

**Radiochemische Analyse langlebiger kosmogener
Radionuklide in Marsmeteoriten und Chondriten:
Wirkungsquerschnitte, Produktionsraten und
Modellrechnungen**

Inaugural – Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität zu Köln.

vorgelegt von
Thomas Bastian
aus Köln

Druck: Graphische Betriebe, Forschungszentrum Jülich

2004

Berichtersteller: Prof. Dr. Dr. h.c. S. M. Qaim
Prof. Dr. H. Palme

Tag der mündlichen Prüfung: 10.12.2003

Meinem Vater
(05.12.1940 - 18.05.2001)

Kurzfassung

In den Marsmeteoriten ALHA 77005, ALH 84001, Chassigny, EETA 79001A, Governador Valadares, Lafayette, Nakhla, Sayh al Uhaymir 005, Shergotty und Zagami sowie den Chondriten Grüneberg, Morávka, Naragh und Neuschwanstein wurden die Konzentrationen der langlebigen kosmogenen Radionuklide ^{10}Be , ^{26}Al und ^{53}Mn gemessen.

Die Analyse fand mittels ultrasensitiver Beschleuniger-Massenspektrometrie (**Accelerator-Mass-Spectrometry**: AMS) statt. Dazu mussten die Elemente Al, Be, Ca, Fe, Mn und Ni mittels eines radiochemischen Trennungsgangs separiert werden. Daraufhin wurden hochreine Oxid-, Hydrid- und Fluorid-Proben für die AMS-Messung präpariert und in den Beschleunigerlabors der TU-München und der ETH Zürich gemessen.

Darüber hinaus wurden die Konzentrationen der kosmogenen Anteile der Edelgase ^3He , ^{21}Ne , ^{22}Ne , ^{36}Ar , ^{38}Ar , ^{80}Kr und ^{83}Kr zusammengestellt, die im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhabens am MPI Mainz an den gleichen Proben analysiert und auf ihren kosmogenen Anteil korrigiert wurden. Dadurch wurde ein umfassender same-sample-Datensatz mit teilweise erstmaligen Daten für kosmogene Nuklide in den untersuchten zehn Marsmeteoriten geschaffen, der in diesem Umfang bisher nicht erhältlich war.

Zur Interpretation der gemessenen Radionuklidkonzentrationen diente das von Leya et al. [LEY00b] entwickelte physikalische Modell, welches auf der Basis nuklearer Daten die Produktionsrate kosmogener Nuklide in Meteoroiden berechnet.

Mit Hilfe der analysierten Daten und der Modellrechnungen war es möglich, die Bestrahlungsgeschichten detailliert zu entschlüsseln. Dabei konnten für ALH 84001, Chassigny, EETA 79001A, Governador Valadares, Nakhla, Sayh al Uhaymir 005 und Shergotty neben Bestrahlungsaltern auch Einschränkungen der präatmosphärischen Größe vorgenommen werden. Auch die Angabe einer Abschirmtiefe war möglich. In den Proben von ALHA 77005, Lafayette und Zagami wurden Nuklid-Überproduktionen gefunden, die mit großer Wahrscheinlichkeit durch SCR (**Solar-Cosmic-Rays**) hervorgerufen wurden. In Lafayette wurden SCR-Effekte zum ersten Mal beobachtet. In EETA 79001A und Shergotty wurden erhöhte $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnisse gefunden, die, wegen fehlender SCR-Effekte bei den Radionuklid-Konzentrationen, ein Indiz auf eine Vorbestrahlung tief unter der Oberfläche ($> 3\text{ m}$) des Mars sind. Darüber hinaus konnte für das terrestrische Alter von EETA 79001A eine obere Grenze von $T_{\text{terr}} \leq 250\text{ ka}$ ermittelt werden.

Weiterhin konnte die nukleare Datenbasis physikalischer Modelle für Eisen- und Steineisen-Meteoriten erweitert werden. Es wurden experimentelle Produktionsraten ermittelt und mittels Monte-Carlo-Codes entfaltete Neutronen-Anregungsfunktionen zusammengestellt. Dabei stand die Produktion der langlebigen Radionuklide ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca und ^{60}Fe aus $^{\text{nat}}\text{Fe}$ und $^{\text{nat}}\text{Ni}$ -Targets im Vordergrund.

Der Trennungsgang zur Separation der kosmogenen Radionuklide ^{41}Ca und ^{59}Ni konnte wesentlich vereinfacht werden.

Abstract

The concentrations of the long-lived cosmogenic nuclides ^{10}Be , ^{26}Al and ^{53}Mn were measured in the Martian Meteorites ALHA 77005, ALH 84001, Chassigny, EETA79001A, Governador Valadares, Lafayette, Nakhla, Sayh al Uhaymir 005, Shergotty and Zagami as well as in the chondrites Grüneberg, Morávka, Naragh and Neuschwanstein.

The analysis was done by means of ultra sensitive Accelerator-Mass-Spectrometry (AMS). For that purpose the elements Al, Be, Ca, Fe, Mn and Ni had to be separated by radiochemical separation techniques. Thereafter ultra pure oxide-, hydride- and fluoride-samples were prepared and measured at accelerator facilities of the ETH Zurich/PSI and the TU-München.

In addition the concentrations of the cosmogenic noble gases ^3He , ^{20}Ne , ^{21}Ne , ^{22}Ne , ^{36}Ar , ^{38}Ar , ^{80}Kr and ^{83}Kr were compiled. These concentrations were measured in the same samples at the MPI Mainz within the framework of a common research project. Thus it was possible to create a comprehensive same-sample-dataset with several new data for the cosmogenic nuclides in the ten investigated Martian Meteorites, which hitherto was not available, on such a scale.

For the interpretation of the measured radionuclide concentrations the physical model by Leya et al. [LEY00b] was used. It calculates the production rates of cosmogenic nuclides in meteorites.

By means of the analysed data and the model calculations it was possible to decipher the irradiation histories in detail. The exposure age for ALH 84001, Chassigny, EETA 79001A, Governador Valadares, Nakhla, Sayh al Uhaymir 005 and Shergotty was determined and constraints regarding the preatmospheric size could be considered. Also a statement of the shielding depth was possible. In the samples of ALHA 77005, Lafayette and Zagami nuclide overproductions were found which are with utmost probability caused by SCR (Solar-Cosmic-Rays). In Lafayette SCR-effects were observed for the first time. In EETA 79001A and Shergotty increased $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -ratios were found, which are a sign of a pre-irradiation deep below the surface ($> 3\text{ m}$) of Mars, because of the lack of SCR-Effects in the radionuclide concentrations. Moreover for EETA 79001A an upper limit of the terrestrial age of 250 ka could be determined.

Further on the nuclear data basis of physical models for iron and stony-iron meteorites could be expanded. Experimental production rates were measured and by means of Monte-Carlo-Codes unfolded neutron-excitation functions were compiled. Thereby the production of the long-lived radionuclides ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca and ^{60}Fe from $^{\text{nat}}\text{Fe}$ and $^{\text{nat}}\text{Ni}$ was in the foreground.

The separation scheme for the cosmogenic nuclides ^{41}Ca and ^{59}Ni could be considerably simplified.

Inhalt

1. Einleitung	8
1.1 Vorbetrachtung	8
1.2 Meteorite.....	10
1.2.1 Die Alter eines Meteoriten.....	10
1.2.2 Die Klassifizierung von Meteoriten.....	12
1.3 Kosmische Strahlung	15
1.4 Kosmogene Nuklide.....	17
1.5 Kernreaktionen	19
1.5.1 Reaktions-Mechanismen	19
1.5.2 Wirkungsquerschnitt und Produktionsrate	20
1.6 Modelle zur Produktion von kosmogenen Nukliden	23
1.6.1 Empirische und semiempirische Modelle.....	23
1.6.2 Physikalische Modelle.....	24
2. Aufgabenstellung	28
3. Experimentelle Methoden	29
3.1 Übersicht.....	29
3.1.1 Allgemeines zur Analyse der Proben.....	29
3.2 Aufarbeitung von Meteoritenproben.....	32
3.3 Aufarbeitung von Dicktargetfolien	33
3.3.2 Aufarbeitung der Fe-Folien	34
3.3.3 Aufarbeitung der Ni-Folien	34
3.4 Präparation der AMS-Proben.....	35
3.4.1 BeO	35
3.4.2 Al ₂ O ₃	36
3.4.3 CaO	36
3.4.4 CaF ₂	36
3.4.5 MnO ₂	37
3.4.6 Fe ₂ O ₃	38
3.5 AMS-Messungen	39
3.5.1 Messprinzip der AMS.....	39
3.5.2 AMS-Anlage der ETH Zürich	41
3.5.3 AMS-Anlage der TU-München.....	43
3.6 γ - γ -Koinzidenzspektroskopie.....	46
3.6.1 Durchführung der Messung	46
3.7 Prompt-Gamma-Ray-Activation-Analysis (PGAA)	49

3.8	Berechnung der Ergebnisse.....	51
3.8.1	Berechnung der spezifischen Aktivität bei AMS-Messungen	51
3.8.2	Berechnung der spezifischen Aktivität bei Koinzidenz-Messungen....	53
3.8.3	Berechnung experimentell bestimmter Produktionsraten	55
3.9	Qualitätskontrolle	56
3.10	Fehlerbetrachtung	57
3.10.1	Fehler in der spezifischen Aktivität bei den Meteoritenanalysen	57
3.10.2	Fehler der γ - γ -Koinzidenzanalyse	58
3.10.3	Fehler in den Produktionsraten	59
4.	Ergebnisse und Diskussion	60
4.1	Meteorite	60
4.1.1	Marsmeteorite	61
4.1.2	Zusammenfassung der Ergebnisse für Marsmeteorite.....	105
4.1.3	Chondrite.....	108
4.1.4	Zusammenfassung der Ergebnisse für Chondrite	125
4.2	Experimentell bestimmte Produktionsraten	126
4.2.1	Eisen-Targets	128
4.2.2	Nickel-Targets	132
5.	Zusammenfassung	139
6.	Literatur	143
Anhang		161
A.	Daten und Ergebnisse der Meteoritenanalysen	161
B.	Daten und Ergebnisse der Produktionsraten-Messungen	172
Danksagung		174
Erklärung		177
Lebenslauf		179

1. Einleitung

1.1 Vorbetrachtung

Diese Arbeit soll einen Beitrag zum Verständnis der Bestrahlungsgeschichte von Meteoriten – insbesondere Marsmeteoriten – liefern und die Datenbasis für die zur Diskussion der Bestrahlungsgeschichte notwendigen physikalischen Modelle erweitern. Zunächst soll auf die wichtigsten Konzepte kurz eingegangen werden.

Der interplanetare Raum wird von hochenergetischen Teilchen durchstrahlt. Diese wird auch kosmische Strahlung genannt und besteht im Wesentlichen aus hochenergetischen Protonen und α -Teilchen. Materie wechselwirkt mit dieser Strahlung. Ein Teil dieser Wechselwirkungen sind Kernreaktionen.

Durch Kernreaktionen, die die kosmische Strahlung auslöst, finden Elementumwandlungen statt. Zwei Produkte dieser Kernumwandlungen sind mit hoher Empfindlichkeit nachweisbar: Radionuklide und Edelgase. Diese Produkte werden als kosmogene Nuklide bezeichnet. Die quantitative Bestimmung der Konzentrationen kosmogener Nuklide erlaubt einen Einblick in die Bestrahlungsgeschichte der bestrahlten Körper. Man kann die Dauer der Bestrahlung, die auch als Bestrahlungsalter bezeichnet wird, feststellen. Ab dem Zeitpunkt, zu dem sich derartig bestrahlte Materie auf der Erde befindet (nach dem Fall), ist sie durch die Atmosphäre und das Magnetfeld der Erde vor der kosmischen Strahlung weitgehend abgeschirmt. Dadurch werden kosmogene Nuklide nicht mehr gebildet. Durch den radioaktiven Zerfall kosmogener Radionuklide verringert sich deren Konzentration, wodurch das terrestrische Alter zugänglich wird.

Durch die Kernreaktionen, die die kosmische Strahlung auslöst, können Sekundärteilchen entstehen, die ihrerseits wiederum Kernreaktionen auslösen können. Die Bildung der Sekundärteilchen ist in erster Linie von zwei Parametern abhängig: von der Größe eines Körpers, der bestrahlt wird, und von der Lage der Probe darin. Unmittelbar an der Oberfläche eines bestrahlten Körpers haben Primärteilchen kaum Gelegenheit Kernreaktionen auszulösen, weswegen dort wenige Sekundärteilchen gebildet werden.

Durch die Größen- und Tiefen-Abhängigkeit der Nuklidproduktion ist prinzipiell die Bestimmung der Größe des bestrahlten Objekts möglich. Außerdem lässt sich die Abschirmtiefe (d.h. die Tiefe der Probe im bestrahlten Körper) rekonstruieren. In manchen Fällen ist es sogar möglich, eine Änderung der Größe des bestrahlten Objekts zu datieren. Solche Größenänderungen werden durch Kollisionen zweier Körper im All hervorgerufen. In einem solchen Fall spricht man von einer komplexen Bestrahlungsgeschichte. Solche Ereignisse sind nur dann deutlich sichtbar, wenn vor der Kollision die Bestrahlung aus einer Hemisphäre (2π -Bestrahlung) und nach der Kollision aus beiden Hemisphären (4π -Bestrahlung) stattgefunden hat.

Schließlich ist die Produktionsrate kosmogener Nuklide, d.h. die pro Zeiteinheit produzierte Menge bzw. bei Radionukliden deren Sättigungskonzentration, von der Teilchenflussdichte der kosmischen Strahlung abhängig. Dadurch lassen sich auch Aussagen über diese Flussdichte gewinnen.

Alle genannten Daten – Bestrahlungsalter, terrestrisches Alter, Daten für die Beschreibung komplexer Bestrahlungsgeschichten sowie die Größe der bestrahlten Objekte und Abschirmtiefen von Proben darin – sind für Marsmeteorite besonders interessant, weil Marsmeteorite die einzigen Meteorite sind, von denen man überzeugt ist, dass sie von einem Planeten abstammen. Damit erlaubt die Untersuchung kosmogener Nuklide in Marsmeteoriten eine Untersuchung von Transportprozessen im Sonnensystem. Für die Untersuchung von Ejektionsereignissen, Transportphänomenen und Fallereignissen können durch die Messung kosmogener Nuklide konkrete Aussagen und/oder einschränkende Bedingungen gewonnen werden. Im Falle der Marsmeteorite sind dies Daten für den Materieaustausch zwischen zwei Planeten.

Grundlage für derartige Untersuchungen sind Modelle, die theoretische Aussagen über Produktionsraten kosmogener Nuklide ermöglichen. Der Vergleich von Analysendaten mit Vorhersagen geeigneter Modelle erlaubt die Gewinnung der angesprochenen Informationen. Die Weiterentwicklung derartiger Modellrechnungen ist daher mit der Untersuchung kosmogener Nuklide eng verbunden.

1.2 Meteorite

Unter einem Meteoriten versteht man ein extraterrestrisches Objekt, welches sich auf einer heliozentrischen, die Erdumlaufbahn schneidenden Bahn bewegt hat, von der Erde eingefangen wurde und den Fall auf die Erdoberfläche, trotz der auftretenden, durch die Erdatmosphäre bedingten, Ablation, überstanden hat [WET75].

Von Meteoriten zu unterscheiden sind Meteore und Meteoroiden. Der Begriff „Meteor“ bezeichnet im eigentlichen Sinne kein materielles Objekt, sondern lediglich die Leuchterscheinung, die ein Objekt in der Erdatmosphäre durch Aufglühen bzw. Stoßionisation der Luft-Teilchen hervorruft. Ein Meteoroid ist ein „Meteorit, bevor er auf die Erde gefallen ist“. Die Meteoroiden als bis zu 100 m große [MCS87] Körper stammen ihrerseits von einem Meteoriten-Mutterkörper ab. Aus dem Meteoriten-Mutterkörper werden Meteoroiden durch kosmische Kollisionen abgesprengt. Im Falle der Marsmeteorite ist dieser Mutterkörper der Planet Mars. Der ursprünglich aus dem Meteoriten-Mutterkörper herausgeschlagene Meteoroid kann auf seiner Bahn zur Erde weiteren Kollisionen unterliegen, die zur Erosion des Meteoroiden und damit zur Verringerung seiner Größe führen.

Vor diesem Hintergrund sind die Festlegung verschiedener Alter und die Klassifikation von Meteoriten für die Schlussfolgerungen dieser Arbeit wichtig und werden im Folgenden kurz diskutiert.

1.2.1 Die Alter eines Meteoriten

Der in Abbildung 1.1 dargestellte kurze Abriss der Entwicklung von Meteoritenmaterie macht die Festlegung verschiedener Alter sinnvoll. Sie beziehen sich auf Entwicklungsabschnitte eines Meteoriten. Die Entwicklung beginnt mit der Bildung aller Materie des Sonnensystems durch die Nukleosynthese und setzt sich mit der Entstehung des solaren Nebels, der Akkretion von Mutterkörpern und der Bildung von Meteoroiden durch Einschläge auf dem Mutterkörper fort. Die Meteoroiden können, wenn sie den Erdborbit kreuzen, als Meteorite auf die Erde fallen und (hoffentlich) im Labor untersucht werden. Es wird ersichtlich, wie sehr die Entwicklung meteoritischer Materie mit der des gesamten Sonnensystems verbunden ist.

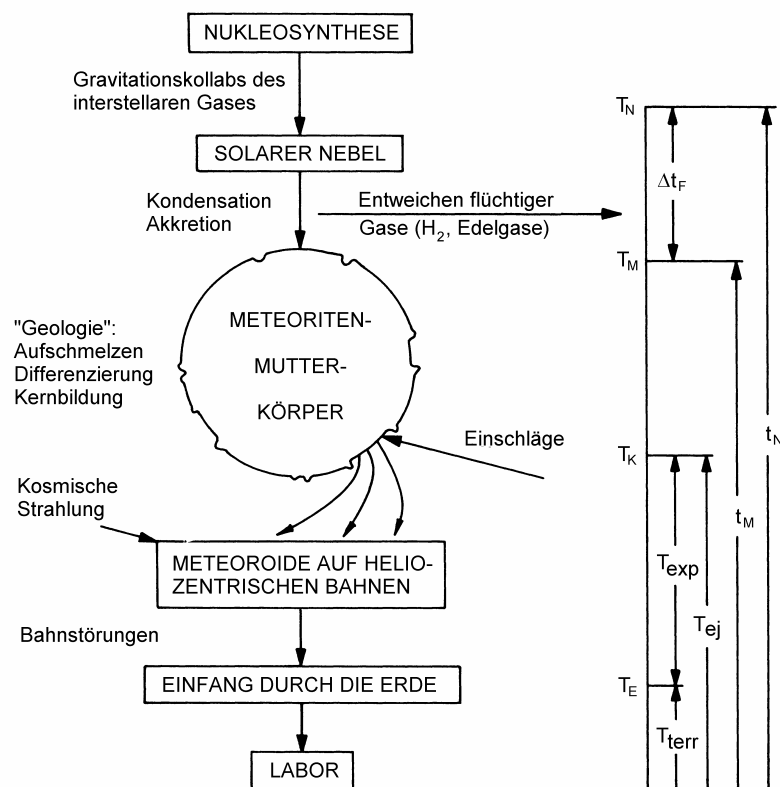


Abbildung 1.1: Darstellung der Entwicklungsgeschichte eines Meteoriten nach [VOS68]. Erläuterung siehe Text.

Auf der rechten Seite von Abbildung 1.1 sind verschiedene Zeitpunkte und -Abschnitte gekennzeichnet:

T_N bezeichnet den Zeitpunkt der Nukleosynthese, also den Zeitpunkt zu dem die Elemente des Sonnensystems produziert wurden. Das Alter t_N ist damit das Alter der Materie des Sonnensystems. Dieses Alter ist über U-Pb-Alter von CAI's (Calcium-Aluminium-Rich Inclusions) undifferenzierter Meteorite zugänglich [TIL88]. Undifferenzierte Meteorite bestehen aus Materie, die nicht durch Schmelzprozesse verändert wurde (vergleiche Kapitel 1.2.2).

T_M ist der Zeitpunkt zu dem der Mutterkörper eines Meteoriten durch Akkretion von Materie aus dem solaren Nebel entstanden ist. t_M ist daher das Entstehungsalter des Meteoriten als Gestein. Die Zeitdifferenz zwischen T_N und T_M , Δt_F , bezeichnet man auch als „Formationszeitspanne“ [HEI88], d.h. die Zeitspanne, die benötigt wurde, um aus dem solaren Nebel feste Körper zu akkretieren. Die Formationsalter können z.B. über den Zerfall des extinkten ¹²⁹I und der damit einhergehenden Isotopenanomalie im ¹²⁹Xe bestimmt werden (Iod-Xenon-Alter).

T_K ist der Zeitpunkt, zu dem ein Meteoroid aus dem Mutterkörper durch ein Impaktereignis abgesprengt wurde. T_{exp} ist demnach das Bestrahlungsalter, d.h. die Zeitspanne innerhalb derer der Meteoroid dem Bombardement hochenergetischer Partikel der kosmischen Strahlung ausgesetzt war. Während dieser Zeit entstehen die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten langlebigen kosmogenen Radionuklide, weswegen das Hauptaugenmerk auf diese Zeit gerichtet sein wird. Kosmische

Bestrahlungsalter liegen bei den meisten H- und L-Chondriten unter 40 Ma, Eisenmeteorite erreichen Bestrahlungsalter bis zu 1 Ga [CAF88]. Dieser Unterschied wird durch die höhere Widerstandsfähigkeit von Eisenmeteoroiden gegenüber Erosion und Impaktereignissen im Weltraum erklärt.

Wird ein Meteoroid durch eine Kollision aus Materie gebildet, die sich weniger als etwa 5 m unter der Oberfläche des Mutterkörpers befand, so ist die Materie des Meteoroiden schon auf dem Mutterkörper bestrahlt worden. Man spricht in diesem Fall von einer komplexen Bestrahlungsgeschichte: zuerst findet eine Bestrahlung aus einer Hemisphäre durch kosmische Strahlung (2π -Bestrahlung) statt. Nach der Kollision wird der Meteoroid dann von beiden Hemisphären bestrahlt (4π -Bestrahlung).

T_E schließlich bezeichnet den Fallzeitpunkt und T_{terr} das terrestrische Alter eines Meteoriten. Man unterscheidet zwischen Meteoritenfällen und Meteoritenfunden. Ein Meteoritenfall ist ein beobachteter Fall eines Meteoriten, ein Meteoritenfund das Auffinden eines zuvor unbeobachtet gefallenen Meteoriten. Bei einem Meteoritenfall ist das terrestrische Alter gleich null, bei Funden hängen die maximal erreichbaren Alter vom Typ des Meteoriten ab. Steinmeteorite unterliegen starken irdischen Erosionsprozessen. In heißen Wüsten erreichen sie terrestrische Alter von bis zu etwa 50 ka, in Eiswüsten bis zu etwa 1 Ma. Eisenmeteorite sind gegenüber Erosionsprozessen widerstandsfähiger. Sie können deshalb mehrere Ma lang auf der Erdoberfläche verweilen (siehe z.B. [NIS87]) bis sie gefunden werden.

Im Falle einer nicht komplexen Bestrahlungsgeschichte kann das Ejektionsereignis datiert werden, in dem man die Summe aus Bestrahlungsalter T_{exp} und terrestrischen Alter T_{terr} bildet. Das damit erhaltene Alter T_{ej} wird Ejektionsalter genannt.

1.2.2 Die Klassifizierung von Meteoriten

Meteorite lassen sich prinzipiell in zwei Gruppen einteilen: differenzierte und undifferenzierte Meteorite. Ein Differentiationsprozess wird durch partielles oder vollständiges Aufschmelzen des Meteoritenmutterkörpers ausgelöst. Das bedeutet, dass differenzierte Meteorite von Mutterkörpern stammen, die groß genug sind, dass die in ihnen durch radioaktiven Zerfall und Impaktenergie entstehende Wärme zum Aufschmelzen des Körpers geführt hat. Zu den undifferenzierten Meteoriten gehören sämtliche Chondrite. In ihnen sind noch die primären Konstituenten der Akkretion aus dem solaren Nebel, wie z.B. Chondren (nach denen sie benannt sind) CAI's oder IDP (Interplanetary Dust Particles) mehr oder weniger unverändert enthalten.

Zu den differenzierten Meteoriten gehören die Eisenmeteorite, die Stein-Eisenmeteorite und die Achondrite, zu denen unter anderem die Mondmeteorite, die HED-Meteorite (benannt nach Howarditen, Eucriten und Diogeniten, wahrscheinlich von dem Asteroiden 4Vesta stammend) und auch die SNC-Meteorite zählen. Sie unterlagen in ihrer Geschichte mindestens einem partiellen Aufschmelz-Prozess. Eine verbreitete Klassifizierung der Meteorite zeigt Abbildung 1.2 nach [BIS03].

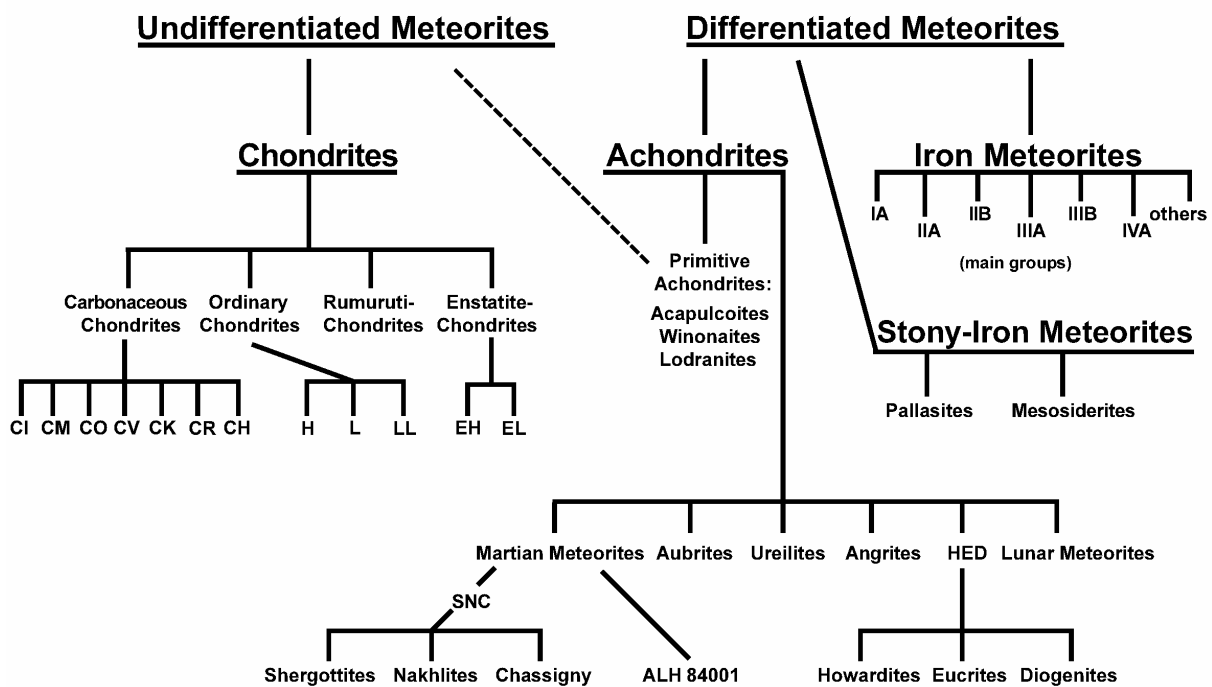


Abbildung 1.2: Klassifikation der Meteorite nach A. Bischoff [BIS03].

Für die Herkunft der SNC-Meteorite (Abbildung 1.2) gibt es zwar keinen direkten Beweis, da im Gegensatz zu den Mondmeteoriten, Vergleichsmaterial fehlt. Eine Reihe von Hinweisen lässt jedoch den Mars mit großer Sicherheit als den Mutterkörper der SNC-Meteorite und des Meteoriten ALH 84001 erscheinen.

