Ma liegt. Viele Eisenmeteorite haben ein terrestrisches Alter von einigen  $10^5$  a, und einige haben der Korrosion mehr als 1 Ma (Tamarugal 2,7 Ma) widerstanden [24].

### Anerkennungen

Herr Prof. Dr. E. Preuß hat diese Untersuchung angeregt. Durch seine freundliche Vermittlung hat die Naturhistorische Gesellschaft Nürnberg das Probenmaterial zur Verfügung gestellt, wofür wir sehr herzlich danken. Herrn Prof. Dr. H. Hintenberger danken wir für zahlreiche Ratschläge und Diskussionen, von denen wir in langjähriger Zusammenarbeit profitieren konnten.

- [1] H. Voshage, *Earth Planet. Sci. Lett.* **40**, 83 (1978).
- [2] H. Voshage u. H. Feldmann, *Earth Planet. Sci. Lett.* **45**, 293 (1979).
- [3] H. Voshage u. H. Feldmann, *Earth Planet. Sci. Lett.* **39**, 25 (1978).
- [4] H. Voshage, *Z. Naturforsch.* **22a**, 477 (1967).
- [5] J. H. Hoffman u. A. O. Nier, *Phys. Rev.* **112**, 2112 (1958).
- [6] P. Signer u. A. O. Nier, *J. Geophys. Res.* **65**, 2947 (1960).
- [7] G. R. Martin, *Geochim. Cosmochim. Acta* **3**, 288 (1953).
- [8] K. H. Ebert u. H. Wänke, *Z. Naturforsch.* **12a**, 766 (1957).
- [9] H. Sarkar, Dissertation, Mainz 1965.
- [10] L. Schultz, H. Funk, L. Nyquist u. P. Signer, *Geochim. Cosmochim. Acta* **35**, 77 (1971).
- [11] P. Signer u. A. O. Nier, in: *Researches on Meteorites*, C. B. Moore, ed., John Wiley, New York 1962, S. 7.
- [12] K. F. Chakett, P. Reasbeck u. E. J. Wilson, *Geochim. Cosmochim. Acta* **3**, 261 (1953).
- [13] J. T. Wasson, *Geochim. Cosmochim. Acta* **33**, 859 (1969).
- [14] J. T. Wasson, *Meteorites*, Springer-Verlag, Berlin 1974.
- [15] V. F. Buchwald, *Handbook of Iron Meteorites*, University of California Press, Los Angeles 1975.
- [16] E. Preuß, *Jahresmitteilungen der Naturhistorischen Gesellschaft Nürnberg* 1976, S. 49.
- [17] W. Gentner, B. Kleinmann u. G. A. Wagner, *Earth Planet. Sci. Lett.* **2**, 83 (1967).
- [18] W. Gentner, D. Storzer u. G. A. Wagner, *Naturwiss.* **56**, 255 (1969).
- [19] A. El Goresy u. E. C. T. Chao, *Earth Planet. Sci. Lett.* **31**, 330 (1976).
- [20] J. W. Morgan, M. J. Janssens, J. Hertogen, J. Gros u. H. Takahashi, *Geochim. Cosmochim. Acta* **43**, 803 (1979).
- [21] E. Vilcsek u. H. Wänke, in *Radioactive Dating* (International Atomic Energy Agency, Wien, 1963), S. 381.
- [22] M. Honda u. J. A. Arnold, *Science* **143**, 203 (1964).
- [23] H. Wänke, *Fortschr. Chem. Forsch.* **7**, 322 (1966).
- [24] C. Chang u. H. Wänke, in *Meteorite Research*, ed. P. M. Millmann (D. Reidel, Dordrecht 1969), S. 397.