Ein starkes Indiz dafür ist, dass alle SNC-Meteorite sehr junge Kristallisationsalter ($\approx 1,3$ Ga) besitzen. Nur Körper mit mindestens der Größe des Mars besitzen eine genügende Wärmekapazität und einen genügenden Vorrat an radioaktiven Elementen, dass deren Materie so lange nach der Akkretion aufgeschmolzen werden konnte [MCS87].

Weiterhin liegen die Sauerstoffisotopenverhältnisse aller Proben der SNC-Meteorite alle auf einer sogenannten Fraktionierungslinie. Sauerstoff hat drei stabile Isotope: ^{16}O , ^{17}O und ^{18}O . $\delta^{18}\text{O}$ ist das $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ - Verhältnis des Meteoriten relativ zu einem terrestrischen Standard (SMOW für **S**tandard **M**ean **O**cean **W**ater). $\delta^{18}\text{O}$ wird als Abweichung von SMOW angegeben. Entsprechendes gilt für $\delta^{17}\text{O}$. Weil die Massendifferenz von ^{18}O zu ^{16}O doppelt so groß ist, wie die von ^{17}O zu ^{16}O , sind auch Isotopieeffekte bei Schmelz-, Verdampfungs- und Kondensations-Prozessen etc. für ^{18}O etwa doppelt so groß wie für ^{17}O . Trägt man in einem Diagramm $\delta^{17}\text{O}$ gegen $\delta^{18}\text{O}$ auf liegen Proben eines Planeten oder Planetoiden deshalb auf einer Geraden mit der Steigung 1/2. Dies gilt für alle Proben, die von einem Körper stammen, auf dem Differentiationsprozesse stattgefunden haben. Proben von HED-Meteoriten (Mutterkörper ist wahrscheinlich der Asteroid 4Vesta) liegen auf einer solchen Geraden, die parallel zu der terrestrischer Proben verläuft. Proben von SNC-Meteoriten (benannt nach: **S**hergotty, **N**akhla und **C**hassigny) und ALH 84001 liegen auf einer geringfügig über der terrestrischen Fraktionierungslinie liegenden parallelen Linie, auf der auch von den Viking-Landern (1976 auf dem Mars gelandet) gemessene Proben liegen.

Der überzeugendste Hinweis für die Herkunft der SNC-Meteorite vom Mars findet sich aber in Gasblasen, die sich in Glaseinschlüssen des Meteoriten EETA 79001 befinden. Die Konzentrationen und Isotopenverhältnisse der Gas-Bestandteile in den Gaseinschlüssen gleichen im Rahmen der Messfehler über 8 Größenordnungen (!) denen, die die Viking-Sonden in der heutigen Marsatmosphäre gemessen haben (Abbildung 1.3).

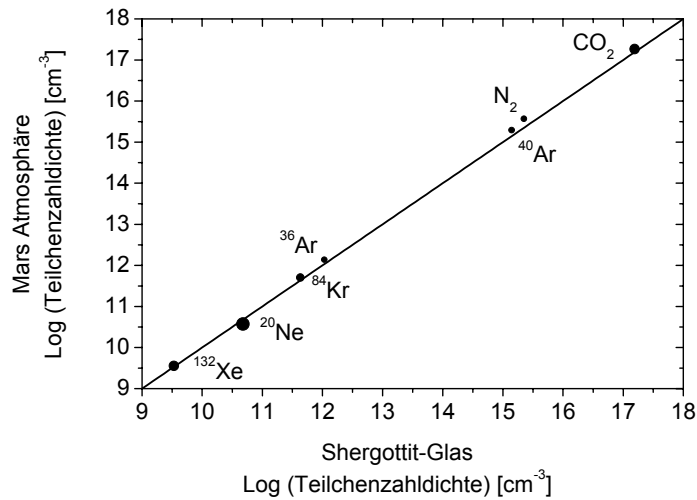


Abbildung 1.3: Vergleich zwischen Marsatmosphäre, ermittelt aus Viking-Daten und eingeschlossenen Gasen aus Glas des Shergottiten EETA 79001 (nach [PEP85]).

1.3 Kosmische Strahlung

Neben einem kosmischen Strahlungshintergrund, der aus Mikrowellen- und Röntgenstrahlung besteht, existiert kosmische Teilchenstrahlung. Aufgrund ihrer spektralen Verteilung und ihrer Herkunft kann man drei Komponenten unterscheiden: den Sonnenwind, die solare kosmische Strahlung (SCR – **S**olar **C**osmic **R**ays) und die galaktische kosmische Strahlung (GCR – **G**alactic **C**osmic **R**ays).

Sonnenwindpartikel bestehen aus niederenergetischen Teilchen ($E_{\text{kin}} \approx 1 \text{ keV}$) solarer Zusammensetzung und haben ihren Ursprung in der Sonne. Sie modulieren die GCR-Flussdichte, spielen ansonsten für die weitere Betrachtung jedoch keine Rolle, da sie keine Kernreaktionen auslösen können.

Die solare kosmische Strahlung hat ihren Ursprung in der Sonne und wird dort in relativ kurzzeitigen Ereignissen emittiert, den SPE's (**S**olar **P**article **E**vents). Die Häufigkeit dieser Eruptionen variiert mit einem 11-Jahres Zyklus der Sonne, der mit Schwankungen des Magnetfelds der Sonne korreliert ist. Der maximale SCR-Fluss tritt zu Zeiten maximaler Sonnenaktivität auf. Die mittlere Zusammensetzung der SCR wird von Goswami [GOS88] zu 98 % Protonen, 2 % α -Teilchen und einem verschwindend geringen Anteil schwerer Kerne angegeben.

Das Spektrum der solaren Komponente erreicht wesentlich höhere Flussdichten, allerdings nicht die hohe Energie der galaktischen Komponente (Abbildung 1.4). In sehr geringen Tiefen extraterrestrischer Materie führt die SCR daher zu einer sehr starken Produktion von kosmogenen Nukliden. Ab einer Tiefe von nur wenigen cm ist diese Komponente jedoch vollständig absorbiert und kann nicht mehr zur Produktion beitragen. Dies wurde z.B. anhand der Untersuchung kosmogener Nuklide im Material der Mondoberfläche nachgewiesen [RED83], [RED91]. Daher sind in Meteoriten die Spuren dieser Komponente nur dann nachweisbar, wenn die Ablation in der Erdatmosphäre Teile dieser Schicht nicht abträgt. Durch SCR hervorgerufene Effekte können bei den Marsmeteoriten recht häufig zu einer Erklärung von Radionuclid-Überproduktionen herangezogen werden.

Die galaktische Komponente hat ihren Entstehungsort außerhalb des Sonnensystems und ist im Gegensatz zur SCR isotrop. Sie wird vermutlich in sehr aktiven Gebieten, wie z.B. bei Supernova-Explosionen, γ -Strahlenausbrüchen, in aktiven Galaxienkernen (Seyfert-Galaxien) sowie in der Nähe schwarzer Löcher, Pulsare und in Quasaren erzeugt. Das Spektrum der galaktischen kosmischen Strahlung besteht aus etwa 87 % Protonen, 12 % α -Teilchen und etwa 1 % schwerer Kerne. Teilchen mit einer Massenzahl $A \leq 4$ haben eine ungefähr gleiche Energieverteilung mit Energien bis zu 10^{20} eV .

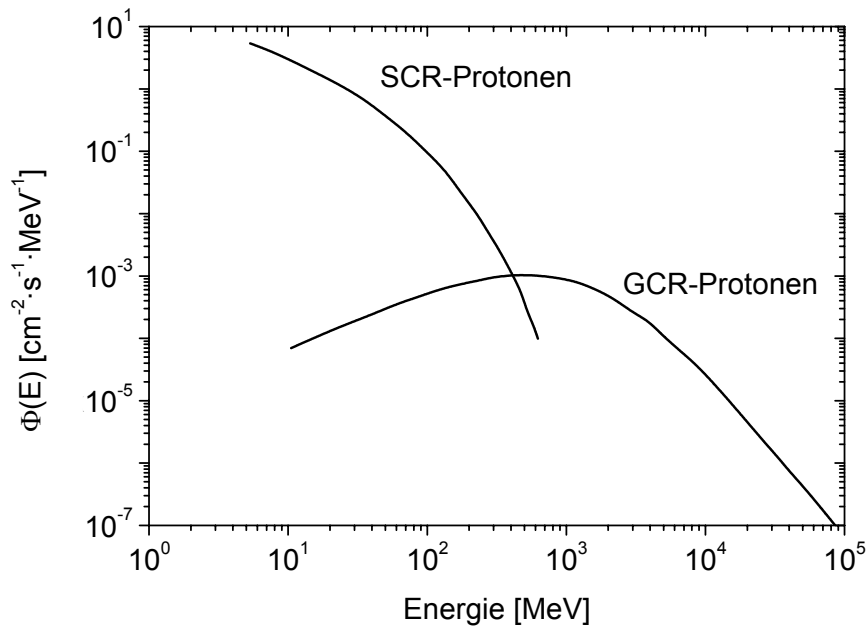


Abbildung 1.4: Für die Produktion der langlebigen kosmogenen Radionuklide relevantes, langzeitgemittelttes Spektrum der Protonen der solaren und galaktischen kosmischen Strahlung. Dieses Spektrum wurde durch die Untersuchung kosmogener Radionuklide in Mond-Bohrkernen und Meteoriten gewonnen [MIC96]. Die mittlere Energie der GCR-Protonen beträgt etwa 1,6 GeV.

Das GCR-Spektrum wird durch den Sonnenwind moduliert und variiert daher ebenfalls mit der Sonnenaktivität. Der Einfluss des Sonnenwindes auf die Modulation der GCR ist für hochenergetische GCR schwächer ausgeprägt als für niederenergetische GCR. Zu Zeiten maximaler Sonnenaktivität ist die GCR-Teilchenflussdichte minimal. Durch die sehr hohen Energien der GCR (Abbildung 1.4) werden in Materie Sekundärteilchen erzeugt, insbesondere Neutronen, die die Reichweite der GCR auf einige 100 g/cm^2 anwachsen lassen.

1.4 Kosmogene Nuklide

Von allen durch Kernreaktionen in Meteoroiden produzierten Produkten sind Edelgase und Radionuklide am empfindlichsten nachweisbar. Edelgase sind besonders leicht durch Erhitzen aus Probenmaterial entfernbar und massenspektrometrisch zu untersuchen, da sie bei den in Meteoroiden herrschenden Bedingungen keine Verbindungen mit anderen Elementen bilden.

Die Edelgas-Konzentrationen in Meteoriten setzen sich aus mehreren Komponenten zusammen. Nur die kosmogene Komponente wird durch kosmische Strahlung erzeugt, darüber hinaus gibt es eine getrappte Komponente, die bei der Akkretion des Meteoroiden oder seines Mutterkörpers eingebaut wird. Der Sonnenwind kann SCR-Partikel implantieren. Bei Meteoriten, deren Mutterkörper über eine Atmosphäre verfügt, finden sich auch deren Edelgas-Bestandteile im Meteorit. Zudem können bei höheren terrestrischen Altern auch Edelgase aus der Erdatmosphäre eindiffundieren. Der kosmogene Anteil muss daher erst bestimmt werden [OTT88]. Bei Neon-Isotopen werden Faktoren berechnet, deren Größen von den gemessenen $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ - und $^{21}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ -Verhältnissen abhängen [SCH93].

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten kosmogenen Radionuklide haben Halbwertszeiten unter 3,7 Ma. Diese Nuklide wurden auch in der Nukleosynthese gebildet, sind aber seitdem zerfallen. Heute nachweisbare Konzentrationen dieser langlebigen kosmogenen Radionuklide sind damit ausschließlich durch kosmische Strahlung gebildet worden. Sie erlauben dadurch einen unmittelbaren Zugang zur Wechselwirkung von Meteoroiden mit kosmischer Strahlung.

Die Konzentrationen kurzlebiger Radionuklide werden üblicherweise mit gut abgeschirmten Halbleiterdetektoren γ -spektroskopisch gemessen [NED00]. Da jedoch die Konzentration der langlebigen kosmogenen Nuklide sehr klein ist (einige 10^9 Atome pro Gramm Meteoritenmaterie) und sie darüber hinaus lange Halbwertszeiten (10^5 bis 10^7 a) besitzen, sind in Meteoriten nur sehr geringe spezifische Aktivitäten vorhanden, was eine Zählung der Zerfallsereignisse erschwert. Die spezifische Aktivität langlebiger kosmogener Radionuklide in Steinmeteoriten liegt im Bereich von 0-100 dpm/kg (dpm: **d**isintegrations **p**er **m**inute, 60 dpm = 1 Bq).

Die Problematik der Messung von langlebigen kosmogenen Nukliden wird dadurch verschärft, dass die meisten sehr ungünstige Zerfallseigenschaften haben (Tabelle 1.1). Deshalb werden sie per AMS (**A**ccelerator-**M**ass-**S**pectrometry) gemessen, wobei Teilchen und nicht deren Zerfälle gezählt werden.

Tabelle 1.1: Wichtigste Zerfallsdaten der relevanten Radionuklide [DUN98]. Bei den β -Energien sind Endpunktsenergien angegeben.

Nuklid	Zerfallsarten	Zerfalls- Energien [keV]	Häufigkeiten [%]	Halbwertszeit [a]
^{10}Be	β^- , keine γ -Emission	600	100 (β^-)	$1,51 \cdot 10^6$
^{26}Al	β^+ , γ	1200 (β^+), 1809 (γ)	100 (β^-) 99,8 (γ)	$7,17 \cdot 10^5$
^{41}Ca	e^- , ϵ , keine γ -Emission	2,97 (e^-), 3,3 (K_α)	77,1 (e^-), 12 (K_α)	$1,02 \cdot 10^5$
^{53}Mn	e^- , ϵ , keine γ -Emission	0,54 (e^-), 5,4 (K_α)	142 (e^-), 15 (K_α)	$3,74 \cdot 10^6$
^{60}Fe	β^- , γ	181 (β^-), 58 (γ)	100 (β^-), 2 (γ)	$1,5 \cdot 10^6$

Lediglich Al ist mittels Low-level γ - γ -Koinzidenzmessungen der Annihilationsstrahlung der Positronen, sowie γ -spektroskopisch messbar, die Zählraten sind jedoch wegen der geringen spezifischen Aktivität von Meteoritenproben so gering, dass die wochenlangen Messungen eine sehr stabile Elektronik und aufwendige Abschirmungen an den Apparaten erforderlich machen. Die weichen β -Strahlen von ^{10}Be wären prinzipiell z.B. über Flüssig-Szintillations-Spektroskopie zugänglich, ^{41}Ca und ^{53}Mn emittieren beim Zerfall Röntgenstrahlung, die lediglich dem Element, nicht aber einem bestimmten Radionuklid zuzuordnen ist. Beim Zerfall von ^{60}Fe treten niederenergetische γ -Quanten nur mit sehr geringer Häufigkeit auf.

1.5 Kernreaktionen

1.5.1 Reaktions-Mechanismen

Der bei weitem häufigste Prozess beim Durchgang geladener Teilchen durch Materie ist die Ionisation von Atomen und die Anregung von Hüllenelektronen. Dabei verlieren geladene Teilchen quasikontinuierlich Ihre Energie. Darüber hinaus kann elastische oder unelastische Streuung an Atomkernen auftreten oder es kann zu einer Kernreaktion kommen.

Kernreaktionsmechanismen sind im Detail nur unvollständig beschreibbar. Sie können als eine Abfolge mehrerer Stadien aufgefasst werden (Abbildung 1.5).

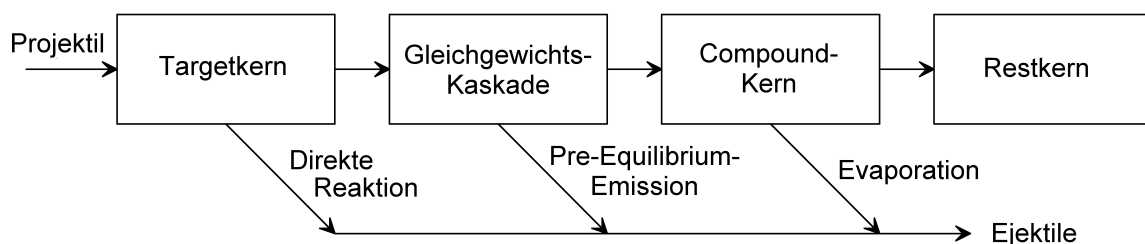


Abbildung 1.5: Vereinfachte Darstellung des Ablaufs einer Kernreaktion mit den Beiträgen aus direkten, Preequilibrium- und Compoundkernreaktionen.

Welcher dieser Mechanismen den Hauptanteil hat, hängt neben den Reaktionspartnern, hauptsächlich von der Projektilenergie ab. Bei niedriger Energie unter etwa 50 MeV überwiegen Compoundkernreaktionen, über 200 MeV verlaufen Kernreaktionen hauptsächlich durch direkte Reaktionen ab. Im Energiebereich zwischen 50 und 200 MeV treten Preequilibriumreaktionen in den Vordergrund.

Direkte Reaktionen finden in etwa in der Zeitspanne statt, die ein Projektilteilchen benötigt, den Kern zu durchqueren ($\approx 10^{-22}$ s). Es finden überwiegend Wechselwirkungen mit einzelnen Nukleonen statt. Die Freisetzung von Ejektilen findet unmittelbar im Anschluss daran statt. Bei der Wechselwirkung mit einzelnen Nukleonen werden diskrete Niveaus des Restkerns angeregt, Interaktionen mit mehreren Nukleonen regen hingegen kollektive Zustände an. Ein typisches Merkmal von Direktreaktionen sind anisotrope Ejektilverteilungen, diese sind stark vorwärtsgerichtet. Beispiele direkter Reaktionen mit Änderung der Massenzahl sind „Pick-Up“- „Stripping“- oder „Knock-Out“-Reaktionen, bei denen wenige Nukleonen des Projektils an den Kern abgegeben werden oder das Projektil wenige Nukleonen des Kerns aufnimmt oder entfernt.

Compoundkernreaktionen finden bei geringeren Projektilenergien statt, dabei bleibt genug Zeit, dass sich die Anregungsenergie des Projektils auf alle Nukleonen des Targetkerns statistisch verteilen kann, es bildet sich ein Compoundkern. Die dafür benötigte Zeit ist etwa $10^3 - 10^7$ mal größer als die Dauer der direkten Reaktionen. Die Abregung des Compoundkerns erfolgt in statistisch beschreibbaren Prozessen, bei denen einzelne Nukleonen oder komplexe Cluster emittiert werden können. Die Abregung kann auch über die Aussendung von γ -Quanten erfolgen. Für diese Evaporation von Nukleonen ist die Reaktion unerheblich, die zur Bildung des

Compoundkerns geführt hat. Ein Merkmal von Compoundkernreaktionen sind weitgehend isotrope Ejektilverteilungen, mit einer leichten Bevorzugung in 90° zur Projektionsrichtung.

Preequilibriumreaktionen finden zeitlich betrachtet vor den Compoundkernreaktionen statt. In der Zeit bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustands (Pre-Equilibrium) können Pre-Equilibrium-Emissionen stattfinden, bei denen einzelne Nukleonen und leichte Komplexeilchen emittiert werden können.

Das Projektil kann den Kern auch zur Spaltung anregen, wobei zwei etwa gleich schwere Reaktionsprodukte entstehen. Man unterscheidet aus dem Verlauf der Anregungsfunktion zwischen schneller (Hochenergie-) oder langsamer (Niederenergie-) Spaltung.

Bei hohen Energien ab etwa 200 MeV gewinnt eine Klasse der direkten Reaktionen große Bedeutung: die Spallations- und Fragmentationsreaktionen. Als Spallation bezeichnet man Reaktionen, bei denen aus einem hoch angeregten Kern in schneller Folge eine Vielzahl von Nukleonen oder Nukleonen-Clustern emittiert werden. Dies geschieht nach einer **intranuklearen** Stoß-Kaskade der Nukleonen untereinander. Die dabei emittierten Teilchen können weitere Kernreaktionen auslösen (**internukleare** Kaskade). Dabei bilden sich Produkte mit einer großen Massendifferenz zum Targetkern. Fragmentations- und Multifragmentationsreaktionen sind Übergangsreaktionen zwischen Spaltung und tiefer Spallation. Dabei entstehen ein oder mehrere größere Bruchstücke des Kerns. Wegen der hohen Energie der GCR sind diese Reaktionen für die Beschreibung der Radionuklidproduktion in Meteoroiden von großer Bedeutung.

1.5.2 Wirkungsquerschnitt und Produktionsrate

Der Wirkungsquerschnitt σ ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass eine Kernreaktion eines Projektilteilchens x mit einem Targetkern A zu einem Produktnuklid B unter Emission eines Ejektils y eintritt.



Die Produktion des Nuklids B ist proportional zum Wirkungsquerschnitt σ , der Projektionflussdichte Φ und der Anzahl der Targetatome N_A . Für die Produktionsrate P_B des Nuklids B gilt:

$$P_B = \frac{dN_B}{dt} = \sigma \cdot \Phi \cdot N_A \quad (1.2)$$

mit: N_A : Zahl der Edukt-Kerne
 N_B : Zahl der Produkt-Kerne

Ist das Produktnuklid radioaktiv, so muss dessen Zerfall während der Bestrahlung berücksichtigt werden:

$$\frac{dN_B}{dt} = P_B - \lambda_B N_B \quad (1.3)$$

mit λ_B : Zerfallskonstante von B (= $\ln(2)/T_{1/2}$, $T_{1/2}$: Halbwertszeit)

Unter der Voraussetzung, dass zu Beginn der Bestrahlung ($T_{exp} = 0$) noch kein Produktnuklid vorliegt und der Projektfluss als konstant angesehen werden kann, ergibt sich durch Integration:

$$N_B(t) = \frac{P_B}{\lambda_B} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_B T_{exp}} \right) \quad (1.4)$$

mit: T_{exp} : Bestrahlungsdauer

oder für die Aktivität A_B eines radioaktiven Produktes:

$$A_B(t) = P_B \cdot \left(1 - e^{-\lambda_B T_{exp}} \right) \quad (1.5)$$

Bei Meteoritenfunden muss unter Umständen noch das terrestrische Alter T_{terr} berücksichtigt werden:

$$A_B(t) = P_B \cdot \left(1 - e^{-\lambda_B \cdot T_{exp}} \right) \cdot e^{-\lambda_B \cdot T_{terr}} \quad (1.6)$$

mit: T_{terr} : terrestrisches Alter

Eine Vereinfachung von Gleichung 1.5 ergibt sich, wenn die Halbwertszeit eines Produkts lang ist gegenüber der Bestrahlungszeit ($\lambda_B \cdot T_{exp} \ll 1$). Die Exponentialfunktion lässt sich dann als Taylorreihe entwickeln, die man nach dem ersten Glied abbrechen kann. Somit erhält man wie für stabile Nuklide (kosmogene Edelgase):

$$N_B(t) = P_B \cdot T_{exp} \quad (1.7)$$

Ist demgegenüber die Bestrahlungszeit lang gegenüber der Halbwertszeit ($\lambda_B \cdot T_{exp} \gg 1$) des Produktes, geht der Exponentialterm in Gleichung 1.5 gegen Null (z.B. bei kosmogenen Radionukliden in Meteoriten mit hohem Bestrahlungsalter). In diesem Falle gilt:

$$N_B(t) = \frac{P_B}{\lambda_B} \quad (1.8)$$

oder mit der Aktivität A_B des Produktes:

$$A_B = P_B \quad (1.9)$$

Damit sind prinzipiell über kosmogene Radionuklide sowohl das Bestrahlungsalter als auch das terrestrische Alter zugänglich. Für die Berechnung des Bestrahlungsalters eignen sich kosmogene Edelgase aufgrund der mit der Zeit linearen Konzentrationszunahme besonders gut (Gleichung 1.7).

1.6 Modelle zur Produktion von kosmogenen Nukliden

Wie aus dem vorigen Kapitel hervorgeht, ist es möglich sowohl das Bestrahlungsalter als auch das terrestrische Alter mit Hilfe der Konzentrationen kosmogener Nuklide zu berechnen, wenn man die Produktionsraten der Nuklide kennt. Zur Berechnung von Nuklid-Produktionsraten in Meteoriten sind im Wesentlichen drei Ansätze entwickelt worden: empirische Modelle, semiempirische Modelle und physikalische Modelle. Zur Datierung benötigt man immer Paare von Nukliden, um sowohl Produktionsrate als auch Bestrahlungsalter bestimmen zu können. Zur Bestimmung eines terrestrischen Alters ist die Konzentration mindestens eines weiteren kosmogenen Radionuklids erforderlich, dessen Halbwertszeit in derselben Größenordnung wie das terrestrische Alter liegen muss, wenn eine hohe Genauigkeit erreicht werden soll.

1.6.1 Empirische und semiempirische Modelle

Empirische und semiempirische Modelle gewinnen Nuklid-Produktionsraten entweder durch die Untersuchung kosmogener Nukliden in einer großen Anzahl von Meteoriten, oder durch Untersuchungen vieler Proben (Tiefenprofil) eines einzelnen Meteoriten.

Zu empirischen Modellen, die aus den Untersuchungen einer Reihe von Meteoriten Produktionsraten gewinnen sind insbesondere Arbeiten von Herzog et al. [HER71], Nishiizumi et al. [NIS80], Moniot et al. [MON83] und Eugster [EUG88] zu nennen.

Die Ansätze der drei erstgenannten Arbeiten gehen von der Analyse eines Paares eines radioaktiven Nuklids und eines stabilen Nuklids aus, deren Produktion in etwa dieselbe Tiefenabhängigkeit besitzt. Häufig benutzte Nuklidpaare sind ^{26}Al - ^{21}Ne , ^{10}Be - ^{21}Ne und ^{53}Mn - ^{21}Ne .

Das folgende Beispiel soll die Berechnung von Produktionsraten nach dem Modellen von Herzog et al. [HER71], Nishiizumi et al. [NIS80] und Moniot et al. [MON83] erläutern. Man analysiert Radionuklidkonzentrationen eines Meteoriten. Der Meteorit sei so lang bestrahlt worden, dass das untersuchte Radionuklid seine Sättigungsaktivität A_{sat} erreicht hat. Ein anderer Meteorit mit gleichen Nuklidproduktionsraten ist nur kurz bestrahlt worden und das Radionuklid hat eine Konzentration A_{meas} erreicht. In einem solchen Falle lässt sich das Bestrahlungsalter nach Gleichung 1.10 berechnen.

$$t_{exp} = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A_{sat}}{A_{sat} - A_{meas}}, \text{ mit } A_{sat} > A_{meas} \quad (1.10)$$

mit: A_{sat} : Sättigungsaktivität
 A_{meas} : gemessene Aktivität

Mit einem so gewonnenen Bestrahlungsalter lassen sich dann mit Hilfe von Gleichung 1.7 die Produktionsraten für Edelgase berechnen.

Bei der tatsächlichen Anwendung solcher Modelle wird eine ganze Reihe von Meteoriten zur Berechnung von Produktionsraten herangezogen. Für dieses Modell müssen die analysierten Meteorite einige Voraussetzungen erfüllen, damit sie

tatsächlich gleiche Produktionsraten besitzen: alle untersuchten Meteorite müssen eine einfache Bestrahlungsgeschichte haben, die Zusammensetzung der Meteorite muss ähnlich sein und alle müssen von ähnlich großen Meteoroiden stammen. Kein Meteorit darf eine komplexe Bestrahlungsgeschichte aufweisen.

Ein weiteres empirisches Modell ist maßgeblich von Eugster [EUG88] eingeführt und weiterentwickelt worden. Es basiert auf der Edelgasanalyse einer Anzahl von Meteoriten. Das Bestrahlungsalter wird dabei von der ^{81}Kr -Kr-Methode abgeleitet. Dies gilt als zuverlässige Methode, da 1. das Verhältnis $^{81}\text{Kr}/\text{Kr}$ als Isotopenverhältnis eines Elementes einfach zu bestimmen ist, 2. ein eventueller diffusiver Verlust beide Isotope zugleich beeinflussen würde und 3. das Verhältnis z.B. der Produktionsraten von ^{81}Kr und ^{83}Kr tiefenunabhängig ist [EUG67] [MAR67].

Allerdings wird Kr hauptsächlich durch Kernreaktionen an den Spurenelementen Rb, Sr, Y und Zr gebildet, deren Konzentrationen beachtliche Schwankungen von Meteorit zu Meteorit zeigen [LOD98a]. Im Eugsterschen Modell wird der Einfluss der chemischen Zusammensetzung eines Meteoroiden auf die Nuklidproduktion u.a. aus der Edelgasanalyse verschiedener Minerale gewonnen, die unterschiedliche chemische Zusammensetzungen besitzen [BOG73].

Alle Meteorite, von denen man Produktionsraten und chemische Korrekturfaktoren ableitet, müssen eine einfache Bestrahlungsgeschichte besitzen. Darüber hinaus besteht die Schwierigkeit, verschiedene Kr-Komponenten (fissiogen, getrappt, kosmogen) zu differenzieren. Schließlich werden kosmogene Radionuklide nicht erfasst. ^{81}Kr ist zwar auch ein kosmogenes Radionuklid, wird aber wegen seiner chemischen Eigenschaften mittels Methoden der Edelgasanalytik erfasst und deshalb zu den kosmogenen Edelgasen gezählt.

Neben diesen rein empirischen Modellen sind semiempirische Modelle aufgestellt worden, die Produktionsraten anhand mehrerer Analysen eines einzigen Meteoriten gewinnen, um Beziehungen z.B. für die Tiefenabhängigkeit einer Nuklidproduktion zu erhalten. In diesen Beziehungen werden parametrisierte Gleichungen verwendet. Einige der verwendeten Parameter wird an experimentelle Daten angepasst, die aus Meteoritenanalysen gewonnen werden. Andere werden aus physikalischen Größen abgeleitet, wie z.B. der Massendifferenz zwischen Produkt- und Edukt-Nuklid.

Erste Arbeiten sind schon vor 65 Jahren für die Beschreibung der tiefenabhängigen He-Produktion in Eisen-Meteoriten veröffentlicht worden [BAU48]. Derartige semiempirische Modelle zur Beschreibung der Tiefenabhängigkeit sind unter anderem von Signer et al. [SIG60] und Arnold et al. [ARN61] weiterentwickelt worden. Mit diesen Beziehungen lässt sich z.B. die Tiefenabhängigkeit der Nuklidproduktion eines Meteoriten auf andere übertragen. Beispiele aus neuerer Zeit sind eingehende Untersuchungen des Meteoriten Knyahinya (vergleiche [GRA90], [LAV97], [RED93]) sowie die Untersuchungen von Edelgasproduktionsraten in Eisenmeteoriten und Steineisenmeteoriten von Honda et al. [HON88], [HON02].

1.6.2 Physikalische Modelle

Physikalische Modelle verstehen einen Meteoroiden als dickes Target. In einem dicken Target werden, im Gegensatz zum dünnen Target, durch die einfallenden

Primärteilchen Sekundärteilchen erzeugt, die signifikant zur Nuklidproduktion beitragen. Ausserdem findet in einem dicken Target ein signifikanter Energieverlust der Projektilteilchen statt. Physikalische Modelle versuchen durch kernphysikalische Basisdaten – Wirkungsquerschnitte und Produktionsraten – die Bildung kosmogener Nuklide in Meteoroiden zu beschreiben. Prozesse der Teilchenerzeugung und des Teilchentransports werden mittels Monte-Carlo-Techniken simuliert. Es werden, außer der Flussdichte der einfallenden kosmischen Strahlung, keine freien Parameter verwendet. Die Modelle erlauben dadurch die flexibelste Berechnung von Produktionsraten, da sie auf einem physikalischen Verständnis von Nuklidproduktionsprozessen beruhen.

Die Entwicklung physikalischer Modelle wurde über die letzten 35 Jahre kontinuierlich weiterentwickelt. (vergleiche z.B. [FUS69], [AYL88], [VOG90], [MIC91], [MIC98], [LEY00b], [LEY01a], [GIL02]). Im Rahmen dieser Arbeit wird das physikalische Modell von Leya et al. [LEY00b] verwendet, da es die aktuellsten Kerndaten beinhaltet und die neusten Rechencodes für die Berechnung unbekannter Anregungsfunktionen Eingang fanden. Ähnliche Modelle sind auch von Masarik et al. [MAS94], [MAS01] entwickelt worden.

In Anlehnung an Gleichung 1.2 kann die Produktionsrate P_i eines Nuklids i in einer Probe mit der chemischen Zusammensetzung c_s , die sich in einer Tiefe d in einem dicken Target mit dem Radius R und der chemischen Bulkzusammensetzung c_b befindet, nach Gleichung 1.11 beschrieben werden.

$$P_i(d, R, c_s, c_b) = N_A \cdot \sum_j \frac{c_j}{A_j} \sum_k \int_0^\infty \sigma_{i,j,k}(E_k) \frac{\partial \phi}{\partial E_k}(E_k, d, R, c_b) dE_k \quad (1.11)$$

- mit:
- P_i : Produktionsrate des Nuklids i
 - d : Tiefe der Probe
 - R : Radius des bestrahlten Körpers
 - c_s : chemische Zusammensetzung der Probe
 - c_b : Bulkzusammensetzung des gesamten Körpers
 - N_A : Avogadro-Konstante
 - c_j : Konzentration des Nuklids j in der Probe
 - A_j : Massenzahl des Nuklids j
 - $\sigma_{i,j,k}$: Wirkungsquerschnitt für die Produktion des Produktnuklids i aus dem Targetnuklid j durch Projektile k
 - ϕ : Teilchenflussdichte
 - E_k : Energie des Projektils k

Auf einen Meteoroiden fallen Teilchen mit einem breiten Energiespektrum ein. Außerdem werden im Meteoroiden Sekundärteilchensorten mit einem Energiespektrum erzeugt. Die Faltung der Anregungsfunktionen mit den Energiespektren der Projektilteilchen k wird im Integral von Gleichung 1.11 berücksichtigt.

Diese Faltung muss über alle Projektilteilchen k summiert werden, um die Gesamtproduktion eines Nuklids i aus einem Targetnuklid j zu erhalten.

Weiterhin liegt in einem Meteoroiden nicht nur ein Targetnuklid vor, sondern eine ganze Anzahl Targetnuklide j , die ein Nuklid i produzieren können. Dies wird in Gleichung 1.11 durch eine Summierung über alle Targetnuklidkonzentrationen j berücksichtigt.

In Anbetracht dieser Zusammenhänge wird der Nachteil der physikalischen Modelle offenbar: man benötigt eine große Anzahl nuklearer Daten. Allein um z.B. die Produktion von ^{53}Mn aus den wichtigsten Targetelementen $^{\text{nat}}\text{Mn}$, $^{\text{nat}}\text{Fe}$ und $^{\text{nat}}\text{Ni}$ unter Berücksichtigung primärer und sekundärer Teilchen zu berechnen, müssen 6 Anregungsfunktionen im Energiebereich von 0 bis zu einigen GeV bekannt sein, wenn man Protonen und sekundäre Neutronen für die Produktionsratenberechnung berücksichtigt.

Da in den letzten Jahren die Datenbasis für Protonen wesentlich erweitert werden konnte (siehe z.B. Michel et al. [MIC97]), sind für Protonen sehr zuverlässige Modellrechnungen möglich. Die Energiespektren lassen sich ebenfalls zuverlässig mit Monte-Carlo-Rechencodes [CLO88], [FIL92], [LEY97], [GLO98], berechnen. Ein Problem stellen Neutronen-Anregungsfunktionen dar, für die über 180 MeV praktisch keine experimentellen Daten verfügbar sind [GLA02].

Da rein theoretisch errechnete Anregungsfunktionen zum Teil um eine Größenordnung oder mehr von tatsächlichen Werten abweichen können, müssen experimentelle Daten in Form von Dicktarget-Experimenten gewonnen werden. Bei derartigen Experimenten [MIC96], [LEY97], [LEY00b] werden Modellmeteoroiden, die mit Targetfolien angefüllt sind, einer homogenen 4π -Bestrahlung unterzogen. Dabei werden die Sekundärteilcheneffekte berücksichtigt.

Die auf diese Weise gewonnenen experimentellen Produktionsraten beinhalten deshalb die Produktionen sowohl durch Protonen, als auch durch Neutronen. Da Protonenanregungsfunktionen weitgehend bekannt sind, kann der Protonenanteil der Produktion separiert werden. Das erlaubt einen Zugang zur Produktion durch Neutronen. Da die Energiespektren der Teilchen im Modellmeteoroid zuverlässig berechnet werden können, erlaubt dieses Verfahren die Entfaltung von Neutronen-Anregungsfunktionen, die somit an experimentelle Daten angepasste Neutronen-Anregungsfunktionen sind.

Die in der GCR enthaltenen α -Teilchen werden im verwendeten Modell so berücksichtigt, dass sie zu einer Erhöhung des Primärteilchenflusses beitragen. α -Teilchen in der GCR besitzen in guter Näherung dieselbe Energie pro Nukleon wie die Protonen der GCR. Unter der Annahme, dass α -Teilchen nach dem ersten unelastischen Stoß in 4 einzelne Nukleonen gleicher Energieverteilung aufbrechen, ist eine Berücksichtigung dadurch möglich, dass man die Produktionsrate mit einem Faktor von 1,55 multipliziert. 12 % α -Teilchen in der GCR besitzen 55 % der Masse und damit der Gesamt-Energie [LEY00a].

Prinzipiell müssen zur korrekten Beschreibung der Produktion kosmogener Nuklide durch Protonen oder Neutronen sämtliche stabilen und primordialen Elemente als Targetelemente betrachtet werden, deren Massenzahl größer oder gleich $A-1$ (A :

Massenzahl) des produzierten Radionuklids ist. Für die Produktion von kosmogenen Nukliden sind jedoch lediglich Elemente mit einer Kernladungszahl $Z \leq 28$ relevant, da sie fast die gesamte Zusammensetzung eines Meteoroiden bilden. Eine Ausnahme ist die Beschreibung der Produktion der kosmogenen Kr- und Xe-Isotope, sowie von ^{129}I . Hier spielen insbesondere Rb, Sr, Y und Zr (für Kr) sowie Te, Ba, La und die REE (für ^{129}I und Xe) eine Rolle. Die in dieser Arbeit durchgeführten Modellrechnungen berücksichtigen die wichtigsten Elemente zur Produktion der untersuchten kosmogener Nuklide in Steinmeteoroiden (Tabelle 1.2).

Tabelle 1.2: In den Modellrechnungen berücksichtigten Targetelemente zur Produktion der untersuchten kosmogener Nuklide.

Kosmogener Nuklid	Halbwertszeit [Ma]	Berücksichtigte Targetelemente
^{26}Al	0,716	Mg, Al, Si, S, Ca, Ti, Fe, Ni
^{10}Be	1,51	C, O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni
^{53}Mn	3,74	Fe
^3He	∞	Mg, Al, Si, Fe, Ni
^{21}Ne	∞	Na, Mg, Al, Si, Fe, Ni
^{22}Ne	∞	Na, Mg, Al, Si, Fe, Ni

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Implementierung der Produktionsratenberechnungen in einem Tabellenkalkulationsprogramm verwendet [KOS00], [MIC03]. Darin fanden die elementaren Produktionsraten aus [LEY00b] Eingang. Aus den Produktionsraten der einzelnen Elemente wird anhand der vom Benutzer einzugebenden Probenzusammensetzung eine Gesamtproduktionsrate für Meteoroiden-Radien zwischen 5 und 120 cm als Funktion der präatmosphärischen Tiefe errechnet und in tabellarischer Form zusammengestellt. Daraus lassen sich dann alle erforderlichen Produktionsraten in Diagrammen graphisch auftragen, was die Auswertung und Interpretation erlaubt.

2. Aufgabenstellung

Zentrale Aufgabe dieser Arbeit ist die Diskussion der Bestrahlungsgeschichte von Marsmeteoriten. Dazu soll erstmals ein same-sample-Datensatz der Radionuklide ^{10}Be , ^{26}Al und ^{53}Mn an zehn Mars-Meteoriten gemessen werden. Zur Analyse sollen die dazu notwendigen radiochemischen Separationsschritte und die Präparation der AMS (**A**ccelerator-**M**ass-**S**pectrometry)-Proben erfolgen. Die Messungen selbst sollen im Rahmen von Kooperationen mit Beschleunigerlabors der TU-München und des Paul-Scherrer-Instituts der ETH Zürich durchgeführt werden.

Zur Komplettierung des same-sample-Datensatzes von kosmogenen Nukliden in den Marsmeteoriten sollen auch die im Rahmen des DFG-Forschungsthemas „Systematische und umfassende interdisziplinäre Analyse aller Marsmeteorite“¹ vom MPI Mainz an den gleichen Proben gewonnenen Edelgasdaten herangezogen und diskutiert werden.

Aufzuklärende Punkte sollen dabei das Bestrahlungsalter, die präatmosphärische Größe der Meteoriten, die Abschirmtiefe der untersuchten Proben, das terrestrische Alter, SCR-Effekte und eine evtl. komplexe Bestrahlungsgeschichte sein. Die Reproduzierbarkeit der Erkennung von SCR-Effekten soll anhand des Meteoriten Grüneberg überprüft werden, für den derartige Effekte bereits berichtet wurden [LEY01].

Zusätzlich soll die Bestrahlungsgeschichte der Meteoritenfälle Naragh, Morávka (Falldatum: 06.05.2000), und Neuschwanstein (Falldatum: 06.04.2002) durch die Analyse und Diskussion kosmogener Radionuklide und Edelgase untersucht werden.

Zur Interpretation der Messwerte soll das an der Universität Hannover entwickelte physikalische Modell für die Tiefen- und Meteoroidenradius-abhängige Produktion kosmogener Nuklide verwendet werden [LEY00b]. Anhand der unter Anwendung dieses Modells berechneten Produktionsraten sollen die gefundenen Konzentrationen der kosmogenen Nuklide diskutiert werden.

Um kosmogene Nuklide auf physikalischer Basis modellieren zu können, ist eine große Anzahl an Kerndaten erforderlich. Neben experimentell bestimmten Anregungsfunktionen ist die Bestimmung von Produktionsraten notwendig. Im Rahmen dieser Arbeit sollen zur Optimierung physikalischer Modelle nukleare Daten gewonnen werden. Dazu sollen bestrahlte Targets chemisch aufgearbeitet, AMS-Proben präpariert und analysiert werden. Es sollen Produktionsraten und Neutronen-Wirkungsquerschnitte der Radionuklide ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca und ^{60}Fe , die aus $^{\text{nat}}\text{Fe}$ und $^{\text{nat}}\text{Ni}$ gebildet worden sind, gemessen werden.

¹ Zum Zeitpunkt der Antragsstellung für dieses Forschungsvorhaben waren 10 Marsmeteorite bekannt, die im Rahmen dieser Arbeit gemessen wurden. Mittlerweile sind 27 Marsmeteorite bekannt.

3. Experimentelle Methoden

3.1 Übersicht

Zwei Arten von Proben wurden aufgearbeitet:

- Meteoritenproben
- Metallfolien aus Dicktarget-Experimenten

Der prinzipielle Ablauf der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Techniken zur Messung der Radionuklidkonzentrationen von ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca , ^{53}Mn und ^{60}Fe in diesen Proben gliedert sich in folgende Schritte:

1. Auflösung des Probenmaterials (bei Meteoriten: Aufschluss) unter Trägerzugabe.
2. Messung der Elementkonzentrationen per ICP-OES (Inductively-Coupled-Plasma-Optical-Emission-Spectroscopy).
3. Trennung der verschiedenen chemischen Elemente.
4. Darstellung des Probenmaterials und Füllung des AMS-Targethalters.
5. Messung der Radionuklidkonzentration per AMS.
6. Auswertung der durch die AMS gelieferten Isotopenverhältnisse

Darüber hinaus wurden im Rahmen dieser Arbeit ^{26}Al -Konzentrationen in einer Probe des Meteoriten Morávka mit Hilfe zerstörungsfreier Low-level- γ - γ -Koinzidenz-Messungen, und die chemische Element-Zusammensetzung einiger Meteoritenproben mittels PGAA (Prompt-Gammaray-Activation-Analysis) bestimmt.

In den folgenden Kapiteln wird auf diese Schritte im Detail eingegangen werden. Da sich der chemische Trennungsgang nach Zusammensetzung der Probe richtet, wird dieser für die verschiedenen Arten der Proben (Meteoritenproben und Metallfolien) getrennt beschrieben. Die Darstellung des AMS-Probenmaterials erfolgt für alle Proben gleich und wird im Anschluss erläutert. Die AMS-Messungen selbst fanden an zwei Anlagen statt und werden für jede Anlage gesondert dargelegt. Die zusätzlichen Messungen mit Hilfe von γ - γ -Koinzidenzspektroskopie und PGAA werden im Anschluss beschrieben, zuletzt erfolgt eine Beschreibung der Berechnung der Messgrößen, der Fehlerberechnung und der Qualitätskontrolle.

3.1.1 Allgemeines zur Analyse der Proben

Die in dieser Arbeit verwendeten radiochemischen Trennungen beruhen auf dem Prinzip der Isotopenverdünnungsanalyse. Da die im Analysenmaterial vorhandene Menge an Radioisotop zu gering ist (typischerweise um 10^9 Atome), um direkt chemischen Routineoperationen zugänglich zu sein, wird die zu analysierende Substanz zusammen mit Träger-Isotopen in wässriger Lösung gleichverteilt. Damit stellt sich in Abhängigkeit von vorliegender Einwaage, vorhandener Radioisotop-Konzentration und Trägermenge ein festes Isotopenverhältnis zwischen Radioisotop und Trägerisotop ein. Die vorliegenden Träger-Mengen werden mittels ICP-OES analysiert, da sie die Basis für die spätere Berechnung der Radionuklidkonzentration sind.

Da nach Zugabe des Trägers makroskopische Mengen vorliegen, kann man gewöhnliche chemische Trennungszprozeduren anwenden, in der vorliegenden Arbeit meist Kombinationen aus Fällungsreaktionen und Ionenaustauscherchromatographie, um die verschiedenen Elemente voneinander zu trennen. Dabei wird davon ausgegangen, dass Isotopieeffekte im Laufe der Trennungen vernachlässigbar sind, das eingestellte Isotopenverhältnis also konstant bleibt.

Im Anschluss an die chemischen Trennungen wird die Probensubstanz für die Ionenquelle der AMS möglichst rein synthetisiert. In der vorliegenden Arbeit wurden die Oxide (bei Ca Calciumhydrid bzw. Calciumfluorid) als Probensubstanzen verwendet. Die AMS-Probensubstanz wird in die entsprechenden Halter der AMS-Anlagen gepresst. Die Oxide werden in der Regel zusammen mit einem Metallpulver (Cu oder Ag) in die Targethalter eingepresst, um die Emissionseigenschaften in der Ionenquelle zu verbessern.

Die Reinheit der Proben hat entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Messungen. Von ihr hängen die Höhe und Konstanz des Ionenstroms, den die Probe liefert, und der Isobarenuntergrund ab.

Die ^{10}Be - und ^{26}Al -Proben sowie die ^{41}Ca -Proben aus den Dicktarget-Experimenten wurden an der AMS-Anlage der ETH Zürich gemessen, die ^{53}Mn - und ^{60}Fe -Proben an der AMS-Anlage der TU-München.

Das Ziel sämtlicher chemischer Trennungen in dieser Arbeit ist die Darstellung von Probensubstanz, die in einer AMS-Anlage gut gemessen werden kann. Dabei sind von besonderer Bedeutung:

- Chemische Reinheit
- Definierte chemische Form (Speciation)
- Vermeidung von Crosskontamination
- Isobarenuntergrund

Nachrangig ist hingegen die Ausbeute des Trennungsganges, weil die AMS sehr „sparsam“ ist. Üblicherweise werden lediglich einige Mikrogramm der Substanz pro 10 min Analysendauer benötigt.

Die **chemische Reinheit** der dargestellten AMS-Proben übt einen entscheidenden Einfluss auf die Messbarkeit der Proben in der AMS aus. Geringe Verunreinigungen können zu einer wesentlichen Abschwächung und Schwankung des Ionenstromes führen, daher sind hochselektive Trennverfahren und höchste Sauberkeit des Probenmaterials erforderlich. Zur Erzielung sehr reiner Proben wurde daher teilweise eine niedrigere Ausbeute in Kauf genommen.

Unter **chemischer Form** soll die Zusammensetzung der AMS-Probensubstanz verstanden werden. Wünschenswert ist eine einheitliche Zusammensetzung des gesamten AMS-Probenmaterials. MnO_2 z.B. wandelt sich beim Glühen über $536\text{ }^\circ\text{C}$ [HOL85] in Mn_3O_8 um, welches aufgrund seiner Ionisationspotentiale für die Erzeugung negativer MnO^- -Ionen weniger geeignet ist, und daher schwächere und unruhigere Strahlströme in der AMS zu Folge hat.

Unter **Crosskontamination** versteht man die Kontamination einer Probe durch eine andere Probe, oder durch Gerätschaften, die nicht genügend gereinigt sind. Da in dieser Arbeit zum einen extrem geringe Stoffmengen analysiert werden und zum anderen verschiedene Proben mit sehr unterschiedlichen Radionuklidkonzentrationen gehandhabt werden, ist die Gefahr der Crosskontamination besonders groß. Das Verschleppen von Radionukliden aus einem Analysengang in den nächsten sogar von Geräten aus einem Labor in ein anderes kann nur durch peinliche Sauberkeit und Nachvollziehbarkeit der Herkunft und der Verwendung der Geräte ausgeschlossen werden. Dabei sollten gleiche Geräte und Gefäße immer nur mit Analysen mit ähnlicher zu erwartender Radionuklidkonzentration verwendet werden und nicht zwischen den Labors getauscht werden.

Das Problem des **Isobarenuntergrundes** ist ein für AMS-Untersuchungen spezifisches. Das liegt an der schwierigen Trennbarkeit zweier isobarer Nuklide, da diese wegen sehr geringer Massendifferenz ($\Delta m/m$ für das Isobarenpaar $^{10}\text{Be}/^{10}\text{B} \approx 5 \cdot 10^{-5}$) kaum der Massenseparation unterliegen können.

3.2 Aufarbeitung von Meteoritenproben

Die Aufarbeitung der Meteoritenproben folgt den Methoden von Merchel et al. [MER98] [MER99]. Diese Technik basiert auf Arbeiten von Vogt et al. [VOG88b], die in der Abteilung Nuklearchemie der Uni Köln im Rahmen einer Dissertation erarbeitet wurde [VOG88a]. Die Aufarbeitung wird lediglich schematisch in Abbildung 3.1 dargestellt. und auf die Änderungen eingegangen, die im Rahmen dieser Arbeit eingeführt werden konnten. Die modifizierten Trennungsgänge für die Dicktarget-Proben werden im Anschluss beschrieben.

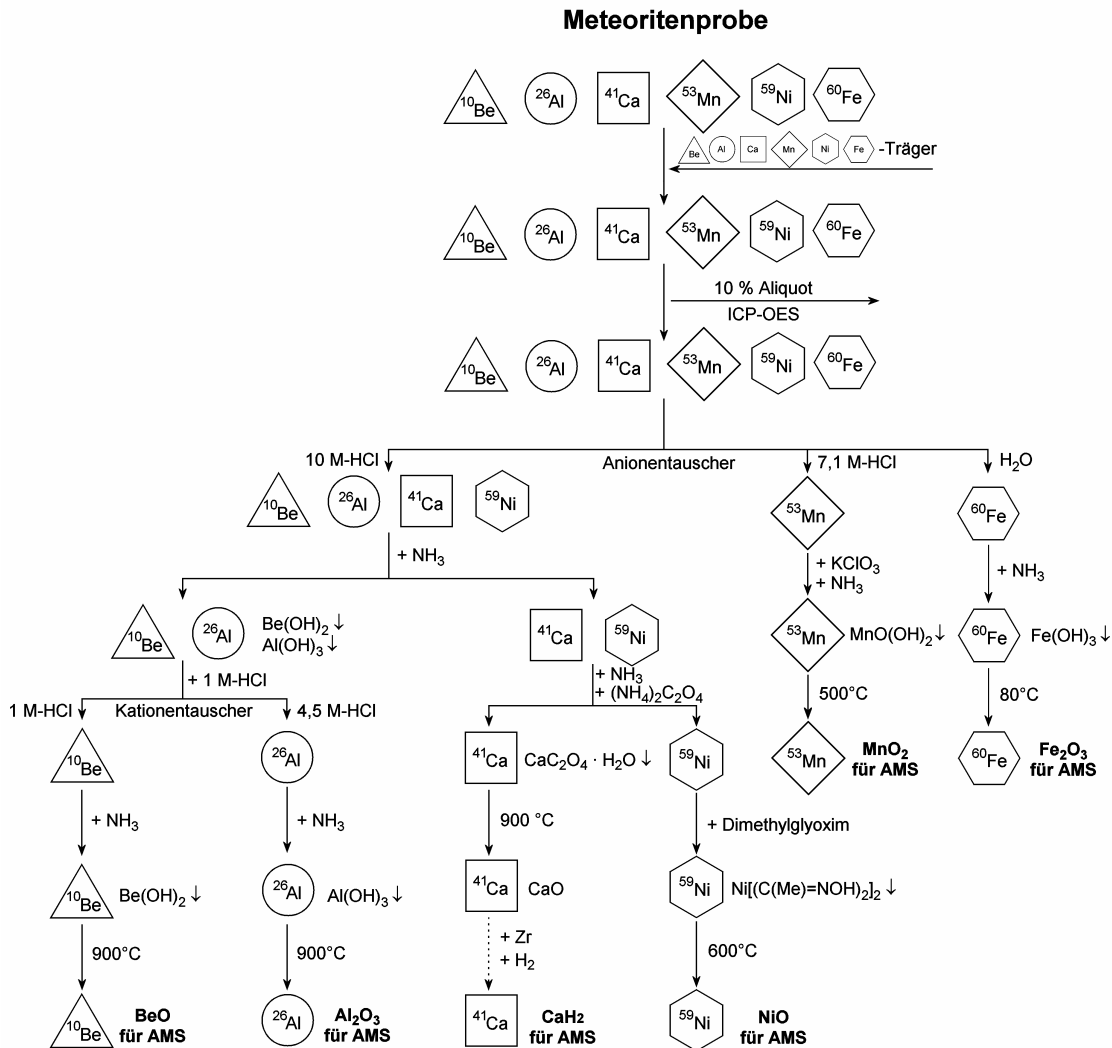


Abbildung 3.1: Prinzipieller Verlauf des in dieser Arbeit verwendeten Trennungsgangs zur Meteoritenanalyse (nach [MER99]).

Für die Darstellung des Ca-Targetmaterials wird neben dem skizzierten Verlauf (Abbildung 3.1) zusätzlich die Darstellung von Calciumfluorid für die AMS-Anlage der TU-München angewendet. Außerdem wurde die in [MER99] beschriebene ionenchromatographische Trennung von Ca und Ni durch Fällung von CaC_2O_4 bzw. CaF_2 und Waschen der Niederschläge ersetzt, was die Trennung vereinfacht. Es zeigte sich, dass die Qualität der Targetmaterialien dadurch nicht beeinträchtigt wurde [SCH02].

3.3 Aufarbeitung von Dicktargetfolien

Es wurden Targets aus Dicktarget-Bestrahlungsexperimenten aufgearbeitet. Analysiert wurden die Nuklide ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca , und ^{60}Fe in Eisen- und Nickelfolien aus dem Experiment LNS172A. Bei diesem Experiment wurde eine Stahlkugel (>99 % Fe) mit einem Radius von 10 cm isotrop mit 1,6 GeV-Protonen am Synchrocyclotron des Laboratoire National Saturne (LNS) des Centre d'Étude Nucléaire in Saclay (CEN), Frankreich bestrahlt. Im Gegensatz zu früheren Experimenten mit dicken Targets, bei denen durch nichtisotrope Bestrahlung keine realistischen 4π -Bestrahlungen erreicht wurden [MIC91], kann durch ein solches Experiment eine sehr realistische Modellierung der Produktion kosmogener Nuklide in Meteoroiden vorgenommen werden.

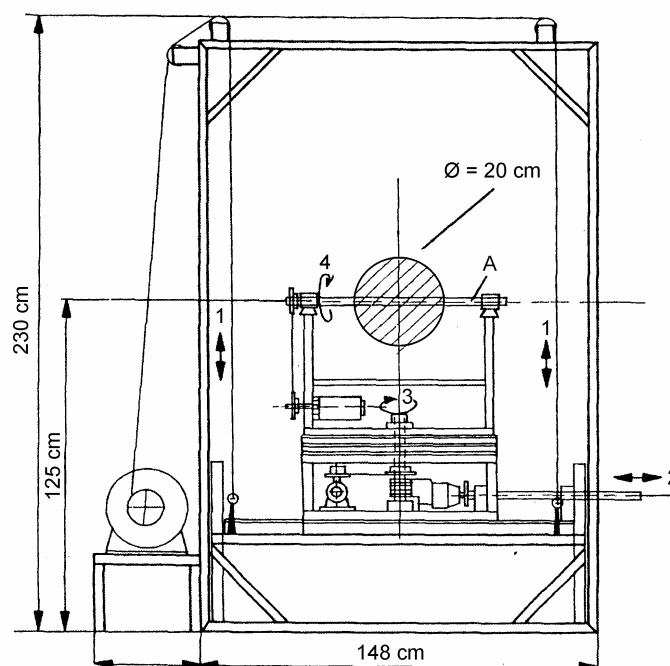


Abbildung 3.2: Apparatur zur Positionierung und Bewegung des Modell-Eisenmeteoroiden vor dem Strahlrohr der Bestrahlungseinrichtung. Durch Elektromotoren werden simultan vier Bewegungsrichtungen realisiert: zwei senkrecht zueinander verlaufende, pendelnde Translationsbewegungen (1 und 2), sowie zwei Rotationsbewegungen um senkrecht aufeinander stehende Achsen (3 und 4).

Die Isotropie der Bestrahlung der Eisenkugel wurde durch eine Überlagerung von zwei senkrecht zueinander erfolgenden Rotationsbewegungen der Kugel, sowie zwei senkrecht zueinander erfolgenden pendelnden Translationsbewegungen der Kugel vor dem Strahlrohr erreicht. Der Aufbau des Halters der Kugel vor dem Strahlrohr geht aus Abbildung 3.2 hervor. Die Bestrahlung erfolgte am Saturne Synchrotron des LNS/Saclay im Jahre 1992. Die Eisenkugel war mit radialen Bohrungen versehen, in denen insgesamt mehr als 870 Targetfolien untergebracht waren. Dabei sollte die Produktionsrate von kosmogener Radionukliden in ausgewählten Targetelementen in Abhängigkeit von der Lage des Targets in der Kugel experimentell bestimmt werden. Einzelheiten zum Experiment finden sich in [MIC96], [LEY97], [LEY00b].

Im Rahmen dieser Arbeit wurden fünf Nickel- und drei Eisenfolien aufgearbeitet, die sich in verschiedenen Tiefen in der Kugel befanden (Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Analytierte Proben aus der Eisenkugel des Experiments LNS172A

Probenbezeichnung	Tiefe der Probe im Modellmeteoroid [cm]	Probenmaterial	Masse [mg]
FE048F	6,24	Fe	329,69
FE058F	7,61	Fe	329,65
FE078F	9,75	Fe	341,00
NI016F	0,84	Ni	381,25
NI026F	2,39	Ni	380,15
NI038F	4,63	Ni	378,64
NI059F	8,02	Ni	381,94
NI078F	9,86	Ni	382,15

3.3.2 Aufarbeitung der Fe-Folien

Die Eisenfolien wurden in je 25 ml konz. HNO_3 , der je 3 mg Al-, Be-, Mn- und Ni-Träger sowie 20 mg Ca-Träger zugesetzt wurden, gelöst. Nach dem Eindampfen wird der Niederschlag mit 5 M-HCl aufgenommen. Da im Unterschied zu den Meteoritenproben sehr hohe Eisenkonzentrationen vorliegen, die die Kapazität der Anionenaustauschersäule übersteigen würden, wurde diese Lösung dreimal mit je 20 ml Methylisobutylketon (MIBK) ausgeschüttelt, um Eisen durch Extraktion abzutrennen.

Die ausgeschüttelten Lösungen wurden eingedampft und in 2 ml 10 M-HCl aufgelöst. Diese Lösung enthielt bis auf Eisen sämtliche relevanten Elemente und konnte wie Meteoritenproben [MER99] durch Anionen- und Kationen-Austauschchromatographie aufgearbeitet werden (Abbildung 3.1).

3.3.3 Aufarbeitung der Ni-Folien

Da kein Eisen, sondern Nickel als Matrixelement vorliegt, muss Eisen in Form von Trägerlösung zugegeben werden, um später ^{60}Fe abtrennen zu können. Andererseits war die Zugabe von Ni-Träger entbehrlich. Daher wurden 20 mg Ca-Träger, und je 3 mg Al-, Be-, Mn- und Fe-Träger zu 25 ml konz. HNO_3 zugegeben, worin die Ni-Folien aufgelöst wurden.

Das in sehr großen Konzentrationen vorliegende Matrixelement Nickel wurde beim anschließenden Anionenaustausch ohnehin als erstes von der Säule eluiert, weswegen auf eine vorherige Abtrennung verzichtet werden konnte. Die Lösung wurde somit eingedampft, der Rückstand in 2 ml 10 M-HCl gelöst und behandelt wie eine Meteoritenprobe (Abbildung 3.1).

3.4 Präparation der AMS-Proben

Sind die einzelnen Radionuklide durch die angewendeten Trennungsgänge getrennt worden, so wird das geeignete Probenmaterial für die Ionenquelle der AMS-Anlagen präpariert. Die geeigneten chemischen Formen dafür sind, bis auf ^{41}Ca -Messungen, die Oxide (Tabelle 3.2):

Tabelle 3.2: Geeignete chemische Formen für die Messung verschiedener langlebiger Radionuklide mittels AMS

Nuklid	Verbindung
^{10}Be :	BeO
^{26}Al :	Al_2O_3
^{41}Ca :	CaH_2 bzw. CaF_2 (je nach AMS-Anlage)
^{53}Mn :	MnO_2
^{60}Fe :	Fe_2O_3

Im Folgenden wird die Darstellung dieser Substanzen sowie die Art und Befüllung des Probenhalters beschrieben. Ni wurde im Rahmen dieser Dissertation zwar auch abgetrennt, die Konzentrationen des Radionuklids ^{59}Ni jedoch nicht bestimmt. Die Lösungen wurden für spätere Untersuchungen archiviert.

3.4.1 BeO

Das Radionuklid ^{10}Be wurde an der AMS-Anlage der ETH Zürich gemessen. Die Probensubstanz ist BeO. Die Darstellung erfolgte nach der Abtrennung von Be durch Eindampfen der Be enthaltenden Lösungen, dreimaligem Abrauchen des Rückstands mit HF und einmaligem Abrauchen mit HNO_3 . Danach wurde der Rückstand in 3 ml 1 M-HCl gelöst. Aus dieser Lösung wurde dann durch einige Tropfen 25 %iger, wässriger Ammoniaklösung $\text{Be}(\text{OH})_2$ gefällt. Das Hydroxid wurde dreimal mit bidest. H_2O gewaschen und dann über Nacht getrocknet. Das so getrocknete Gel wurde in selbst geblasene Quarzröhrchen mit 5 mm Durchmesser und ca. 20 mm Länge eingefüllt und im Ofen 20 min bei 900°C zum Oxid geglüht. Jedes dieser Röhrchen wurde zur Vermeidung von Crosskontaminationen nur einmal verwendet.

Das Oxid wurde dann im Achatmörser mit der fünf- bis zehnfachen Menge Cu-Pulver verrieben und mit einem Stahlstift in den Probenhalter (Abbildung 3.3) unter Zuhilfenahme eines Hämmerchens eingepresst. Der Probenhalter wurde dazu so in eine Vorrichtung eingespannt, dass der Boden der Bohrung auf einem Stahlplättchen auflag, welches die Bohrung verschloss. Dieses Plättchen wurde bei jeder Befüllung gewechselt, um Crosskontaminationen zu vermeiden.

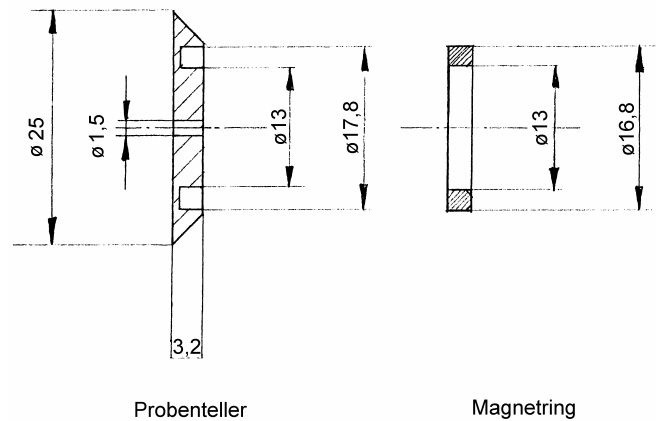


Abbildung 3.3: Querschnitt durch den Probenhalter zur Verwendung in der AMS-Anlage der ETH-Zürich (vereinfacht). Der Probenteller besteht aus Elektrolytkupfer, der Magnetring aus magnetischem Stahl. Der Magnetring wird auf den Kupferteller aufgeschraubt und erlaubt einen automatisierten Probenwechsel mittels eines Magnetarms. Alle Maße in mm.

3.4.2 Al₂O₃

Auch die Messungen von ²⁶Al erfolgten an der AMS-Anlage der ETH-Zürich. Die Darstellung des Al₂O₃ erfolgt ganz analog zu der des Berylliumoxids. Die Aluminiumhaltigen Lösungen wurden eingedampft, mit HNO₃ abgeraucht, und in 3 ml 1 M-HCl aufgenommen. Daraus wurde mit einigen Tropfen konz. Ammoniaklösung Al(OH)₃ gefällt, welches nach dreimaligem Waschen mit bidest. H₂O über Nacht bei 70°C getrocknet und anschließend bei 900°C zum Al₂O₃ geglüht wurde. Dieses Oxid wird im Massenverhältnis 1:5 bis 1:10 mit Cu-Pulver im Achat-Mörser vermischt und in den Probenhalter eingepresst.

3.4.3 CaO

Die Messungen von ⁴¹Ca der Dicktarget-Proben wurden an der AMS-Anlage der ETH Zürich durchgeführt. Da die Unterdrückung des zu ⁴¹Ca Isobaren ⁴¹K durch Sputtern am CaH₂ am effektivsten ist, wird dieses, trotz seiner problematischen Handhabung (Zersetzung mit Wasser) als Targetsubstanz der Ionenquelle verwendet.

CaO wurde im Rahmen dieser Arbeit präpariert und zum Beschleunigerlabor versandt, wo die Weiterverarbeitung zum CaH₂ erfolgte. Die Darstellung des CaO aus den Calciumhaltigen Lösungen erfolgt durch Fällen als CaC₂O₄ aus den eingengten Calcium- und Nickelhaltigen Lösungen der Trennungsgänge mit einigen Tropfen gesättigter ammoniakalischer (NH₄)₂C₂O₄-Lösung.

Nach dreimaligem Waschen des Oxalat-Niederschlags mit bidest. H₂O wird dieser zunächst bei 70°C getrocknet und schließlich bei 900°C zum Oxid geglüht.

3.4.4 CaF₂

Da die AMS-Anlage der TU-München mit höheren Beschleunigungsspannungen arbeitet, kann CaF₂ als Probenmaterial in der Ionenquelle verwendet werden. Dabei ist zwar die Unterdrückung des störenden Isobars ⁴¹K in der Ionenquelle schlechter, dies ist jedoch wegen der höheren Ladungszustände, die bei der anschließenden Beschleunigung erreichbar sind, vertretbar. Die Meteoritenproben wurden wegen der

mit der höheren Beschleunigungsspannung einhergehenden höheren Empfindlichkeit daher an der AMS-Anlage der TU-München gemessen.

Die Darstellung des CaF_2 erfolgte aus den Ca- und Ni-haltigen Lösungen durch Fällung mit einigen Tropfen 48 %iger HF. Nach dem Abzentrifugieren wurde der CaF_2 -Niederschlag dreimal mit bidest. H_2O gewaschen, zunächst über Nacht bei 70°C und zuletzt für 2 h bei 140°C getrocknet. Im Zentrifugat befindliches Ni wurde für spätere ^{59}Ni -Analysen archiviert.

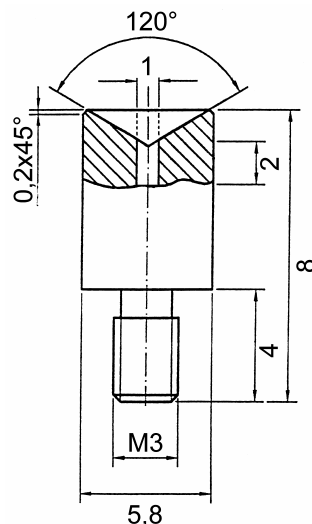


Abbildung 3.4: Probenhalter für die Ionenquelle der AMS-Anlage der TU-München. Das Material ist Silber (99,99 %) für die ^{53}Mn -Messungen und Elektrolyt-Kupfer für die ^{41}Ca -Messungen. Alle Maße in mm.

Der in der AMS-Anlage der TU-München verwendete Probenhalter ist in Abbildung 3.4 abgebildet. Im Falle der ^{41}Ca -Messung bestand dieser aus Elektrolytkupfer. Das CaF_2 wurde vor dem Einpressen mit einem Stahlstift mit Ag-Pulver (99,99 %) im Massenverhältnis von ca. 1:10 im Achatmörser zerrieben.

3.4.5 MnO_2

Für ^{53}Mn -Messungen war Braunstein das Probenmaterial der Wahl, weil es leicht MnO^- -Ionen bildet. Zur Präparation wurden die Mn-haltigen Lösungen eingedampft, der Rückstand mit HNO_3 abgeraucht und in 3 ml 1 M-HCl aufgenommen. Die Fällung von Braunstein erfolgte mit einigen Tropfen konz. NH_3 in der Siedehitze, nachdem einige ml ges. KClO_3 -Lösung hinzu gegeben worden waren.

Da im Vergleich zur Messung anderer Nuklide bei der Messung des ^{53}Mn die größten Schwierigkeiten der Isobarenunterdrückung auftreten (^{53}Cr), ist die Qualität der chemischen Abtrennung des Cr besonders wichtig. Um Chrom-Kontaminationen auszuschließen wurde der Braunstein nicht mit einem Metallpulver zerrieben. Es musste auch darauf geachtet werden, chromfreie Stahlstifte zum Pressen des Braunsteins in den Probenhalter zu verwenden, damit der Abrieb beim Pressen die Probe nicht mit ^{53}Cr kontaminiert. Der Halter besteht im Falle der ^{53}Mn -Messung aus Reinstsilber (99,99 %).

3.4.6 Fe₂O₃

Zur Präparation des Eisenoxids wurden die Fe-haltigen Lösungen eingeeengt und Fe(OH)₃ mit Hilfe einiger Tropfen konz. Ammoniaklösung ausgefällt. Nach dem Abzentrifugieren wurde das Hydroxid zunächst über Nacht bei 70 °C im Trockenschrank getrocknet, anschließend in Quarz-Gläschen gefüllt und bei 200 °C für 20 min erhitzt. Das so gewonnene Fe₂O₃ wurde anschließend mit der 5- bis 10-fachen Masse Ag-Pulver (99,99 % Ag) im Achatmörser verreiben und in den Probenhalter (99,99 % Ag) eingepresst

3.5 AMS-Messungen

Die Proben wurden an zwei Anlagen gemessen: Die ^{10}Be - und ^{26}Al -Messungen, sowie die ^{41}Ca -Messungen fanden an dem Tandembeschleuniger in Zürich (ETH Zürich/ Paul Scherrer Institut) statt, die ^{53}Mn -Messungen und ^{60}Fe -Messungen am Tandembeschleuniger der TU-München.

3.5.1 Messprinzip der AMS

Massenspektrometrie ist ein Verfahren, welches Ionen nach Ihrer Masse trennt. Bei der Beschleuniger-Massenspektrometrie (**Accelerator-Mass-Spectrometry**: AMS) ist ein Teilchenbeschleuniger Teil des Massenspektrometers. Sie wurde erstmals zur Messung des natürlichen $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis eingesetzt [ALV39], dann aber zwischenzeitlich kaum genutzt, bis sie in den 70er Jahren durch Muller für die ^{14}C -Datierung wieder verwendet wurde [MUL77].

Konventionelle Massenspektrometer haben eine Auflösung von $\Delta m/m \approx 10^{-6}$, was für eine Isobarentrennung bei leichten und mittelschweren Kernen ausreichen würde [$\Delta m/m(^{10}\text{Be}/^{10}\text{B}) = 5 \cdot 10^{-5}$]. Die hochsensitive Erfassung von Nukliden mit Verhältnissen bis hinab zu $1:10^{16}$, ist nur durch einen sehr niedrigen Untergrund, d.h. eine extreme Unterdrückung von Störisobaren möglich (1 ng einer Kontamination entspräche z.B. etwa 10^{13} Teilchen, d.h. der etwa 10^4 -fachen Teilchenmenge des zu messenden Teilchens in typischen Proben!). In konventionellen Massenspektrometern würde dies sehr geringe Schlitzbreiten erfordern, die mit einer entsprechend geringen Transmission einhergehen würden. Da in den Proben aber extrem geringe Mengen des zu messenden Nuklids vorliegen, ist eine starke Verschlechterung der Transmission jedoch nicht hinzunehmen.

Die Unterdrückung von Störisobaren wird bei der AMS durch die Kombination verschiedener Maßnahmen erreicht. So können bestimmte Ionen durch die Extraktion negativer Ionen aus der Probe selektiert werden. Dazu wird die Probe mit Cs^+ -Ionen mit einer Energie von einigen keV beschossen. Dabei werden in der Probe negative Ionen gebildet, die dann beschleunigt werden. Eine solche Ionenquelle bezeichnet man als Sputterionenquelle. Bei der Extraktion von $^{41}\text{CaH}^{3-}$ z.B. kann das isobare $^{41}\text{KH}^{3-}$ nicht erzeugt werden, da es instabil ist. Auch bei den Isobaren ^{26}Al und ^{26}Mg erreicht man auf diese Weise eine Unterdrückung des Störisobars, es wird Al^- extrahiert, Mg^- bildet sich nicht.

Sputterionenquellen lassen sich auch in konventionellen Massenspektrometern einsetzen, jedoch wird die hohe Empfindlichkeit der AMS erst durch Verwendung weiterer Isobaren-Separationsschritte zur erreicht. Will man z.B. $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisse von einigen 10^{-15} bestimmen, wie sie in etwa 50000 a alten Proben vorliegen können, so können zwar sowohl das stabile Isobar ^{14}N , als auch höher geladene Ionen mit mehrfacher Ladung durch die Verwendung negativer Ionen unterdrückt werden, nicht jedoch Molekülionen der Masse von ^{14}C wie $^{12}\text{CH}_2^-$ oder $^{13}\text{CH}^-$.

Die Unterdrückung des molekularen Untergrundes wird erst durch die Verwendung eines Strippers möglich, der hoch beschleunigte Molekülionen in einem Gasvolumen oder einer dünnen Folie durch Coulombexplosionen aufbricht. Coulombexplosionen kommen durch Abstreifen von Elektronen aus einem Molekül zustande. Der hoch

positiv geladene Molekülrest bricht auf. Somit wird eine anschließende magnetische Separation möglich. Da dabei ein Umladungsprozess (negative Ionen werden positiv geladen) stattfindet, kann eine erneute Beschleunigung der Ionen am gleichen elektrischen Potenzial stattfinden (Tandem-Beschleuniger).

Die dadurch erreichten Teilchenenergien sind so hoch, dass eine kernphysikalische Teilchenidentifizierung in $\Delta E/E$ -Detektoren möglich wird, wodurch die Empfindlichkeit weiter gesteigert werden kann. Meist werden Gasionisationskammern verwendet, die zwei wichtige Vorteile besitzen. Einerseits sind sie unempfindlich gegen Strahlenschäden, andererseits lassen sie sich flexibel durch Veränderung des Gasdrucks optimal für die Messung verschiedener Teilchen anpassen. Der allgemeine Aufbau einer AMS-Anlage setzt sich somit aus den in Abbildung 3.5 gezeigten Komponenten zusammen.

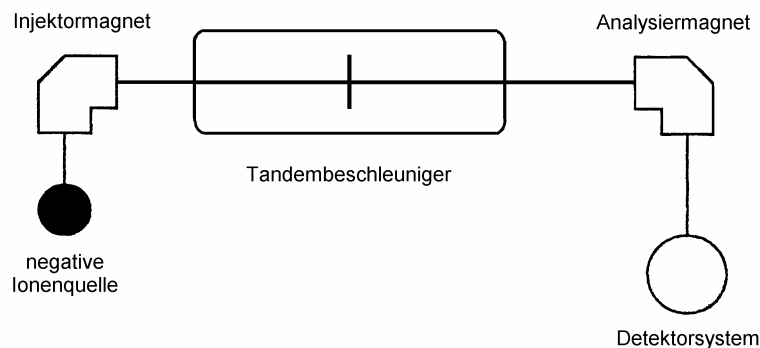


Abbildung 3.5: Schematischer Aufbau einer AMS-Anlage (nach [KNI01]). Nach einer ersten Analyse der negativen Ionen im Injektormagnet gelangen diese in den Beschleuniger und verlieren am Stripper (senkrechter Balken in der Mitte des Beschleunigers) einen Teil Ihrer Elektronen. Moleküle brechen hierbei durch Coulombexplosionen auf. Im Analysiermagneten wird ein bestimmter Ladungszustand des zu messenden Isotops ausgewählt. Im Detektorsystem sollen diese Teilchen dann selektiv registriert werden.

Besondere Detektionssysteme sind insbesondere für die Messung schwererer Isotope erforderlich. Die praktisch ubiquitären Isobaren ^{36}S , ^{53}Cr , ^{59}Co und ^{60}Ni der Radionuklide ^{36}Cl , ^{53}Mn , ^{59}Ni und ^{60}Fe sind wie die Radionuklide in der Lage negative Ionen zu bilden. Somit gelangen sie bei gleicher Ladung auf der Hochenergie-Seite des Beschleunigers wie das zu bestimmende Isotop durch das magnetische und elektrostatische System bis in den Detektor, da deren magnetische Steifigkeit praktisch gleich der des zu messenden Isotops ist.

Bewegt sich jedoch ein Ion durch ein Gas, so stellt sich aufgrund von Stoßionisationsprozessen ein mittlerer Ladungszustand ein. Dieser mittlere Ladungszustand eines Ions im Gas ist abhängig von der Kernladungszahl.

Die Kernladungsabhängigkeit des mittleren Ladungszustands bei der Wechselwirkung eines bewegten Ions im Gas lässt sich verstehen, wenn man z.B. das Isobarenpaar ^{10}B und ^{10}Be betrachtet. Bor besitzt im Gegensatz zum Beryllium ein p-Elektron in seiner Elektronenhülle. Da dieses einen größeren Bahnradius als die s-Elektronen besitzt, ist dessen Orbitalgeschwindigkeit geringer, so dass es mit größerer Wahrscheinlichkeit im Gas gestrippt wird, als das Außenelektron vom Beryllium. Der mittlere Ladungszustand des Bors ist also höher und damit auch der differentielle

Energieverlust. Bei schwereren Ionen können andere Effekte, wie z.B. die höhere Bindungsenergie in Atomen mit höherer Kernladungszahl überwiegen, so dass diese Überlegung nicht immer streng gültig ist. Auch müssen in schwereren Atomen Orbitalwechselwirkungen berücksichtigt werden. Schließlich ist der differentielle Energieverlust auch von der Energie des Ions im Gas abhängig.

Wegen der Abhängigkeit des differentiellen Energieverlustes von der Kernladungszahl können in einer Gasionisationskammer Teilchen gleicher Masse, aber verschiedener Kernladungszahl getrennt detektiert werden.

Vom mittleren Ladungszustand eines bewegten Ions in einem Gas hängt auch die magnetische Steifigkeit dieses Ions in einem Magnetfeld ab. Isobare Ionen verschiedener Kernladungszahl erfahren deshalb in einem gasgefüllten Magneten unterschiedliche Ablenkungswinkel. Dies kann ausgenutzt werden, um eine Ortsauflösung von Isobaren Ionen zu erreichen.

Für die Messung der leichteren Nuklide ^{10}Be und ^{26}Al ist eine Trennung mit einem solchen gasgefüllten Magnetsystem nicht erforderlich, weswegen diese Ionen auch sehr gut an der AMS-Anlage der ETH Zürich gemessen werden können, wo der gasgefüllte Magnet nicht routinemäßig verwendet wird. Die Trennung von Isobaren erfolgt hier ausschließlich im $\Delta E/E$ -Detektor, der als Gasionisationskammer ausgebildet ist.

Weitere und detaillierte Angaben zur AMS-Technik und zu modernen Anwendungsbeispielen finden sich z.B. in [YIO90], [SYN92], [FIN93], [FIF94], [SYN95], [BAL95], [KUB96], [JUL97], [KNI97] und [BAL99].

3.5.2 AMS-Anlage der ETH Zürich

Aus Abbildung 3.6 geht der schematische Aufbau der Anlage hervor. Kernbestandteil der Anlage ist der Tandem-Beschleuniger. Es handelt sich hierbei um eine Van-de-Graaff-Maschine mit einer maximalen Terminalsplannung von 6 MV.

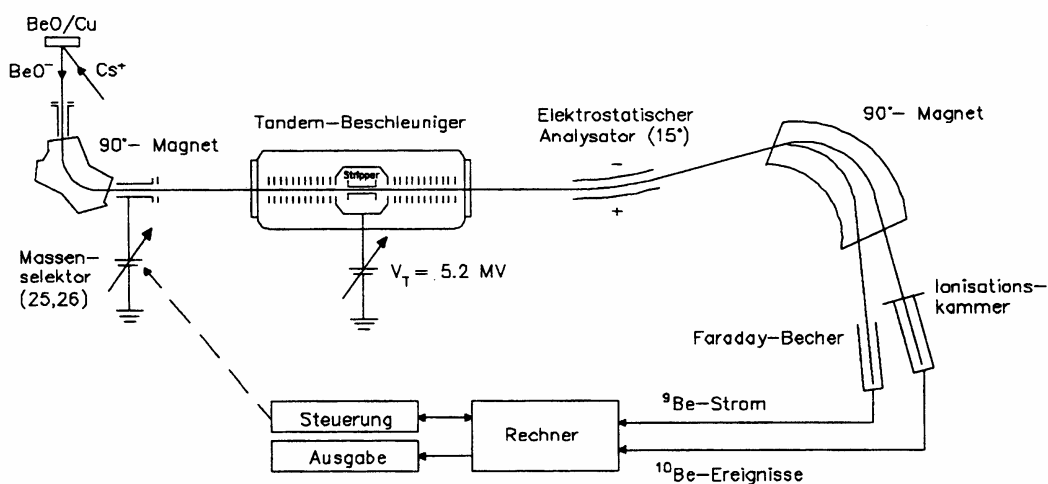


Abbildung 3.6: Schema der AMS-Anlage der ETH Zürich

Die Anlage besteht im Wesentlichen aus 6 Separationsstufen:

1. Ionenquelle
2. 90° Quellmagnet
3. Beschleuniger mit Stripper
4. Elektrostatischer Analysator
5. 90°-Analysator
6. Ionisationskammer

Sehr vorteilhaft ist die bei dieser Anlage vorhandene Möglichkeit, den Strom des stabilen Isotops (^9Be , ^{27}Al bzw. ^{40}Ca) parallel zur Detektion des Radionuklids messen zu können. Das stabile Isotop wird durch Hochspannungsimpulse derart beschleunigt, dass es den Quellmagnet passieren kann. Im Analysator wird der Teilchenstrom dann wieder aufgetrennt und Strommessung sowie ^{10}Be -Detektion quasiparallel vorgenommen. Genauere Einzelheiten zur Anlage gehen aus [SYN97] hervor.

An der Anlage der ETH-Zürich wurden im Rahmen dieser Arbeit drei Messreihen durchgeführt:

- ^{10}Be -Messungen
- ^{26}Al -Messungen
- ^{41}Ca -Messungen

Einzelheiten zu den Messungen werden in den folgenden Abschnitten dargelegt.

^{10}Be -Messungen

Insgesamt wurde während 6 Strahlzeit-Terminen gemessen. Es wurden immer 6-8 Proben im Rahmen eines zusammengehörigen „Sets“ parallel aufgearbeitet. Mindestens eine der Proben stammt von dem Intra-Laboratoriumsstandard der Abteilung Nuklearchemie (Meteorit Dhurmsala). Das gemörserte und homogenisierte Material stammt ursprünglich aus dem Zentrum für Strahlenschutz und Radioökologie der Universität Hannover und wurde dort zuerst zur Qualitätskontrolle eingesetzt, später wurde das Material auch von der Abteilung Nuklearchemie genutzt [SCH02]. Eine weitere Probe die mitgemessen wurde, bestand aus Blankmaterial. Der Blank ist eine Probe, die ausschließlich aus Trägermaterial besteht, aber dem kompletten chemischen Trennungsgang unterliegt und somit hilft, evt. Kontaminationen aufzudecken.

Als Standard wurde der Züricher Hausstandard S555 benutzt, der ein Sekundärstandard vom Originalmaterial ist, das zur Bestimmung der Halbwertszeit von ^{10}Be von 1,51 Ma [HOF87] diente. Das Nominalverhältnis $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ beträgt: $9,55 \cdot 10^{-11}$ [KUB01]. Die Terminalspannung wurde auf 6 MV eingestellt, was bei einem selektierten Ladungszustand von +3 auf der Hochenergieseite zu einer Teilchenenergie von 18 MeV führt. Der Strahlstrom auf der Niederenergieseite betrug 800 bis 1000 nA. Als Stripper diente Ar-Gas.

²⁶Al-Messungen

Die ²⁶Al-Proben wurden aus denselben Sets präpariert, wie auch die ¹⁰Be-Proben. Da die ²⁶Al nicht so häufig wie ¹⁰Be gemessen wird, wurden insgesamt nur zwei Strahlzeiten in Anspruch genommen. Wie bei den ¹⁰Be-Proben erfolgte auch hier eine regelmäßige Messung von Dhurmsala- und Blankproben, um systematische Abweichungen und Kontaminationen aufzuspüren. Die Terminalspannung betrug 6 MV, es wurden Ladungszustände von +3, +5 und +7 gewählt, die Strahlströme auf der Niederenergieseite betragen 80-200 nA. Als Stripper wurde eine C-Folie verwendet.

Als Standard diente der Züricher Hausstandard ZAL94 mit einem Nominalverhältnis $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 509 \cdot 10^{-12}$, der an den Standard Al09 [SAR85] angeeicht worden ist [KUB01].

⁴¹Ca-Messungen

Die Proben zur Bestimmung der Produktionsraten von ⁴¹Ca wurden ebenfalls an der AMS-Anlage der ETH Zürich gemessen. Die Herstellung des Probenmaterials CaH₂ für die Ionenquelle erfolgte aus im Rahmen dieser Arbeit präpariertem CaO im Institut für Teilchenphysik der ETH Zürich. CaO wurde dort durch Reduktion mit zuerst Zr und dann H₂ ins Calciumhydrid überführt [FIN90]. Dieses wurde ohne weitere Zusätze in den Probenhalter (Abbildung 3.3) gepresst.

Die Terminalspannung wurde zwischen 5 MV und 6 MV eingestellt, die ausgewählten Ladungszustände waren +7, +5 und +4, der Strahlstrom auf der Niederenergieseite lag um 400 nA. Es wurde der Standard JUEL mit einem ⁴¹Ca/⁴⁰Ca-Verhältnis von $(1,04 \pm 0,08) \cdot 10^{-9}$ verwendet. Der Standard ist eine Verdünnung aus von B. Dittrich-Hannen im Forschungszentrum Jülich bestrahltem Material [DIT96]. Die Verdünnung des primär bestrahlten Materials liegt im Bereich 10⁻⁵, es erfolgte eine spätere Korrektur dieses Faktors um 3 % [SCH02]. Weitere Angaben zur Messung siehe bei [SCH03a].

3.5.3 AMS-Anlage der TU-München

Für die Messungen der ⁵³Mn-Proben stellte uns die GAMS-Gruppe der TU-München Strahlzeit zur Verfügung. Die Messung dieses schwereren Nuklids erfordert ein aufwendigeres Detektorsystem, da die Unterdrückung des Isobaren Nuklids ⁵³Cr messtechnisch schwieriger zu realisieren ist. Außerdem sind dafür Ladungszustände und damit Energien notwendig, die der Tandem-Beschleuniger der ETH-Zürich nicht erreichen kann.

Kernbestandteil ist auch bei dieser Maschine ein Van-de-Graaff-Tandembeschleuniger, der allerdings mit Terminalspannungen von bis zu 15 MV betrieben werden kann. Das Besondere an dieser Anlage ist das Detektorsystem. Es besteht aus einer Ionisationskammer, in der die eigentliche Detektion stattfindet, vorgeschaltetem 135° Magnet, der mit 7 mbar Stickstoff gefüllt ist. Die Isobarentrennung findet hierin durch die Einstellung eines von der Kernladungszahl abhängigen mittleren Ladungszustands statt, der im Magnetfeld zu einer Trennung im Ort führt.

Damit stehen folgende Stufen zur Isobarenunterdrückung zur Verfügung:

1. Ionenquelle
2. 90° Quellmagnet
3. Beschleuniger mit Stripper
4. Wienfilter (Kombination von senkrecht zueinander stehendem magnetischem und elektrischem Feld)
5. 90°-Analysator
6. Gasgefüllter 135°-Magnet
7. Ionisationskammer

Der gasgefüllte Magnet ist gerade für die Messung von ^{53}Mn von besonderer Bedeutung, da mit dem in dieser Arbeit verwendeten Verfahren zur chemischen Aufarbeitung von Meteoritenproben ^{53}Cr chemisch nicht genügend abgetrennt werden kann. Außerdem wird in der Ionenquelle CrO^- ebenso wie MnO^- gebildet, weswegen ^{53}Cr auch in das Strahlführungssystem der Anlage eintreten kann. Ebenso sind aufgrund der geringen Massendifferenz weder der auf den Beschleuniger folgende Wienfilter noch der 90°-Analysiermagnet in der Lage dieses Isobar abzutrennen. Der wirksame Trennungsschritt ist daher der gasgefüllte Magnet.

Ein Nachteil gegenüber der Anlage der ETH Zürich ist die fehlende Möglichkeit stabiles Nuklid und Radionuklid quasiparallel messen zu können. Man kann durch Spannungsimpulse nicht beide Nuklide parallel durch das Strahlführungssystem fädeln, so dass dies durch manuelle Umschaltung der Magnetfelder und Hochspannungen des Strahlführungssystems geschehen muss.

^{53}Mn -Messungen

In der Ionenquelle wurde aus Braunstein durch Sputtern mit Cs^+ -Ionen der Energie 6 keV MnO^- extrahiert. Der Strahlstrom auf der Niederenergieseite betrug 20 - 140 nA, typischerweise um 70 nA. Für die Messungen wird bei einer Terminal-Spannung von 13 MV ein Ladungszustand von +10 auf der Hochenergieseite ausgewählt. Als Stripper dient eine C-Folie. Vor Beginn der Messung, in der Mitte der Messzeit und am Schluss der Messung wurde das Strahlführungssystem auf das stabile Nuklid ^{55}Mn umgeschaltet, um den Strahlstrom messen zu können.

Als Standard diente eine Probe des Eisen-Meteoriten Grant, deren Nominalverhältnis durch Kalibration an einen Hausstandard zu $^{53}\text{Mn}/^{55}\text{Mn} = (3,13 \pm 0,16) \cdot 10^{-9}$ bestimmt wurde.

^{60}Fe -Messungen

Probenmaterial ist Fe_2O_3 , aus diesem werden durch Sputtern mit Cs^+ -Ionen FeO^- -Ionen extrahiert. Der Strahlstrom betrug auf der Niederenergie-Seite etwa 1 μA , am Detektor 40 nA. Zur Messung wurde der Ladungszustand +11 bei 12,9 MV Tandemspannung ausgewählt. Stripper war eine C-Folie, wie bei den ^{53}Mn -Messungen.

Als Standard wurde der Münchener Hausstandard verwendet, der über eine $^{48}\text{Ca}(^{18}\text{O}, \alpha 2n)^{60}\text{Fe}$ dargestellt wurde. Dabei wurde durch die Messung prompter γ 's die gebildete ^{60}Fe -Menge quantifiziert [SCH96]. Der Standard hat ein $^{60}\text{Fe}/\text{Fe}$ -Verhältnis

von $1,04 \cdot 10^{-11}$. Ansonsten wird weltweit nur ein einziger weiterer Standard von einem Teil der Probe verwendet, die von Kutschera et al. [KUT84] zur Halbwertszeitbestimmung vom ^{60}Fe verwendet wurde [KNI03].

3.6 γ - γ -Koinzidenzspektroskopie

Die γ - γ -Koinzidenzspektroskopie kann ergänzend zu AMS-Messungen von ^{26}Al angewendet werden. Sie ist schon seit mehreren Jahrzehnten etabliert [HER67] [HEY67] [FUS69] [HER69] [ALT00]. Dabei werden nur Ereignisse gezählt, die in zwei gegenüberliegenden, in Koinzidenz geschalteten Detektoren innerhalb eines Zeitfensters von $1\ \mu\text{s}$ registriert werden. Die Probe befindet sich dabei in der Mitte zwischen beiden Detektoren. Die ausschließliche Registrierung koinzidenter Signale reduziert den Untergrund drastisch. Auf diese Weise lässt sich die Vernichtungsstrahlung eines Positron-Elektron-Paares registrieren.

Der Vorteil dieses Messverfahrens ist, zerstörungsfrei messen zu können. Sehr häufig wird dieses Verfahren daher zur Klärung einer extraterrestrischen Herkunft einer Gesteinsprobe verwendet. Der Nachteil ist hingegen zum einen, dass eine große Probenmenge erforderlich ist ($> 10\ \text{g}$). Das macht lediglich Bulk-Messungen möglich, nicht hingegen das gezielte Messen einer bestimmten Lokation eines Meteoriten. Zum anderen dauern die Messungen mehrere Wochen, um eine ausreichende Anzahl an Zerfallsereignissen zu gewinnen.

3.6.1 Durchführung der Messung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden γ - γ -Koinzidenzmessungen einer Probe des Meteoriten Morávka durchgeführt. Da zwischen dem Fall dieses Meteoriten (06.05.2000 [NED01]) und der Analyse eine Zeit von rund 1,5 a lag, waren sämtliche β^+ -instabilen Nuklide, die durch die Einwirkung kosmischer Strahlung im Meteoroiden in nennenswerter Weise gebildet werden, bis auf ^{26}Al und ^{22}Na zerfallen. Eine Koinzidenzmessung der Positronenvernichtungsstrahlung ergab daher die Summe der Aktivitäten beider Nuklide.

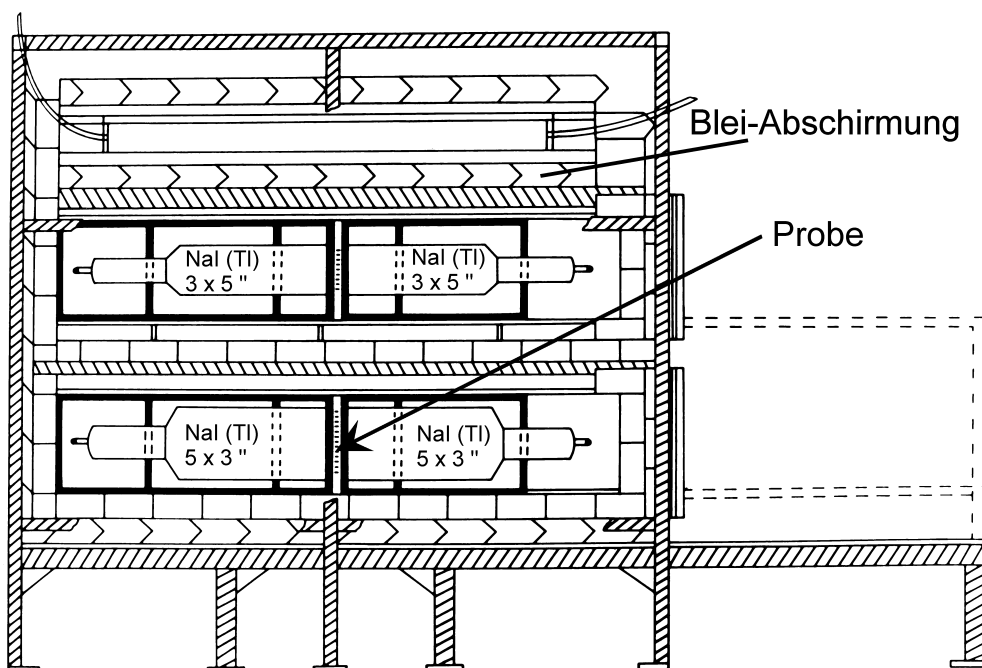


Abbildung 3.7: Querschnitt durch den experimentellen Aufbau der Koinzidenz-Apparatur. Im Rahmen dieser Arbeit wurde lediglich die untere Detektor-Kombination verwendet.

Die Probe hatte eine Masse von 96,6 g. Die Messung erfolgte in einer gut abgeschirmten Apparatur, in der zwei 3x5" NaI(Tl)-Detektoren gegenüber angebracht sind. Dazwischen wurde die Probe in einer reproduzierbaren Art und Weise in Plexiglashalterungen eingespannt (Abbildung 3.7). Die Abschirmung bestand aus 25 cm dicken Blei-Wänden. Die Apparatur selbst steht im Tiefkeller der Abteilung Nuklearchemie (Tiefe etwa 10 m unter der Erde), und dieser wiederum ist mit einer 1,5 m dicken Barytbetondecke überbaut. Diese Maßnahmen sollen den Untergrund durch hochenergetische Partikel der kosmischen Strahlung möglichst herabsetzen

Um Kontaminationen vorzubeugen wurde die Probe zunächst in PE-Folie eingewickelt. Danach wurde sie zwischen den Detektoren befestigt. Die Verstärker und Fensterdiskriminatoren der beiden Szintillationsdetektoren wurden auf 511 keV-Annihilationsenergie eingestellt und in Koinzidenz geschaltet.

Die Messung verlief wegen der geringen Zählraten über mehrere Wochen. Dabei wurde zwischenzeitlich immer die Efficiency der Anlage überprüft und gegebenenfalls auf maximale Zählrate des Standards justiert. Die Reihenfolge der Messungen war

1. Standardmessung (1-2 h)
2. Probenmessung (24 h)
3. Standardmessung (1-2 h)
4. Untergrundmessung (24-48 h)
5. Weiter bei 1.

Die Standardmessung diente der Überprüfung der Efficiency der Anlage, die Untergrundmessung zur Kontrolle des Untergrundes. Dieser Zyklus wurde sooft gemessen, bis insgesamt 3332 Ereignisse bei der Probenmessung gezählt wurden. Ergab die Messung des ^{26}Al -Standards eine von der vorigen Messung deutlich differierende Zählrate ($> 20\%$), so wurde die Messung wiederholt. Blieb die Differenz bestehen, so musste die Anlage neu auf maximale Zählrate des ^{26}Al -Standards justiert werden (67 Impulse/min). Der Zählrate des Untergrundes blieb über den gesamten Messzeitraum konstant.

Anschließend wurde der Geometriefaktor zwischen Meteorit und punktförmigen Standard experimentell bestimmt. Dazu wurden zunächst drei geringe Aktivitäten (im mBq-Bereich) verdünnter n.c.a.- ^{22}Na -Lösung in derselben Geometrie, wie der ^{26}Al -Standard („punktförmig“) gemessen. Durch die mit der höheren Aktivität einhergehenden kürzeren Messzeit, musste der oben beschriebene Mess-Durchlauf nur einmal durchgeführt werden (Punkt 5 entfiel).

Dann wurde jede dieser Lösungen in drei Dummy-Meteoriten mit möglichst gleicher Form, Größe und Gewicht wie die vorliegende Probe verteilt. Die Dummies wurden aus Zement, Sand 25 % Fe-Spänen und Wasser so geformt, dass deren Form dem des Meteoriten entsprach. Daraus ergab sich ein Korrekturfaktor zwischen den Zählraten in „punktförmiger“ Geometrie und Proben-Geometrie. Somit kann dann aus dem Verhältnis zwischen der Zählrate des Standards und der des Meteoriten die spezifische Aktivität des Meteoriten bestimmt werden.

Um die Konzentrationen der Nuklide ^{22}Na und ^{26}Al im Meteoriten zueinander in Beziehung setzen zu können, wird auf herkömmliche γ -Spektrometrie mit einem GeLi-Detektor zurückgegriffen. Dazu wird die Meteoriten-Probe mit 0,5 mm Abstand zentral auf den Detektorkopf gelegt und etwa $3\frac{1}{2}$ Wochen gemessen. Die Messungen wurden dabei in 9 Einzelmessungen unterteilt, um die Linearität der Zunahme der Ereignisse pro Kanal über den gesamten Messzeitraum zu überprüfen (die Linearität ist eine Folge der gegenüber der Messzeit sehr langen Halbwertszeit der Aktivitäten).

Die Detektor-Efficiency wurde für eine punktförmige Quelle mittels Standardquellen (^{152}Eu , ^{22}Na und ^{133}Ba) bei einem Abstand von 11 cm experimentell bestimmt. Die Efficiency ist in der doppelt-logarithmischen Auftragung gegen die Energie im betrachteten Energiebereich (1100 - 1900 keV) eine Gerade mit negativer Steigung. Die Steigung ist unabhängig vom Abstand Probe-Detektor [KUH01]. Somit kann das Verhältnis zweier Aktivitäten in einer Probe aus den sich ergebenden Peakflächen bei einem beliebigen Abstand errechnet werden.

Auf die Auswertung der Messungen wird in Kapitel 3.8.2 eingegangen.

3.7 Prompt-Gamma-Ray-Activation-Analysis (PGAA)

Für die Berechnung theoretischer Produktionsraten mit Hilfe eines physikalischen Modells ist die Kenntnis der Elementzusammensetzung einer Probe erforderlich. An diesen Elementen finden durch die Wechselwirkung mit der galaktischen kosmischen Strahlung Kernreaktionen statt, die die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten langlebigen Radionuklide produzieren. Je genauer daher die Probenzusammensetzung bekannt ist, desto genauer sind auch die Produktionsraten, die mit dem physikalischen Modell berechnet werden. Fehlen chemische Analysen einer auf kosmogene Nuklide untersuchten Probe, muss die mittlere Zusammensetzung der Meteoritenklasse für die Berechnung von Produktionsraten herangezogen werden. Das beeinträchtigt die Genauigkeit der Rechnungen. Deshalb wurden im Rahmen dieser Arbeit chemische Analysen der Proben von Grüneberg und Morávka durchgeführt. Die Messungen erfolgten im Rahmen einer Zusammenarbeit mit P. Kudejova aus der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. J. Jolie im Institut für Kernphysik der Universität zu Köln. Diese Arbeitsgruppe führt schon seit längerer Zeit PGAA-Messungen durch. Durch die PGAA-Messungen war es möglich, die chemische Zusammensetzung der Proben zu bestimmen, in denen auch die kosmogenen Nuklide gemessen wurden.

PGAA ist eine zerstörungsfreie Messmethode (jedoch nicht im Nuklearchemischen Sinne, da durch die Kernreaktionen Radionuklid-Konzentrationen verändert werden), bei der die prompte γ -Strahlung, die durch Neutroneneinfang bei (n,γ) -Reaktionen frei wird, mittels HPGe-Detektoren registriert wird. PGAA eignet sich besonders für die Messung von leichten Elementen, die durch die klassische Neutronenaktivierungsanalyse nicht oder nur schwer zugänglich sind. Besonders interessant für diese Arbeit ist die Möglichkeit einer Bestimmung von O, Al, Si, Na, Mg, Ti, Mn, Fe und Ni, da die Zusammensetzung dieser Elemente in den Meteoriten der Eingabe-Parameter für die verwendeten physikalischen Modellrechnungen ist. Weitere Einzelheiten zum Messprinzip der PGAA finden sich in [BAE03] und Zitate darin.

Die PGAA hat sich zu einem gut erprobten Verfahren für die Bestimmung dieser (und anderer Elemente wie B, Cl, Cr, REE) Elemente in Mineralien, entwickelt [MON98]. Ebenso lassen sich z.B. Bor in wässrigen Lösungen [BAE02] und Spurenelemente in Metallen [KAS00] bestimmen. Bei den Messungen wurden kalte Neutronen zur Aktivierung benutzt. Deren Verwendung hat gegenüber der Verwendung thermischer Neutronen unter anderem folgende Vorteile [LIN95]:

- Der Untergrund der Messung wird durch das Fehlen von schnellen Neutronen und γ -Strahlung drastisch reduziert.
- Da der Wirkungsquerschnitt für (n,γ) -Reaktionen kalter und thermischer Neutronen mit $1/v$ von der Geschwindigkeit abhängt, steigt die Empfindlichkeit bei der Verwendung niederenergetischer Neutronen.
- Durch die Verwendung kalter Neutronen kann ein relativ geringer Fluss verwendet werden, wodurch die Proben nicht nennenswert aktiviert werden. Es finden kaum Konkurrenzreaktionen zum (n,γ) -Prozess statt.

Die Messungen fanden an der Bestrahlungseinrichtung des Budapester Forschungsreaktors (BRR) statt. Einzelheiten zum Aufbau der Bestrahlungseinrichtungen finden sich z.B. in [KAS00]. Insgesamt wurden 4 Proben gemessen: Pulver des Meteoriten Dhurmsala (^{10}Be und ^{26}Al -Intralaboratoriums-Standard), eine feste Probe des Meteoriten Dhurmsala, sowie je eine Probe Grüneberg und Morávka (pulverisiert). Die Ergebnisse sind in Tabelle A.11-A.14 im Anhang aufgelistet.

3.8 Berechnung der Ergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Arten von Ergebnissen ermittelt. Erstens wurde bei Meteoritenproben deren spezifische Aktivität in dpm/kg bei ^{10}Be , ^{26}Al und ^{41}Ca bzw. in dpm/kg Fe bei ^{53}Mn -Aktivitäten mit Hilfe von AMS-Messungen bestimmt. Zweitens wurde die spezifische Aktivität des Meteoriten Morávka mit Hilfe der γ - γ -Koinzidenzspektrometrie gemessen und drittens wurden aus den Analysen der Dicktarget-Proben Produktionsraten für Radionuklide berechnet. In den folgenden Kapiteln wird die Berechnung dieser Größen aus den experimentellen Daten dargelegt.

3.8.1 Berechnung der spezifischen Aktivität bei AMS-Messungen

Meteoritenproben

Der primäre Datensatz, den die AMS liefert, enthält zunächst das Verhältnis des Radionuklids zum stabilen Nuklid. Um daraus die spezifische Aktivität der Probe berechnen zu können, geht man zunächst von der Definition der Aktivität und der Halbwertszeit aus. Es gilt:

$$A = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \cdot N_R . \quad (3.1)$$

mit: A : Aktivität eines Radionuklids
 $T_{1/2}$: Halbwertszeit eines Radionuklids
 N_R : Teilchenzahl eines Radionuklids

Die Teilchenzahl N_R des Radionuklids ergibt sich aus dem von der AMS gelieferten Verhältnis des Radionuklids zum stabilen Isotop N_R/N_S , und der durch die ICP-OES-Analyse bekannten Einwaage des Trägerelementes m sowie dessen Häufigkeit H im natürlichen Isotopenverhältnis. Aus der Einwaage des Trägerelementes lässt sich dessen Teilchenzahl berechnen gemäß

$$N_S = \frac{m}{M} \cdot N_A \cdot H , \quad (3.2)$$

mit: N_S : Teilchenzahl des stabilen Nuklids
 N_A : Avogadrozahl
 m : Masse des Trägerelementes
 M : relative atomare Masse des Trägerelementes

Somit ist die Teilchenanzahl N_R des Radionuklids:

$$N_R = \frac{m}{M} \cdot N_A \cdot H \cdot \frac{N_R}{N_S} . \quad (3.3)$$

mit: N_R/N_S : Nuklidverhältnis aus der AMS-Messung (N_R : Anzahl Radionuklidteilchen, N_S : Anzahl Trägerkernteilchen)

Setzt man 3.3 in 3.1 ein, so ergibt sich der Zusammenhang zwischen gemessenem Isotopenverhältnis und Aktivität:

$$A = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \cdot \frac{m}{M} \cdot N_A \cdot H \cdot \frac{N_R}{N_S} \quad (3.4)$$

mit: A : Aktivität eines Radionuklids in der Probe
 $T_{1/2}$: Halbwertszeit des Radionuklids

Die Aktivitäten der langlebigen Nuklide ^{10}Be und ^{26}Al werden als auf die Masse der analysierten Probe des Meteoritenmaterials bezogene, spezifische Aktivität, angegeben $A_{\text{spez.}}$ angegeben. Es gilt:

$$A_{\text{spez.}} = \frac{A}{m_{\text{Probe}}} \quad (3.5)$$

mit: $A_{\text{spez.}}$: Spezifische Aktivität des Meteoritenmaterials
 m_{Probe} : Masse der Analysierten Probe

^{53}Mn -Aktivitäten in Meteoritenproben werden im Allgemeinen auf die Masse an Eisen in der Probe bezogen. Der Eisenanteil ergibt sich aus der ICP-OES-Analyse der Probe. Es gilt dann Gleichung 3.6:

$$A_{\text{spez.}}(^{53}\text{Mn}) = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \cdot \frac{m}{M} \cdot N_A \cdot H \cdot \frac{N_R}{N_S} \cdot \frac{I}{m_{\text{Fe}}} \quad (3.6)$$

mit: $A_{\text{spez.}}(^{53}\text{Mn})$: Spezifische Aktivität des Radionuklids ^{53}Mn
 m_{Fe} : Masse des Eisens in der Probe

Die Masse des zu Beginn der chemischen Trennungen vorliegenden Trägerelementes ergibt sich aus den ICP-OES-Messungen.

Zunächst wurde die gesamte Probe in $V_{\text{Lösung}} = 50$ ml gelöst (Probenlösung). Dieser Probe wurde ein 5 ml-Aliquot entnommen. Dieses Aliquot wurde zur eigentlichen Messung um den Faktor D (Tabelle A.1) verdünnt.

Die Konzentration eines Trägerelementes in der gemessenen Lösung c_{Messlsg} ergibt deshalb die Masse dieses Elementes $m_{\text{Träger}}$ gemäß:

$$m_{\text{Träger}} = c_{\text{Messlsg}} \cdot D \cdot V_{\text{Lösung}} \quad (3.7)$$

mit: $m_{\text{Träger}}$: Masse des Trägerelementes
 D : Verdünnungsfaktor des Aliquots
 $V_{\text{Lösung}}$: Volumen der Lösung, in welchem die Analysensubstanz gelöst bzw. aufgefüllt wurde (in dieser Arbeit: 50 ml)

Setzt man 3.7 in 3.5 bzw. 3.6 ein, so ergeben sich folgende Formeln zur Berechnung der spezifischen Aktivitäten:

$$A_{\text{spez.}} = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \cdot \frac{c_{\text{Messlsg.}} \cdot D \cdot V_{\text{Lösung}}}{M} \cdot N_A \cdot H \cdot \frac{N_R}{N_S} \cdot \frac{1}{m_{\text{Probe}}} \quad (3.8)$$

für die Berechnung von ^{10}Be und ^{26}Al -Aktivitäten sowie

$$A_{\text{spez.}}(^{53}\text{Mn}) = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \cdot \frac{c_{\text{Messlsg.}}}{M(\text{Mn})} \cdot N_A \cdot H \cdot \frac{N_R}{N_S} \cdot \frac{1}{c_{\text{Messlsg.}}(\text{Fe})} \quad (3.9)$$

mit:

$c_{\text{Messlsg.}}(\text{Fe})$: Konzentration von Eisen in der gemessenen Lösung
 $M(\text{Mn})$: relative atomare Masse des Mangans

für die Berechnung von ^{53}Mn -Aktivitäten.

3.8.2 Berechnung der spezifischen Aktivität bei Koinzidenz-Messungen

Zuerst wird die Zählrate der vorliegenden Probe Z_{Probe} in reproduzierbarer Geometrie gemessen (der „Proben-Geometrie“). Daraufhin wird die Zählrate $Z_{\text{Al-26}}$ eines punktförmigen Standards bekannter Aktivität (1060 dpm) für die „Standard-Geometrie“ gemessen. Schließlich wird mit Hilfe eines Dummy-Meteoriten der Geometriefaktor zwischen Standard- und Proben-Geometrie bestimmt. Dazu wird zuerst die Zählrate, einer ^{22}Na -Lösung in punktförmiger Geometrie („Standard-Geometrie“) gemessen ($Z_{\text{Na-22}}$). Anschließend wird diese Aktivität im Dummy-Meteoriten verteilt und die Zählrate in der „Proben-Geometrie“ bestimmt (Z_{Dummy}).

Ist $A_{\text{ges,Probe}}$ die Aktivität der vorliegenden Probe, $A_{\text{Al-26}}$ die Aktivität des ^{26}Al -Standards, $Z_{\text{Na-22}}$ die Zählrate einer punktförmigen ^{22}Na -Quelle, $A_{\text{Na-22}}$ die Aktivität dieser punktförmigen ^{22}Na -Quelle, Z_{Dummy} die Zählrate eines Meteoriten-Dummys mit der ^{22}Na -Aktivität A_{Dummy} , so gelten die folgenden beiden Beziehungen:

$$\frac{A_{\text{Dummy}}}{Z_{\text{Dummy}}} = \frac{A_{\text{ges,Probe}}}{Z_{\text{Probe}}} \quad (3.10)$$

und

$$\frac{A_{\text{Na-22}}}{Z_{\text{Na-22}}} = \frac{A_{\text{Al-26}}}{Z_{\text{Al-26}}} \quad (3.11)$$

Außerdem gilt:

$$A_{Na-22} = A_{Dummy} \quad (3.12)$$

Einsetzen von 3.10 in 3.11 unter Verwendung von 3.12 liefert folgende Beziehung für die Gesamtaktivität der Meteoritenprobe:

$$A_{ges,Probe} = \frac{Z_{Probe}}{Z_{Dummy}} \cdot \frac{A_{Al-26}}{Z_{Al-26}} \cdot Z_{Na-22} \equiv A \quad (3.13)$$

Die Aktivität A_{Al-26} des Standards ist 1060 dpm. Die spezifische Aktivität der gemessenen Probe errechnet sich gemäß Gleichung 3.14.

$$A_{spez,Probe} = \frac{A}{m_{Probe}} \quad (3.14)$$

mit: A : Aktivität der Probe
 m_{Probe} : Masse der analysierten Probe
 $A_{spez,Probe}$: spezifische Aktivität der Probe
 der Geometrie der ^{26}Al -Standardmessungen

Da die γ - γ -Koinzidenz-Messung der Positronenvernichtungsstrahlung lediglich die Summe aller β^+ -Aktivitäten in der Probe angibt, wurde mit Hilfe konventioneller γ -Spektrometrie das Verhältnis der ^{22}Na -Aktivität zu ^{26}Al -Aktivität gemessen (andere Nuklide sind vernachlässigbar, vergleiche Kapitel 3.7).

Unter der Annahme einer gleichen Selbstabsorption innerhalb der Probe und des Dummy-Meteoriten und der Vernachlässigung einer Aktivitätsänderung während der Messungen ergibt sich das Verhältnis von ^{22}Na - und ^{26}Al -Aktivität gemäß (3.15):

$$\frac{A_{Na-22,Probe}}{A_{Al-26,Probe}} = \frac{F_{1274} \varepsilon_{1809} I_{1809}}{F_{1809} \varepsilon_{1274} I_{1274}} \quad (3.15)$$

mit: $A_{Na-22,Probe}$: ^{22}Na -Aktivität der Probe zum Zeitpunkt der Messung
 $A_{Al-26,Probe}$: ^{26}Al -Aktivität der Probe
 F_{1274} : Peakfläche der 1274 keV- γ -Linie des ^{22}Na
 F_{1809} : Peakfläche der 1809 keV- γ -Linie des ^{26}Al
 ε_{1274} : Ansprechwahrscheinlichkeit (Efficiency) des Detektors bei der γ -Energie 1274 keV (^{22}Na)
 ε_{1809} : Ansprechwahrscheinlichkeit (Efficiency) des Detektors bei der γ -Energie 1809 keV (^{26}Al)
 I_{1274} : Emissionswahrscheinlichkeit der γ -Linie des ^{22}Na
 I_{1809} : Emissionswahrscheinlichkeit der γ -Linie des ^{26}Al

Das Verhältnis der Ansprechwahrscheinlichkeit des Detektors für zwei γ -Energien ist für verschiedene Abstände konstant und wird durch Efficiency-Messungen bestimmt.

Da die Gesamtaktivität $A_{ges,Probe}$ der Probe

$$A_{ges,Probe} = A_{Na-22} + A_{Al-26}, \quad (3.16)$$

mit: $A_{ges,Probe}$: Gesamtaktivität der Probe
 $A_{Na-22,Probe}$: ^{22}Na -Aktivität der Probe
 $A_{Al-26,Probe}$: ^{26}Al -Aktivität der Probe

ist, ergibt sich die ^{26}Al -Aktivität gemäß:

$$A_{Al-26} = \frac{A_{ges,Probe}}{1 + \frac{F_{1274} \cdot \varepsilon_{1809} \cdot I_{1809}}{F_{1809} \cdot \varepsilon_{1274} \cdot I_{1274}}}. \quad (3.17)$$

Die Gesamtaktivität $A_{ges,Probe}$ ergibt sich aus den Koinzidenz-Messungen. Somit kann die ^{22}Na -Aktivität zum Zeitpunkt der Messung berechnet und anschließend auf den Fallzeitpunkt der Probe zurückgerechnet werden. Die auf die Masse bezogene spezifische Aktivität errechnet sich nach Gleichung 3.5 mit $A = A_{Al-26,Probe}$ bzw. $A = A_{Na-22,Probe}$.

3.8.3 Berechnung experimentell bestimmter Produktionsraten

Die Berechnung der Produktionsraten geht vom mit der AMS gemessenen Verhältnis der Radionuklide zum stabilen Trägerisotop aus. Die Produktionsrate wird nach Gleichung 1.7 berechnet, da sehr langlebige Nuklide untersucht wurden. Häufig wird die Produktionsrate auf eine Teilchenflussdichte von einem Proton pro Sekunde und Quadratzentimeter, auf die Masse des Targets und eine Bestrahlungszeit T_{exp} von 1 s normiert:

$$P_B = \frac{N_B}{T_{exp} \cdot \phi \cdot m_{Target}} \quad (3.18)$$

mit: P_B : Produktionsrate des Radionuklids B
 N_B : Anzahl der gebildeten Radionuklidatome
 ϕ : Teilchenflussdichte
 T_{exp} : Bestrahlungszeit
 m_{Target} : Masse der Targetfolie

Eine weitere häufig angegebene Einheit ist dpm/kg Targetmaterial. Beide Größen lassen sich wie folgt umrechnen:

$$1 \text{ atom} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = 60000 \text{ dpm/kg} \quad (3.19)$$

(auf 1 Projektilteilchen pro Sekunde und cm^2 normiert)

3.9 Qualitätskontrolle

Die wesentlichen Qualitätsparameter analytischer Daten sind in erster Linie deren Richtigkeit, Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit. Auf diese Aspekte wurde bei allen Arbeitsschritten von der Einwaage des Probenmaterials bis zur Errechnung der Enddaten, besonderer Wert gelegt. Der Wert und die Einmaligkeit der Proben machen mehrfache Kontrollmessungen unmöglich, deshalb wird das Einhalten der geforderten Bedingungen durch folgende Maßnahmen überprüft:

1. Es werden immer parallel 6-8 Proben aufgearbeitet.
2. Bei diesen Probensets wird der Intra-Laboratoriumsstandard „Dhurmsala“ mit aufgearbeitet, dessen ^{10}Be und ^{26}Al -Aktivitäten sehr genau bekannt sind.
3. Bei diesen Probensets wird eine Blankprobe mit aufgearbeitet.
4. Ein Drittel aller aufgearbeiteten und gemessenen Proben sind früher schon an der Abteilung Nuklearchemie in Köln gemessen worden. Diese Daten werden verglichen.
5. Es wurde ein Vergleich mit Literaturwerten vorgenommen.

Das **Aufarbeiten von Probensets** stellt möglichst gleiche Bedingungen für alle in diesem Set enthaltene Proben her. Dadurch können Messwerte innerhalb dieser Sets besonders gut verglichen werden.

Das Mitmessen eines **Intra-Laboratoriumsstandard** erlaubt die Kontrolle der Richtigkeit und Vergleichbarkeit der Messungen untereinander. Von diesem Material sind große Mengen vorhanden und es liegen schon über 100 Messungen von ^{10}Be und ^{26}Al -Werten vor [MER98] [TAR03], die eine Vergleichbarkeit und Richtigkeit der Werte sicherstellen.

Die **Blankprobe** erlaubt die Kontrolle von Cross-Kontaminationen zwischen Proben. Außerdem gibt der Blank einen guten Anhaltspunkt für die Reproduzierbarkeit der chemischen Abtrennung

Durch die Messung verschiedener Proben, die früher schon gemessen worden sind, [MER98] [TAR03] können die Werte dieser Arbeit mit denen **anderer Arbeiten verglichen werden**. Dies erlaubt einen Rückschluss auf die Richtigkeit der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen, weil es sich dabei um „same-sample“-Proben handelt. Dabei handelt es sich um Proben der (annähernd) gleichen Lokation im Meteorit, die gleichen Bestrahlungsbedingungen ausgesetzt waren und eine (annähernd) gleiche Elementzusammensetzung besitzen, wodurch sich auch eine annähernd gleiche Konzentration der Radionuklide ergibt.

Der **Vergleich mit Literaturdaten** ist für die Messungen dieser Arbeit generell schwierig, da die gemessenen Radionuklidkonzentrationen empfindlich von der Lokation der Proben im Meteoroiden abhängen. Diese sind im Allgemeinen nicht besonders gut dokumentiert. Allerdings kann unter Umständen zumindest abgeschätzt werden, ob Messwerte im Rahmen der Vorhersagen der physikalischen Modellrechnungen nach Leya und Michel [MIC96], [LEY00a], [LEY00b] übereinstimmen können.

3.10 Fehlerbetrachtung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Arten von Messungen durchgeführt:

- Bestimmung der spezifischen Aktivität von Meteoritenproben mittels AMS
- Bestimmung der spezifischen Aktivität von Meteoritenproben mittels γ - γ -Koinzidenzspektroskopie
- Bestimmung der ^{10}Be -Produktionsraten aus $^{\text{nat}}\text{Fe}$ und $^{\text{nat}}\text{Ni}$ -Folien in einem Modellmeteoroiden.

In der folgenden Fehlerbetrachtung werden die Fehler der Einzelgrößen, die in die jeweilige Berechnung eingehen, abgeschätzt, bzw. Literaturangaben entnommen. Der Gesamtfehler der berechneten Größen wird nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet.

3.10.1 Fehler in der spezifischen Aktivität bei den Meteoritenanalysen

Fehlerbehaftete Größen sind:

- Die Masse der Probe m_{Probe}
- Das Volumen $V_{\text{Lösung}}$ der Lösung, auf das die gelöste Probe aufgefüllt wurde,
- Der Verdünnungsfaktor F , auf den das Aliquot zur Messung in der ICP-OES-Anlage verdünnt worden ist.
- Die Konzentration der Messlösung $c_{\text{Messlg.}}$
- Das von der AMS gelieferte Isotopenverhältnis

Außerdem ist noch ein **systematischer Fehler** der chemischen Aufarbeitung zu berücksichtigen. Dieser wird zu 5 % abgeschätzt und kommt durch Verluste bei den durchgeführten chemischen Operationen zustande.

Der **relative Fehler der Einwaagen** m_{Probe} beträgt 0,1 % und ist damit vernachlässigbar.

Der **relative Fehler des Volumens der Probenlösung** $V_{\text{Lösung}}$ entspricht der Ungenauigkeit des Messkolbens und beträgt 0,5 %.

Der **relative Fehler im Verdünnungsfaktor D** (das ist der Faktor, um den das Aliquot verdünnt wurde um gemessen werden zu können) basiert auf den Ungenauigkeiten der Kolben und Pipetten, die zur Verdünnung benutzt wurden. Diese summieren sich zu 1 %.

Der **relative Fehler in der per ICP-OES gemessenen Konzentration der Messlösung** $c_{\text{Messlg.}}$ ergibt sich aus der Ungenauigkeit des Geräts selbst, der Ungenauigkeit der Standardlösungen und den Fehlern der zur Verdünnung verwendeten Kolben und Pipetten. Der Fehler der Pipetten und Kolben beträgt 0,7 bzw. 0,2 %, was 0,9 % ergibt. Der Fehler der Standardlösungen beträgt 1,5 %. Außerdem muss noch der apparative Fehler des ICP-OES-Gerätes betrachtet werden, der durch häufigere Zwischenmessungen von Standardlösungen auf 2 % reduziert werden kann. Letztlich wird noch der relative Fehler berücksichtigt, der durch

statistische Abweichungen zustande kommt (jede Probe wurde dreimal gemessen). Dieser lag in jedem Falle unter 1,5 %. Damit liegt der apparative Gesamtfehler bei maximal 3,5 %. Somit kann der Gesamtfehler in den Konzentrationen der Messlösungen zu 6 % abgeschätzt werden.

Der **relative Fehler des von der AMS gelieferten Isotopenverhältnisses** wird aus der Zählstatistik im Detektor der AMS unter Berücksichtigung systematischer Fehler der Anlagen für jede Probe bei den Messungen individuell bestimmt und als „AMS-Fehler“ bezeichnet. Bei den im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Proben lag dieser zwischen 1 % und 10 %.

3.10.2 Fehler der γ - γ -Koinzidenzanalyse

Die bei der Berechnung der spezifischen ^{26}Al - und ^{22}Na -Aktivität aus der γ - γ -Koinzidenzanalyse eingehenden Werte sind fehlerbehaftet. Dies sind im Einzelnen:

- Zählraten des Koinzidenzspektrometers Z
- Peakflächen der GeLi-Messungen F
- Efficiency des GeLi-Detektors ε
- Aktivität des ^{26}Al -Standards $A_{\text{Al-26}}$
- Masse der Probe m_{Probe}
- Übergangswahrscheinlichkeiten der γ -Energien I_γ

Die Bestimmung der Gesamtaktivität erfolgt mittels der Low-level- γ - γ -Koinzidenzspektroskopie. Für den **Fehler in den Zählraten** bei den γ - γ -Koinzidenzmessungen ist der statistische Fehler der Messungen dominierend. Diese werden für jede einzelne Messung berechnet, andere Fehler (Reproduzierbarkeit der Geometrie) vernachlässigt. Es gilt:

$$\Delta Z = \sqrt{Z} \quad (3.23)$$

mit: Z : Anzahl der gemessenen Ereignisse

Um das Verhältnis der ^{22}Na - und ^{26}Al -Aktivitäten zu bestimmen, wird auf herkömmliche γ -Spektroskopie mittels eines GeLi-Detektors zurückgegriffen.

Für die γ -Spektrometrischen **Flächenbestimmungen der Peaks** wird vom verwendeten Programm (Gammavision 5.0, Fa. EG&G Ortec) ein Fehler angegeben, der neben einem Peak-Anpassungsfehler den statistischen Fehler beinhaltet. Dieser Fehler in der Peakfläche ist wegen der geringen Zählraten der dominierende Fehler bei der Aktivitätsbestimmung.

Der **relative Fehler in der Efficiency** des Detektors für eine γ -Energie wird zu 5 % abgeschätzt. Dies ergibt sich aus der Geradenanpassung an die Messwerte der Efficiencymessungen sowie den Ungenauigkeiten der Standardquellen selbst.

Der **relative Fehler des verwendeten ^{26}Al -Standards** beträgt: 2,6 %

Der **Fehler in der Masse der Probe** beträgt 0,1 % und wird ebenso wie der **Fehler in den Übergangswahrscheinlichkeiten der γ -Energien** (< 1% [FIR96]) in Anbetracht der wesentlich größeren statistischen Fehler vernachlässigt.

Außerdem muss prinzipiell noch ein Korrekturfaktor für echte Koinzidenzen berücksichtigt werden, da die Messungen auf dem GeLi-Detektor bei einem sehr geringen Abstand erfolgt sind. Der Korrekturfaktor $\varepsilon_{pile-up}$ für echte Koinzidenzen wurde sowohl für die 1274 keV-Linie des ^{22}Na als auch für die 1809 keV-Linie des ^{26}Al mit Hilfe der Methode aus [DAR82] berechnet. Dabei stellt sich heraus, dass diese Faktoren weniger als 0,5 % betragen und somit für eine Fehlerbetrachtung vernachlässigbar sind.

3.10.3 Fehler in den Produktionsraten

Der Fehler in den Produktionsraten wird im Wesentlichen durch den Fehler im Fluss und dem Fehler in den gemessenen Verhältnissen von Radionuklid zu Trägermenge bestimmt.

Der **relative Fehler des von der AMS gelieferten Isotopenverhältnisses** ist von Messung zu Messung unterschiedlich. Er hängt von der Zählstatistik ab, wird von Messung zu Messung bestimmt und liegt zwischen 1 % und 10 %.

Der **relative Fehler in der Teilchenflussdichte** wird zu 10 % abgeschätzt. Relative Fehler in der Targetmasse und der Trägermasse sind demgegenüber vernachlässigbar, da sie 1 % nicht überschreiten.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Meteorite

Zunächst wird auf die Marsmeteorite eingegangen werden, die einen Hauptteil der Arbeit darstellen. Die untersuchten Meteorite werden in alphabetischer Reihenfolge diskutiert. Die Diskussion findet dabei anhand des physikalischen Modells von Leya et al. [LEY00b] statt (siehe Kapitel 1.6).

Mit Hilfe dieses Modells werden für verschiedene Meteoroiden-Radien tiefenabhängige Produktionsraten von Radionukliden berechnet, die dann gegeneinander aufgetragen werden. Eingabe-Parameter ist dabei die Zusammensetzung des jeweiligen Meteoriten. Die wichtigsten Darstellungen sind:

- die Auftragung des $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnisses gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis (Bern-Plot [EBE66])
- die Auftragung von Edelgasproduktionsraten gegen Edelgasverhältnisse
- die Produktionsrate von Radionukliden gegen die präatmosphärische Tiefe.

Zur Bestimmung von Bestrahlungsaltern werden zudem in einzelnen Fällen die Produktionsraten zweier Radionuklide gegeneinander aufgetragen, wenn keine oder ungenaue Edelgasdaten vorliegen.

Der relative Fehler des Modells wird von Michel et al. [MIC03] mit 9 % für Konzentrationen und 3 % für Verhältnisse angegeben. Zusammen mit den Fehlern der Messwerte werden die Gesamtfehler mit dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet.

Alle angegebenen Edelgaskonzentrationen und Edelgasverhältnisse sind auf den rein kosmogenen Anteil korrigiert worden.

4.1.1 Marsmeteorite

In dieser Arbeit werden 10 Marsmeteorite diskutiert (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Überblick über die in dieser Arbeit diskutierten Marsmeteorite. Der berechnete Radius ist der minimale Radius, den das gefundene Stück aufgrund seiner Masse haben kann.

Bezeichnung*	Typ	T _{terr} [Ma]	Fundmasse		Radius [cm]	Fundort	Fundjahr
			[kg]	[MET03]			
ALHA 77005	LhSh	0,19**	0,483		3	Antarktis	1977
ALH 84001	OPX	0,010***	1,931		5	Antarktis	1984
EETA 79001A	BaSh	≤ 0,25****	7,942		8	Antarktis	1980
Chassigny	Ch	Fall	4		7	Frankreich	1815
Governador Valadares	Nak	≈ 0	0,158		2	Brasilien	1958
Lafayette	Nak	≈ 0	0,8		4	USA	1931
Nakhla	Nak	Fall	10		9	Ägypten	1911
Sayh al Uhaymir 005	BaSh	≈ 0	9,923		9	Oman	1999
Shergotty	BaSh	Fall	5		7	Indien	1865
Zagami	BaSh	Fall	18		11	Nigeria	1962

* Bezeichnung gemäß [GRA85], bei Sayh al Uhaymir 005 nach dem Nomenclature Comitee der Meteoritical Society

** terrestrisches Alter nach [NIS89]

*** terrestrisches Alter als Mittelwert aus [JUL94] und [JUL98]

**** diese Arbeit (siehe Abschnitt ALHA 77005)

***** Berechnung mit einer mittleren Dichte von 3,5 g/cm³

Unter diesen Meteoriten sind sämtliche Klassen der Marsmeteorite vertreten: Shergottite, Nakhlite, Chassignite, sowie der Orthopyroxenit ALH 84001. Folgende Größen sollten bestimmt werden:

- Bestrahlungsalter
- Terrestrisches Alter
- Ejektionsalter (Summe aus terrestrischem und Bestrahlungsalter)
- Präatmosphärische Größe
- Abschirm-Tiefe der untersuchten Proben
- Vorbestrahlung auf dem Mars
- SCR-Effekte

ALHA 77005

Die in der Probe von ALHA 77005 gemessenen Daten sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Tabelle 4.2: Konzentration kosmogener Nuklide in der ALHA 77005-Probe. Die Edelgas-Daten wurden von S. Schwenzer, MPI Mainz zur Verfügung gestellt und sind auf ihren rein kosmogonen Anteil korrigiert worden [SCH03b].

ALHA 77005	
^{53}Mn	$(127 \pm 15) \text{ dpm/kg Fe}$
^3He	$(7,989 \pm 1,023) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
^{21}Ne	$(1,023 \pm 0,076) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
^{22}Ne	$(1,313 \pm 0,075) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
^{36}Ar	$(0,094 \pm 0,011) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
^{38}Ar	$(0,141 \pm 0,009) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
^{83}Kr	$(2,3 \pm 3,9) \cdot 10^{-13} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$

Der ^{53}Mn -Wert liegt mit 127 dpm/kg Fe niedriger als die bisher gemessenen Werte von $(270 \pm 15) \text{ dpm/kg}$ [MET03 und Zitate darin] und $(170 \pm 12) \text{ dpm/kg Fe}$ [SCH01]. Die Abweichung der Werte untereinander kann durch eine unterschiedliche Abschirmtiefe hervorgerufen werden. Insbesondere wenn man eine Produktion durch SCR in Betracht zieht, ist eine Differenz der ^{53}Mn -Konzentration zwischen oberflächennahen und weiter im Innern liegenden Proben verständlich.

Als Eingangsparameter für die Modellrechnungen für ALHA77005 dient die Zusammensetzung nach [DRE92]. Die für die Produktionsratenberechnungen berücksichtigten Targetelemente gehen aus Tabelle 1.2 (siehe Kapitel 1.5) hervor. Die Konzentrationen der Elemente Rb, Sr, Y und Zr wurden an den auch in dieser Arbeit untersuchten Proben gemessen [JOC01], [JOC02] und für die Modellrechnung verwendet. Zunächst wird ein Bernplot [EBE66] für den Meteoriten errechnet. Dieser gibt Auskunft über einen eventuellen ^3He -Verlust bzw. eine ^{22}Ne -Überproduktion.

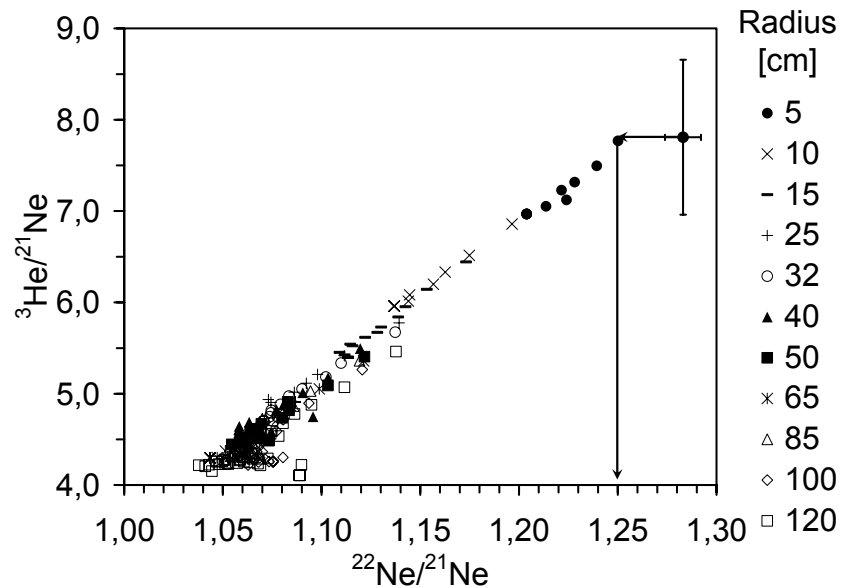


Abbildung 4.1: Bern-Plot für ALHA77005. Eingezeichnet sind der Messpunkt mit Fehlern und die theoretisch berechneten Werte (Punkte-Schar). Die Verhältnisse wurden für verschiedene Meteoroidenradien berechnet. Das gemessene $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis liegt im Vergleich mit Modellrechnungen zu hoch. Man erkennt daran eine deutliche Überproduktion von ^{22}Ne . Daher wird der Wert auf rein den allein durch GCR produzierten Anteil korrigiert (Pfeile).

Mit der Korrektur des $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnisses (Abbildung 4.1) auf einen Wert von $1,25 \pm 0,04$ fällt das korrigierte $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis in den Bereich von Werten, die das verwendete Modell für einen Meteoroiden mit einem Radius von 5 cm vorhersagt. Die Überproduktion von ^{22}Ne ist durch Effekte solarer kosmischer Strahlung erklärbar, die auch schon von Nishiizumi et al. beobachtet wurden [NIS86].

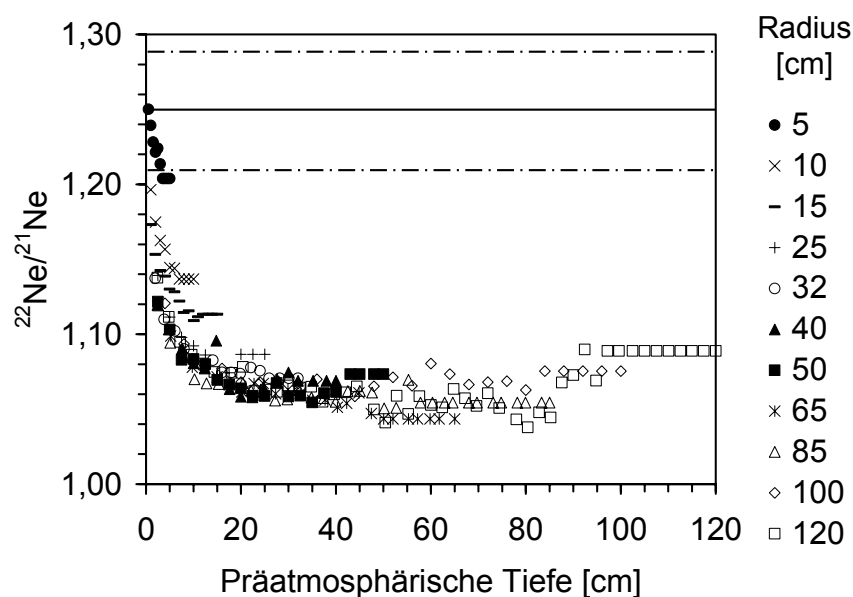


Abbildung 4.2: Das Neonverhältnis als Tiefen-Parameter: Auftragung des $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis gegen die präatmosphärische Tiefe der Probe. Die Punkteschar stammt aus der Modellrechnung. Es wurden Berechnungen für verschiedene Meteoroidenradien durchgeführt. Die waagerechte Linie repräsentiert das anhand des Bernplots korrigierte $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis mit Fehler (strichlierte Linien).

Man erkennt, dass sich die untersuchte Probe sehr nah an der präatmosphärischen Oberfläche eines sehr kleinen Meteoroiden befand, was die Überproduktion an ^{22}Ne erklärt. Mit dem korrigierten $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis kann man ein ^3He - sowie ein ^{21}Ne -Bestrahlungsalter berechnen (Abbildungen 4.3 und 4.4).

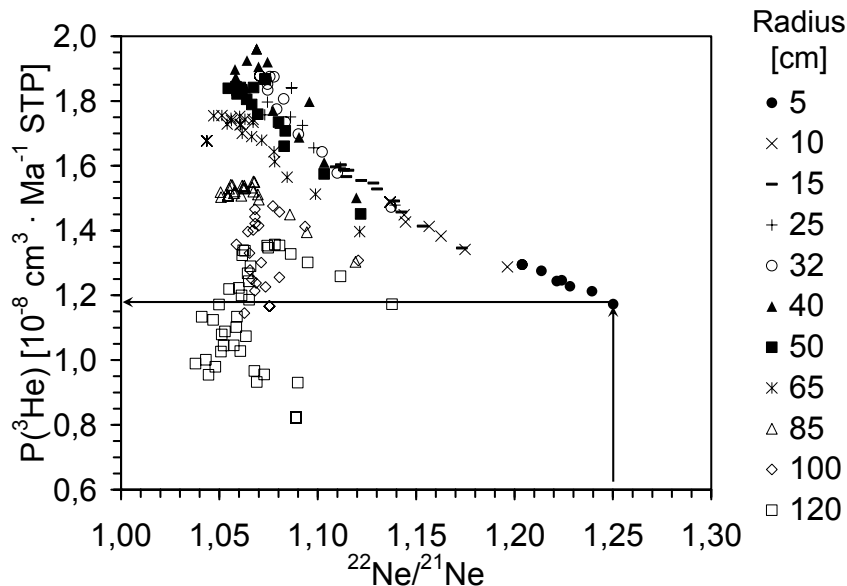


Abbildung 4.3: Produktionsrate von ^3He gegen das Verhältnis $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$. Die Punkteschar sind die vom Modell berechneten Werte für verschiedene Meteoroidenradien. Vom korrigierten $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis ausgehend wird entlang der Pfeile die Produktionsrate für ^3He bestimmt.

Mit einem $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältniss von $1,25 \pm 0,04$ ergibt sich eine ^3He -Produktionsrate von $1,18 \pm 0,11$ (Abbildung 4.3). Damit führt die ^3He -Konzentration (Tabelle 4.2) zu einem Bestrahlungsalter von $T_{21} = (6,8 \pm 0,8)$ Ma.

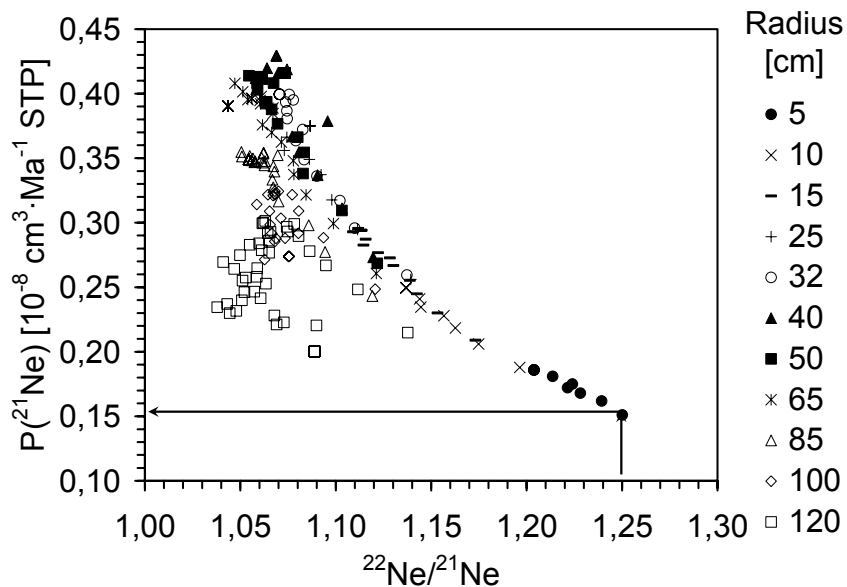


Abbildung 4.4: ^{21}Ne -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die Punkte sind die vom Modell für ALHA 77005 berechneten Werte für verschiedene Meteoroiden-Radien. Ausgehend vom korrigierten $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis (Abbildung 4.1), kann man entlang der Pfeile eine Produktionsrate für ^{21}Ne ablesen.

Mit einer ^{21}Ne -Produktionsrate von $P_{21} = (0,15 \pm 0,01)$ (Abbildung 4.4) ergibt sich mit der gemessenen ^{21}Ne -Konzentration (Tabelle 4.2) ein ^{21}Ne -Alter von $T_{21} = (6,8 \pm 0,8)$ Ma. Die beiden Bestrahlungsalter, die von der ^3He - und von der ^{21}Ne -Konzentration abgeleitet wurden, sind somit konkordant. Eugster et al. [EUG97] fanden für die Höhe des Bestrahlungsalters einen Wert von $(3,32 \pm 0,55)$ Ma. Zwar liefert insbesondere bei kleinen Körpern das empirische Modell von Eugster et al. [EUG88] höhere Produktionsraten und damit geringere Alter als das verwendete physikalische Modell [LEY00a], eine Diskrepanz, wie in diesem Falle ist jedoch nicht allein durch Abweichungen beider Modelle erklärbar.

Auf der anderen Seite haben Nishiizumi et al. ein Bestrahlungsalter von (7 ± 1) Ma veröffentlicht [NIS78]. Dies wäre in Übereinstimmung mit einem wie oben, „naiv“ berechneten Alter ohne Berücksichtigung einer Flussdichteerhöhung und damit einhergehender Produktionsraten-Steigerung durch SCR (allerdings muss in diesem Zusammenhang erwähnt werden, dass Nishiizumi et al. [NIS86b] auch ein ^{10}Be -Alter von $(2,5 \pm 0,3)$ Ma veröffentlicht haben, welches in wesentlich besserer Übereinstimmung zu Eugster et al. [EUG97] ist).

Die fehlende Übereinstimmung ist durch die Annahme einer starken Überproduktion von Edelgasen erklärbar, die durch den SCR Anteil der kosmischen Strahlung produziert werden. Man beobachtet diesen Effekt insbesondere in kleinen Meteoroiden [EVA87] oder in Proben, die sich unmittelbar unter der präatmosphärischen Oberfläche befinden (z.B. in Apollo 15 Bohrkernen an Proben, die direkt an der Oberfläche lagen: [LEY01a]). Das in dieser Arbeit verwendete Modell rechnet lediglich mit dem GCR-Anteil der kosmischen Strahlung. Um korrekte Alter zu errechnen, müsste das vom Modell berücksichtigte Projektilteilchen-Spektrum (nur GCR) an das beider Komponenten (SCR + GCR), angepasst werden.

Korrigiert man die im Rahmen dieser Arbeit gemessene ^{53}Mn -Konzentration (Tabelle 4.2) mit Hilfe des Bestrahlungsalters aus [EUG97] auf Sättigungskonzentration und trägt diese Sättigungskonzentration des ^{53}Mn gegen das korrigierte $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis (aus Abbildung 4.1) auf, so zeigt sich im Vergleich mit theoretisch errechneten Werten auch für ^{53}Mn eine deutliche Überproduktion (Abbildung 4.5).

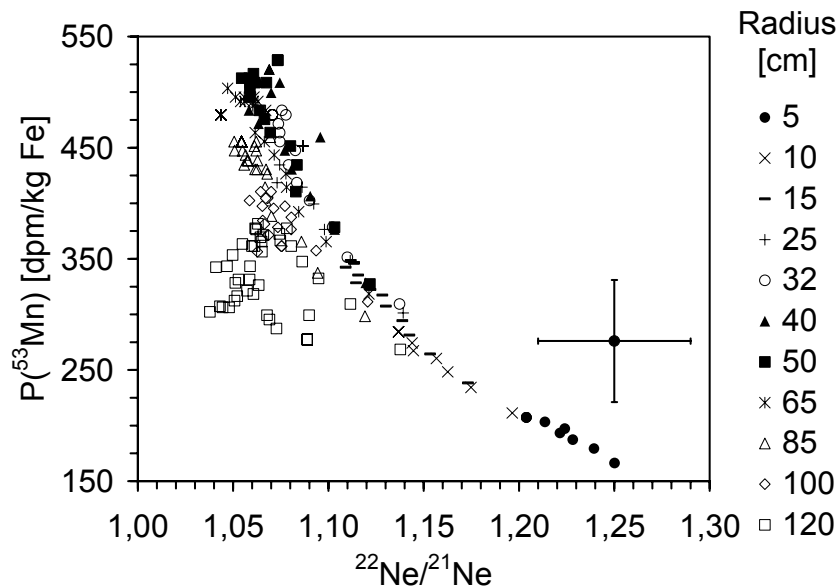


Abbildung 4.5: ^{53}Mn -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die Punkteschar zeigt berechnete Werte für verschiedene Meteoroiden-Radien. Der eingetragene Messwert mit Fehlern repräsentiert das korrigierte $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis sowie die gemessene ^{53}Mn -Aktivität (Tabelle 4.2), die mit einem Bestrahlungsalter von $(3,32 \pm 0,55)$ Ma [EUG97] auf Sättigung korrigiert wurde

In [EUG97] wurden bei der Berechnung eines Bestrahlungsalters ebenfalls SCR in Betracht gezogen. Korrigiert wurden dort die SCR-Effekte mittels empirischer Beziehungen zwischen den Beiträgen einzelner Elemente zur Ne-Produktion. Auf die Verwendung derartiger empirischer Korrelationen wird im Rahmen dieser Arbeit aber bewusst verzichtet, weil das physikalische Modell prinzipiell die Berücksichtigung von solaren kosmischen Strahlungskomponenten zulässt. Eine solche Anpassung ist in Bearbeitung, steht zurzeit aber noch nicht zur Verfügung [MIC03].

Für ALHA77005 kann daher mit dem zur Verfügung stehenden Modell der Meteoroiden-Radius zu 5 cm angegeben werden, die untersuchte Probe muss sich weniger als 2,5 cm unter der präatmosphärischen Oberfläche befunden haben. Diese Werte stimmen mit denen in [NIS86], [NIS86b] und [NIS94] überein.

ALH 84001

Die gemessenen Konzentrationen kosmogener Nuklide in ALH 84001 sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst. Eingangsparemeter für die Modellrechnungen ist bei diesem Meteoriten die chemische Bulkanalyse von [LOD98] (berücksichtigte Elemente siehe Tabelle 1.2). Auch in diesem Falle werden same-sample-Analysen für die Elemente Rb, Sr, Y und Zr aus [JOC02] verwendet. Die Auswertung der kosmogener Nuklide basiert auf dem Bern-Plot [EBE66], einer anschließenden Berechnung des Bestrahlungsalters anhand der Edelgase und zuletzt der Bestimmung des präatmosphärischen Radius und der Abschirm-Tiefe der Probe mit Hilfe der Radionuklide.

Tabelle 4.3: Konzentrationen der kosmogenen Nuklide in ALH 84001. Edelgase nach [SCH03b].

ALH 84001	
^{10}Be	$(23,1 \pm 1,9)$ dpm/kg
^{26}Al	$(70,6 \pm 50,8)$ dpm/kg
^{53}Mn	(253 ± 30) dpm/kg Fe
^3He	$(26,58 \pm 1,83) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{21}Ne	$(4,318 \pm 0,250) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{22}Ne	$(5,117 \pm 0,069) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{36}Ar	$(0,311 \pm 0,012) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{38}Ar	$(0,467 \pm 0,013) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{83}Kr	$(12,4 \pm 6,6) \cdot 10^{-13}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP

Im Rahmen der Fehler stimmen die gemessenen Werte für ^{10}Be und ^{26}Al mit Literaturwerten überein [MET03] und Zitate darin, [NIS87] und [SCH01]. Die Literaturwerte liegen zwischen 19,8 und 21,3 dpm/kg, der gemessene Wert liegt also im oberen Bereich. Für ^{26}Al liegen die Literaturwerte zwischen 60 und 70 dpm/kg, der hier gemessene Wert liegt ebenfalls im oberen Bereich. Für ^{53}Mn gibt es lediglich einen Vergleichswert in [SCH01] von (379 ± 33) dpm/kg Fe, der damit höher ist als der im Rahmen dieser Arbeit gemessene Wert. Die Diskrepanz kann durch unterschiedliche Abschirmtiefen der verschiedenen Proben im Meteoroid erklärt werden.

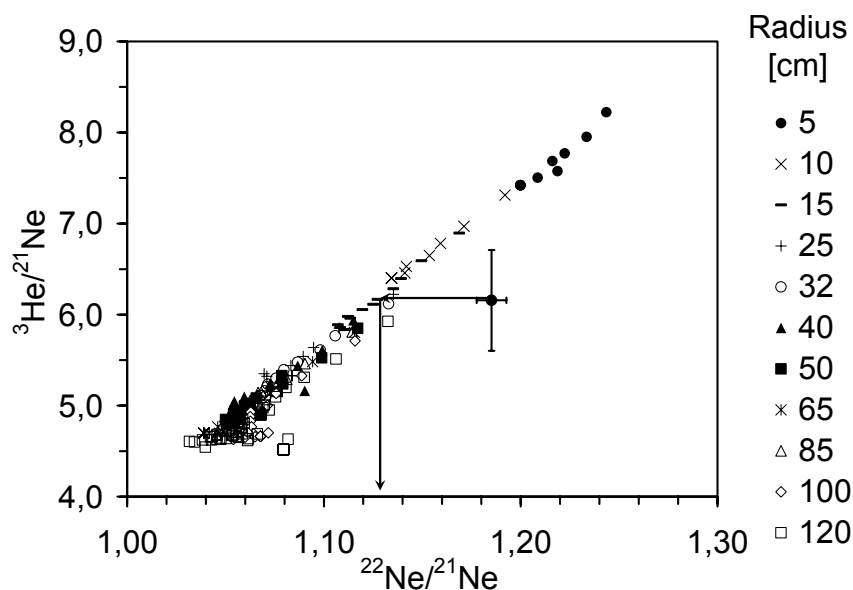


Abbildung 4.6: Bern-Plot für ALH 84001. Die für verschiedene Meteoroiden-Radien berechneten Werte bilden die Punkte-Schar, der gemessene Wert ist mit Fehlern eingetragen. Entlang der Pfeile findet eine Korrektur des $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnisses statt.

Im Bernplot (Abbildung 4.6) ist der gemessene Wert zu höheren $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnissen verschoben, als man durch die Modellrechnungen erwarten würde. Dies wird als ^{22}Ne -Überproduktion interpretiert. Deswegen wird das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis korrigiert. Das korrigierte Verhältnis ergibt sich zu $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne} = (1,129 \pm 0,035)$. Dieser

Wert wird für die Berechnung des Bestrahlungsalters herangezogen (Abbildungen 4.7 und 4.8).

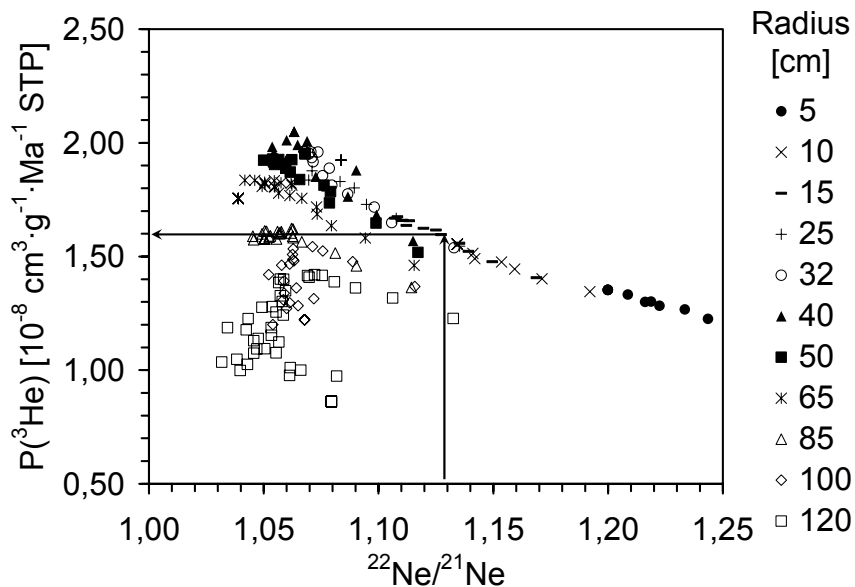


Abbildung 4.7: Produktionsrate von ^3He gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis zur Bestimmung des ^3He -Bestrahlungsalters von ALHA 84001. Die Punkteschar sind theoretisch errechnete Werte. Entlang der Pfeile wird die Produktionsrate von ^3He abgelesen.

Mit dem korrigierten $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis (Abbildung 4.6) ergibt sich eine ^3He -Produktionsrate von $(1,59 \pm 0,15) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$ (Abbildung 4.7), was bei der gemessenen ^3He -Konzentration (Tabelle 4.3) zu einem ^3He -Alter von $T_3 = (16,7 \pm 1,6) \text{ Ma}$ führt.

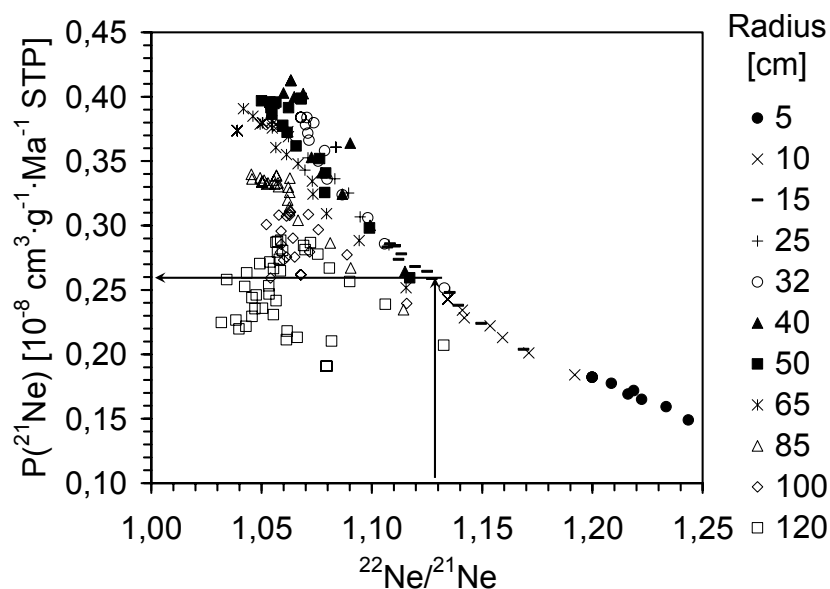


Abbildung 4.8: Produktionsrate von ^{21}Ne gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis zur Bestimmung des ^{21}Ne -Bestrahlungsalters von ALHA 84001. Die Punkteschar sind theoretisch errechnete Werte. Entlang der Pfeile wird die Produktionsrate von ^{21}Ne abgelesen.

Die Produktionsrate von ^{21}Ne ergibt sich zu $P_{21} = (0,259 \pm 0,025) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$ (Abbildung 4.8). Mit der gemessenen ^{21}Ne -Konzentration (Tabelle 4.3) errechnet sich ein ^{21}Ne -Bestrahlungsalter von $T_{21} = (16,7 \pm 1,9) \text{ Ma}$. Damit sind die Edelgasalter konkordant. Mit diesen Bestrahlungsaltern haben alle Radionuklide ihre Sättigungsaktivität erreicht. Deren gemessenen Konzentrationen (Tabelle 4.3) können somit unmittelbar mit den theoretisch berechneten Produktionsraten verglichen werden, um eine Abschätzung des präatmosphärischen Radius und der Abschirmtiefe vorzunehmen.

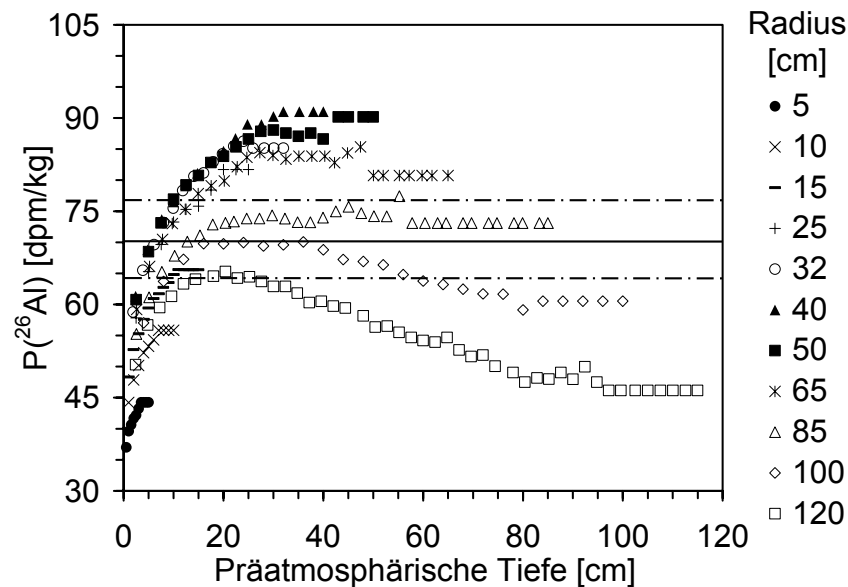


Abbildung 4.9: Produktionsrate von ^{26}Al gegen die präatmosphärische Tiefe, berechnet für verschiedene Meteoroiden-Radien. Die gemessene Aktivität ist als schwarze Linie eingetragen. Strichliert sind die Fehler eingetragen.

Die gemessene ^{26}Al -Aktivität (Tabelle 4.3) kann nur dann in ALH 84001 erzeugt worden sein, wenn der Meteoroid einen Radius von mehr als 10 cm besaß (Abbildung 4.9).

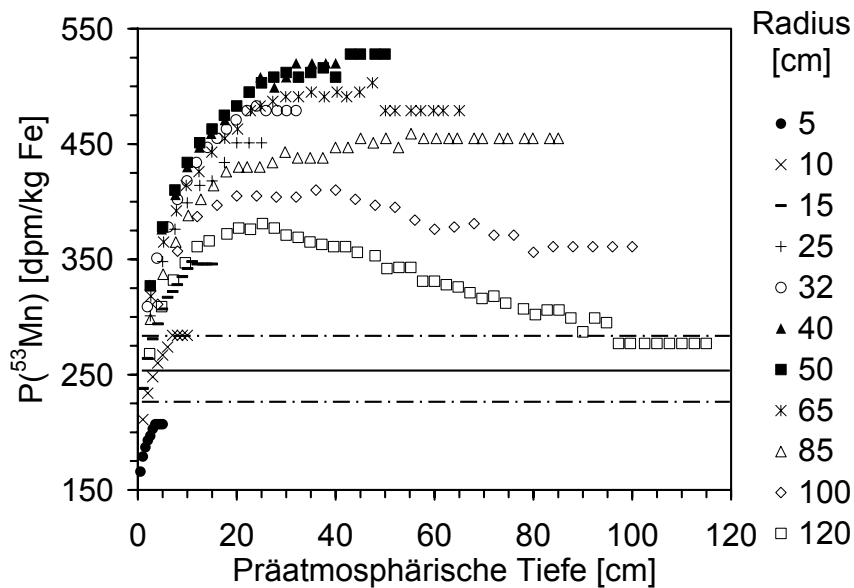


Abbildung 4.10: Dieselbe Auftragung wie in Abbildung 4.9, hier für ^{53}Mn

Aus dem Vergleich der gefundenen ^{53}Mn -Konzentration mit den Modellrechnungen (Abbildung 4.10) geht hervor, dass neben einem Radius von 120 cm, der mit den ^{10}Be -Daten unvereinbar ist (Abbildung 4.11), der präatmosphärische Radius von ALH 84001 nur 10 oder 15 cm betragen haben kann. Ein Radius von 10 cm ist aber mit der gemessenen ^{26}Al -Aktivität unvereinbar, so dass der einzige Meteoroiden-Radius, in dem alle gemessenen Aktivitäten aufgebaut werden können, 15 cm beträgt.

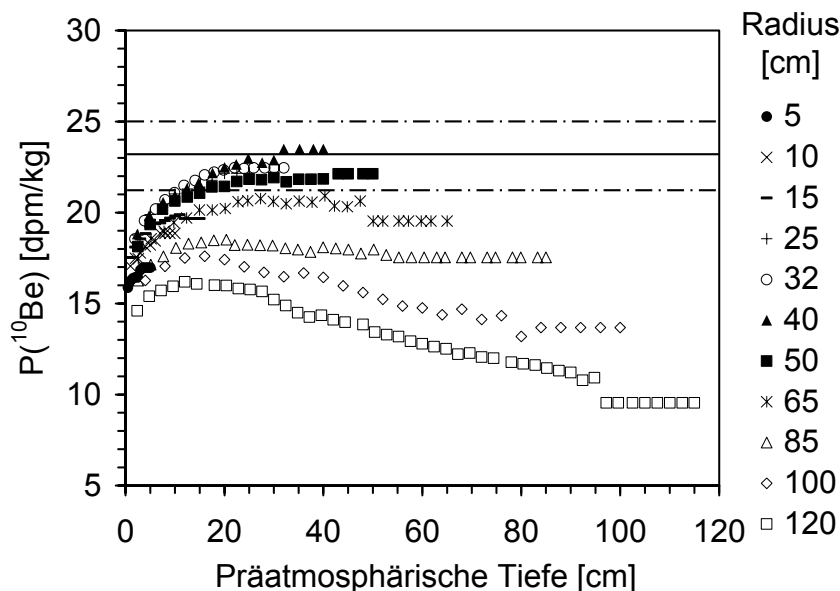


Abbildung 4.11: Für verschiedene Meteoroiden-Radien berechnete ^{10}Be -Produktionsrate gegen die präatmosphärische Tiefe der Probe (Punkte). Die gefundene ^{10}Be -Konzentration (Tabelle 4.3) ist als horizontale Linie mit Fehlern (strichlierte Linien) eingetragen.

Berücksichtigt man den 9 %igen Fehler im Modell, so ist es möglich auch die ^{10}Be -Aktivität mit einem präatmosphärischen Radius von 15 cm zu erklären.

Mit den gemessenen Daten ist es also möglich, ein kosmisches Bestrahlungsalter von $(16,7 \pm 1,6)$ Ma anzugeben. Ebenso ist es möglich, einen Radius von ca. 15 cm abzuschätzen. Die Angabe einer definierten Abschirmtiefe ist mit den Messwerten nicht möglich. Wegen der leichten ^{22}Ne -Überproduktion kann jedoch eine Abschirmtiefe von < 10 cm angenommen werden. Alle diese Beobachtungen decken sich mit Spaltspurmessungen von Goswami et al. [GOS97] (dort: Radius = 10 cm und $T_{\text{exp}} = 16,2$ Ma), dem ^{81}Kr -Kr-Alter von $(15,8 \pm 3,3)$ Ma von Terribilini et al. [TER00] und Eugster et al. [EUG02] ($14,7 \pm 0,9$) Ma, dem ^{21}Ne -Alter von Eugster et al. [EUG97] ($14,4 \pm 0,7$) Ma und dem Bestrahlungsalter von Miura et al. [MIU94]. Die von Rösel [RÖS94] und Nishiizumi et al. [NIS94] gefundenen Alter von 3,9 bzw. 4-7 Ma können damit verworfen werden.

Die Übereinstimmung der Daten dieser Arbeit mit denen anderer Arbeiten zeigt, dass die Resultate des verwendeten Modells unter Berücksichtigung eines ausreichenden Satzes an Radionuklidaten weitgehende Aussagen möglich machen. Konkrete Aussagen über Bestrahlungsalter und die Größe eines Meteoroiden können bei Anwendung anderer Techniken oft nur durch die Messung einer Vielzahl von Proben eines Meteoriten gewonnen werden [GOS97]. Dies verdeutlicht die Leistungsfähigkeit physikalischer Modelle.

Chassigny

Nach einer tabellarischen Zusammenfassung (Tabelle 4.4) der gemessenen kosmogenen Nuklide erfolgt die Diskussion ausgehend vom Bern-Plot [EBE66] (Abbildung 4.12) über die Bestimmung des Bestrahlungsalters mit Hilfe der ^3He - und ^{21}Ne -Konzentrationen. Für die Berechnung der theoretischen Produktionsraten werden die Analysendaten von [LOD98] eingesetzt (berücksichtigte Elemente siehe Tabelle 1.2), für Sr, Rb, Y und Zr liegen auch in diesem Falle same-sample Daten vor [JOC02].

Tabelle 4.4: Konzentrationen kosmogener Nuklide in Chassigny, Edelgase nach [SCH03b].

Chassigny	
^{10}Be	$(24,7 \pm 2,0)$ dpm/kg
^{26}Al	$(49,1 \pm 4,1)$ dpm/kg
^{53}Mn	(257 ± 26) dpm/kg Fe
^3He	$(20,98 \pm 1,39) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{21}Ne	$(3,824 \pm 0,222) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{22}Ne	$(4,222 \pm 0,064) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{36}Ar	$(0,196 \pm 0,012) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{38}Ar	$(0,293 \pm 0,011) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
$^{80}\text{Kr}^*$	$(0,52 \pm 0,14) \cdot 10^{-12}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{83}Kr	$(10,3 \pm 2,3) \cdot 10^{-13}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP

* Neutroneninduzierte Komponente

Die im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Radionuklidkonzentrationen liegen im Falle von ^{10}Be etwas höher als die bisher gemessenen Werte [MET03 und Zitate darin], die bei $(20,5 \pm 3,1)$ dpm/kg liegen. Die Abweichung kann durch unterschiedliche Abschirmtiefen der verschiedenen Proben erklärt werden. Im Falle von ^{26}Al liegt der gemessene Wert genauso hoch wie die Literaturwerte von $(47,0 \pm 0,7)$ dpm/kg bzw.

($47,8 \pm 4,4$) dpm/kg [MET03 und Zitate darin], ^{53}Mn ist hier zum ersten Mal bestimmt worden.

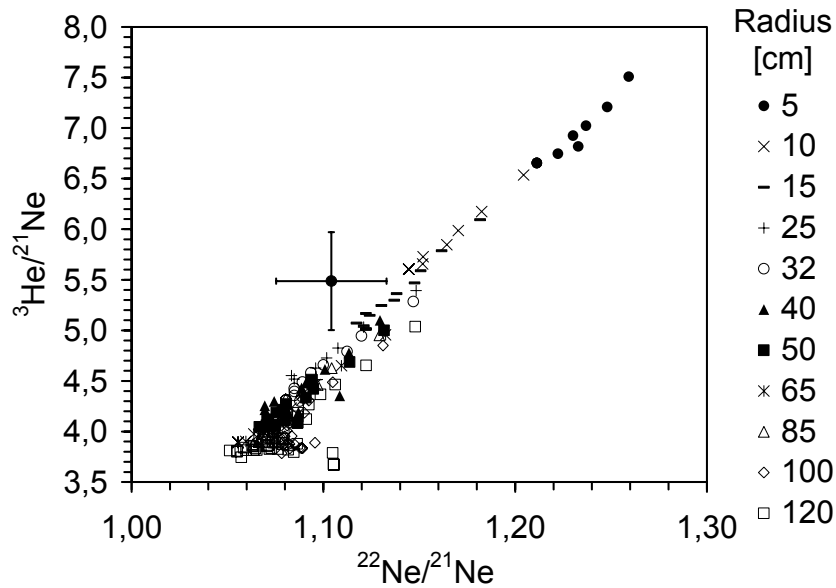


Abbildung 4.12: Bernplot für Chassigny. Im Rahmen der Fehler liegt der Messwert auf der Bernlinie, ^3He und ^{21}Ne sollten konkordante Alter liefern.

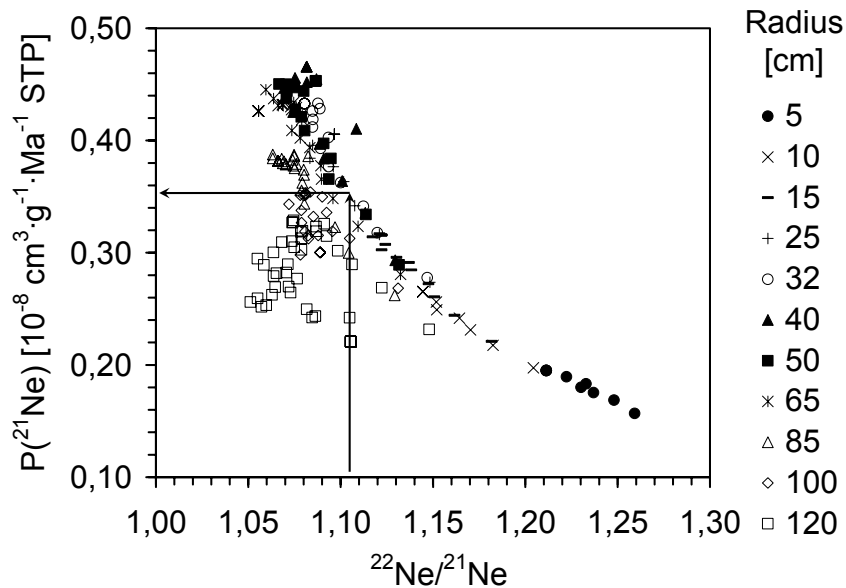


Abbildung 4.13: Produktionsrate von ^{21}Ne gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die mit dem Modell für verschiedene Meteoroiden-Radien berechneten Werte sind als Punkte eingetragen. Entlang der Pfeile wird aus dem gemessenen $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis eine Produktionsrate für ^{21}Ne ermittelt.

Mit dem gemessenen $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis ergibt sich eine ^{21}Ne -Produktionsrate von $P_{21} = (0,360 \pm 0,034) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$. Das führt bei der gemessenen ^{21}Ne -Konzentration (Tabelle 4.4) zu einem ^{21}Ne -Bestrahlungsalter von $T_{21} = (10,6 \pm 1,2) \text{ Ma}$.

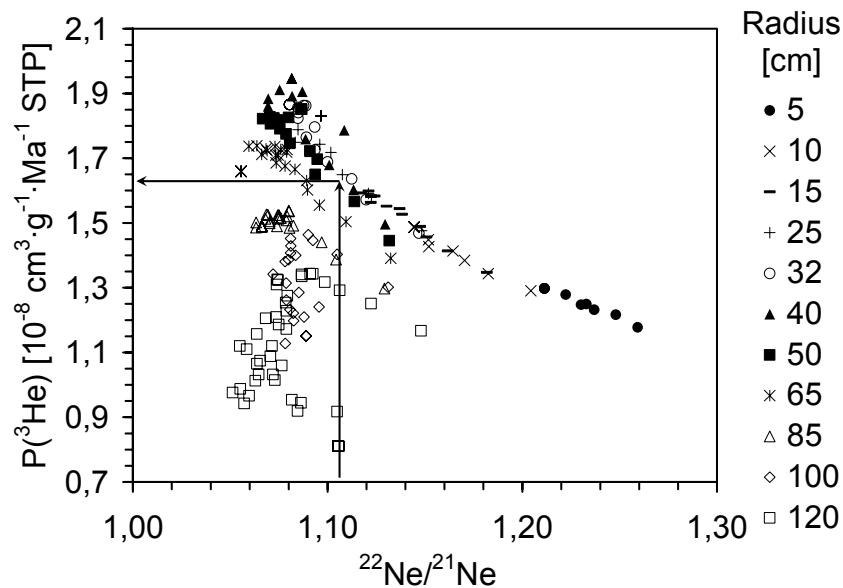


Abbildung 4.14: Produktionsrate von ^3He gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die mit dem Modell für verschiedene Meteoroiden-Radien berechneten Werte sind als Punkte eingetragen. Entlang der Pfeile wird aus dem gemessenen $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis eine Produktionsrate für ^3He ermittelt.

Mit einer Produktionsrate von $P_3 = (1,63 \pm 0,15) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$ (Abbildung 4.14) ergibt sich ein Bestrahlungsalter von $T_3 = (12,9 \pm 1,4) \text{ Ma}$. Dieses ist etwas höher als das ^{21}Ne -Alter, beide sind aber im Rahmen der Fehler konkordant. Daher wird für das Bestrahlungsalter T_{exp} der Mittelwert beider Alter berechnet: $T_{\text{exp}} = (11,8 \pm 1,1) \text{ Ma}$.

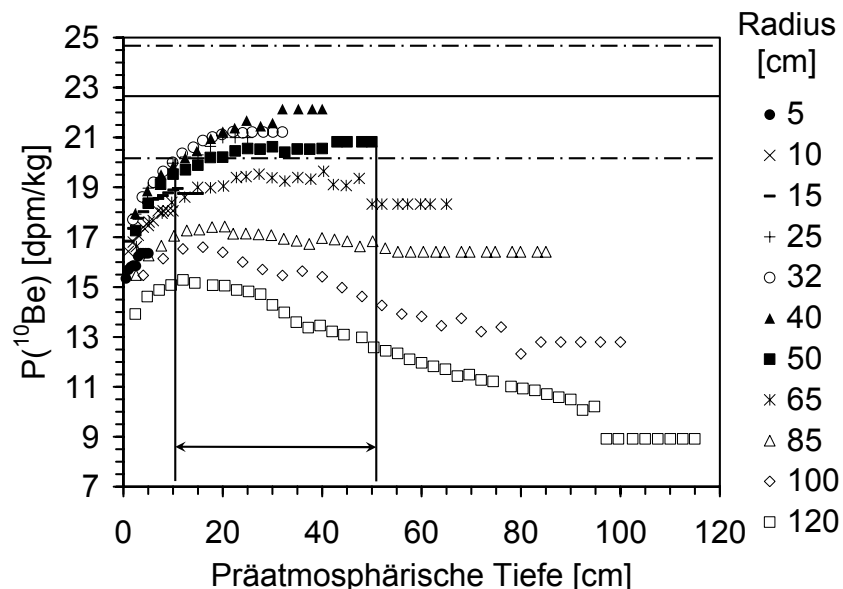


Abbildung 4.15: Für verschiedene Meteoroidenradien berechnete Produktionsraten von ^{10}Be gegen die präatmosphärische Tiefe. Der Messwert ist als horizontale Linie mit Fehlern eingezeichnet (strichlierte Linien). Der Doppelpfeil verdeutlicht die mögliche Lage der Probe, innerhalb der die gefundene ^{10}Be -Konzentration gebildet werden kann.

Aus Diagramm 4.15 geht zum einen eine Einschränkung des Radius auf 25-50 cm und zum anderen eine präatmosphärische Tiefe der analysierten Probe von mehr als 10 cm hervor.

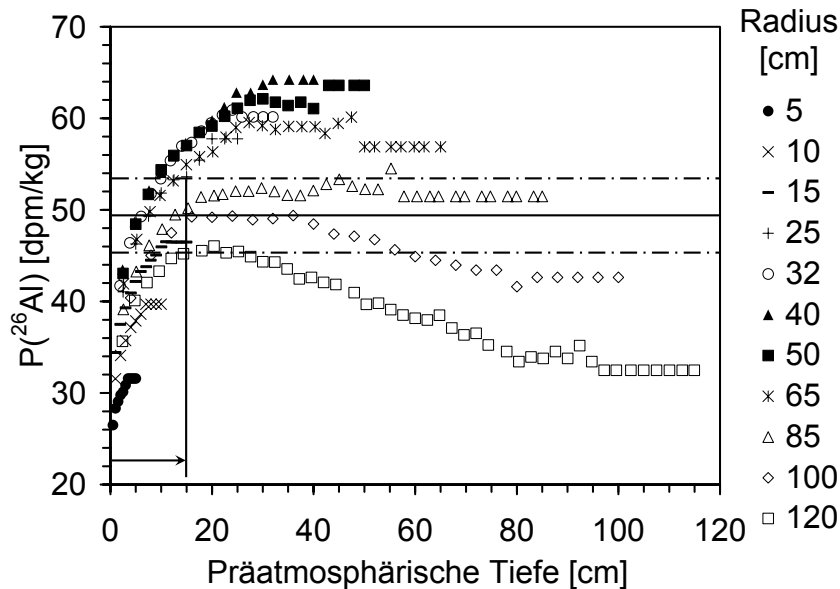


Abbildung 4.16: Das gleiche Diagramm wie in Abbildung 4.15, hier für ^{26}Al . Nimmt man einen Radius zwischen 25 und 50 cm an (Abb. 4.14), so ergibt sich eine maximale präatmosphärische Tiefe der Probe von 15 cm in der die gefundene ^{26}Al -Konzentration gebildet werden kann.

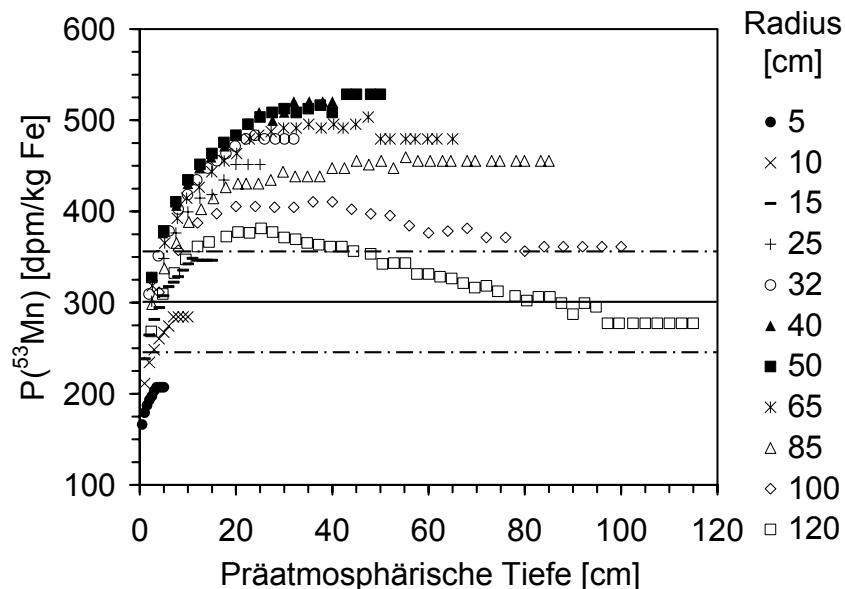


Abbildung 4.17: Dieselbe Darstellung wie in Abbildung 4.15 und 4.16, jedoch für ^{53}Mn . Neben den berechneten ^{53}Mn -Konzentrationen (Punkte) ist die für eine Bestrahlungszeit von $(11,8 \pm 1,1)$ Ma auf Sättigung korrigierte ^{53}Mn -Aktivität eingetragen.

Die ^{53}Mn -Aktivität ist jedoch im Vergleich zu der ^{10}Be und ^{26}Al -Aktivität zu gering. Für Radien zwischen 25 und 50 cm ergäbe sich eine maximale Tiefe von 5 cm. Berücksichtigt man jedoch die Unsicherheiten im Modell ($\approx 9\%$), so lässt sich auch die

^{53}Mn -Aktivität in Einklang zu den Informationen aus der ^{10}Be und ^{26}Al -Aktivität bringen und eine Abschirmtiefe angeben, die nicht mehr als 10 cm betrug.

Für Chassigny lässt sich also aus den gemessenen Daten ein Bestrahlungsalter von $(12,3 \pm 1,1)$ Ma ableiten, ein präatmosphärischer Radius von 25-40 cm. Die Lage der Probe ergibt sich aus den gefundenen ^{10}Be -, ^{26}Al - und ^{53}Mn -Aktivitäten zu 10 cm, die ^{53}Mn -Aktivität ist etwas zu niedrig. Das gemessene Bestrahlungsalter deckt sich im Rahmen der Fehler mit Daten aus [EUG97] und denen von Terribillini et al. [TER98] sowie den ^{81}Kr -Kr-Altern aus [TER00].

EETA 79001A

Die Modellrechnungen wurden mit der chemischen Zusammensetzung aus [LOD98] durchgeführt. Für Rb, Sr, Y und Zr wurden Werte aus same-sample Analysen verwendet [JOC02]. Die gemessenen Nuklid-Konzentrationen sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst.

Tabelle 4.5: Konzentrationen der gemessenen kosmogenen Nuklide in EETA 79001 A. Edelgase nach [SCH03b].

EETA 79001A	
^{10}Be	$(5,3 \pm 0,4)$ dpm/kg
^{26}Al	$(40,9 \pm 3,9)$ dpm/kg
^{53}Mn	(40 ± 5) dpm/kg Fe
^3He	$(0,97 \pm 0,08) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{21}Ne	$(0,140 \pm 0,007) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{22}Ne	$(0,184 \pm 0,072) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{36}Ar	$(0,031 \pm 0,005) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{38}Ar	$(0,046 \pm 0,004) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{83}Kr	$(3,0 \pm 1,7) \cdot 10^{-13}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP

Die gemessene ^{10}Be -Aktivität liegt im mittleren Bereich der bisher in der Literatur gemessenen Proben (4,7-8,5 dpm/kg [MET03 und Zitate darin], [NIS87] und [SCH01]), ^{26}Al liegt etwas darüber (23-34 dpm/kg [MET03 und Zitate darin], [NIS87] und [SCH01]). Die gemessene ^{53}Mn -Konzentration stimmt im Rahmen der Fehler mit [SCH01] [(30 ± 5) dpm/kg Fe] überein. Die ^{53}Mn -Konzentrationen aus [SCH01] und dieser Arbeit liegen wiederum deutlich niedriger als die in [MET03 und Zitate darin] mit (65 ± 15) dpm/kg Fe und (62 ± 42) dpm/kg Fe angegebenen (letzterer Wert ist mit einem sehr großen Fehler behaftet, dass man auch von einer „Übereinstimmung“ sprechen könnte). Verschiedene Abschirmtiefen können die Diskrepanzen erklären.

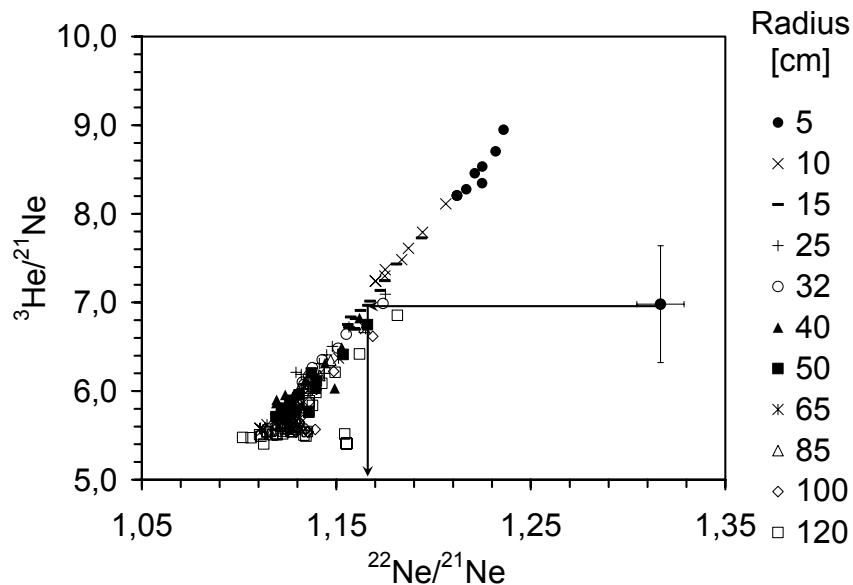


Abbildung 4.18: Bernplot für EETA 79001A. Man erkennt eine sehr starke Überproduktion an ^{22}Ne . Das gemessene Ne-Verhältnis wird daher auf $1,166 \pm 0,010$ korrigiert.

Dieses sehr hohe $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis wurde auch von [BOG84] in dieser Größenordnung gemessen, Arbeiten von Becker et al. [BEC84], Swindle et al. [SWI86] und auch Sarafin et al. [SAR85a] hingegen zeichnen ein uneinheitliches Bild, welches von Verhältnissen von 1,14 bis hinauf zu 1,28 reicht. Die Ne-Konzentrationen in EETA 79001 unterliegen also großen Schwankungen. Die Daten von [SCH03b] liegen innerhalb des Bereichs dieser Schwankungen.

Durch die hohen $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnisse liegt eine SCR-Überproduktion nahe. Da aber kein im Rahmen dieser Arbeit gemessenes Radionuklid eine Überproduktion zeigt, werden SCR-Effekte ausgeschlossen. Na, Mg, Al und Si sind die Haupttargetelemente für die ^{22}Ne -Produktion. Die Anteile dieser Elemente an der Gesamt-Ne-Produktion sind im Vergleich zu ALHA 77005 und Sayh al Uhaymir 005 unterschiedlich (Tabelle 4.11), es wird mehr ^{22}Ne aus Si produziert. Dies wird jedoch in den Rechnungen berücksichtigt, so dass das nicht als Ursache in Betracht gezogen werden kann. Für den ^{22}Ne -Überschuss können daher Effekte angenommen werden, die auf eine Vorbestrahlung in größerer Tiefe (3-5 m) eines größeren Körpers hinweisen. Am wahrscheinlichsten bei einem solchen Szenario wäre eine Vorbestrahlung auf dem Mars, da die Ejektion sehr großer Körper durch das relativ große Schwerfeld unwahrscheinlich ist.

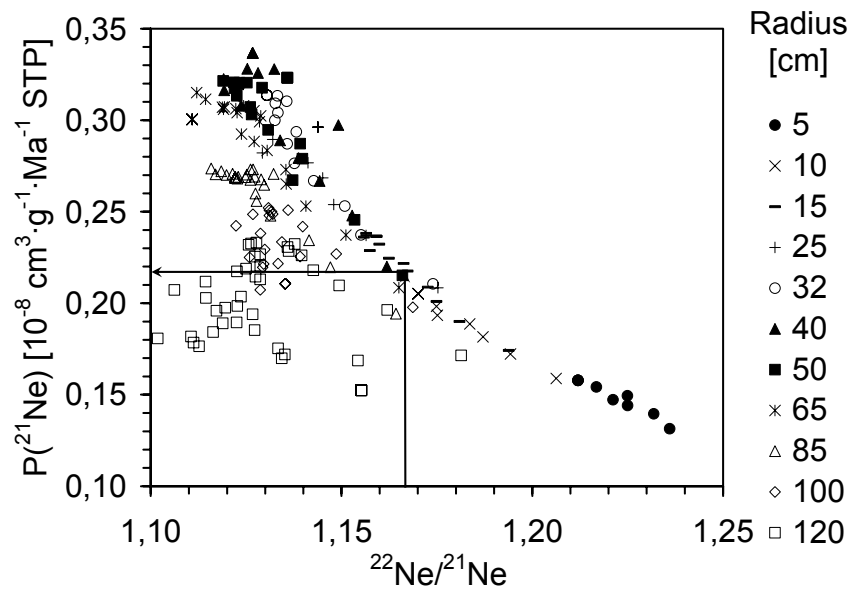


Abbildung 4.19: Produktionsrate von ^{21}Ne gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis zur Berechnung des ^{21}Ne -Bestrahlungsalters. Die Punkte sind berechnete Werte, entlang der Pfeile wird die Produktionsrate für ^{21}Ne abgelesen.

Zur Produktionsratenberechnung ist das mittels des Bern-Plots korrigierte $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis herangezogen worden. Mit einer Produktionsrate von $(0,218 \pm 0,029) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$ folgt ein ^{21}Ne -Bestrahlungsalter von $(0,64 \pm 0,09) \text{ Ma}$.

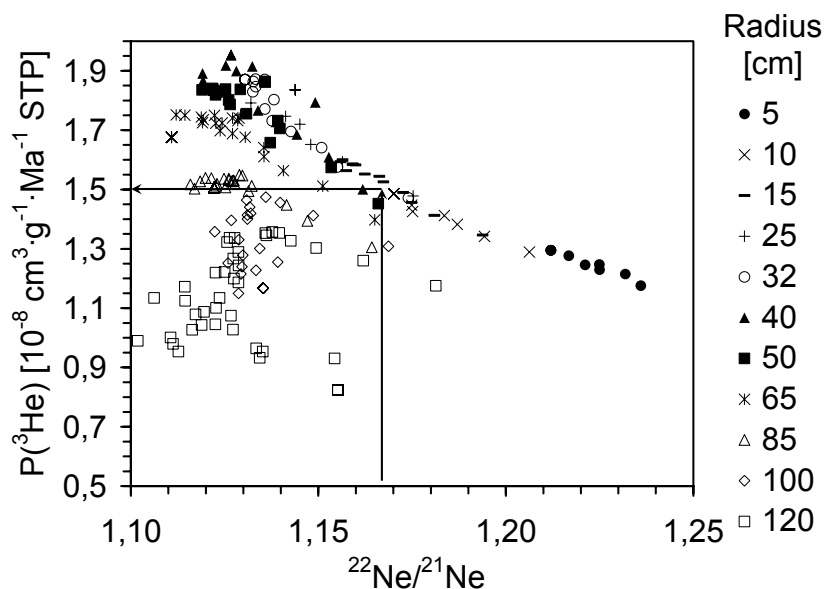


Abbildung 4.20: Gleiche Auftragung wie in Abbildung 4.19, hier für ^3He .

Es ergibt sich eine Produktionsrate von $P_3 = (1,49 \pm 0,19) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$. Damit errechnet sich das ^3He -Alter zu: $T_3 = (0,65 \pm 0,10) \text{ Ma}$. Das ^3He - und das ^{21}Ne -Alter sind konkordant, das Bestrahlungsalter von EETA 79001 ist $(0,65 \pm 0,07) \text{ Ma}$.

Da in der Literatur sehr widersprüchliche Angaben über das terrestrische Alter von EETA 79001A gemacht werden, die von $(12 \pm 2) \text{ ka}$ [JUL88] bis hin zu 320 ka

[SAR85a] reichen, wird eine Abschätzung anhand der Radionuklide vorgenommen. Dazu werden mit Hilfe des Modells Aktivitäten berechnet, die sich nach einer Bestrahlungszeit von 0,65 Ma ergeben würden. Der freie Parameter ist das terrestrische Alter. In Abbildung 4.21 ist die Berechnung für ein terrestrisches Alter von 0 Ma durchgeführt worden. Damit liegen die gemessenen Aktivitäten genau im theoretisch berechneten Bereich. Führt man die Berechnungen mit größeren terrestrischen Altern durch, dann fallen die berechneten Aktivitäten ab einem terrestrischen Alter von mehr als 0,25 Ma nicht mehr mit den gemessenen Aktivitäten zusammen (Abbildung 4.22). Daher ist ein Alter von 0,25 Ma die Obergrenze für das terrestrische Alter.

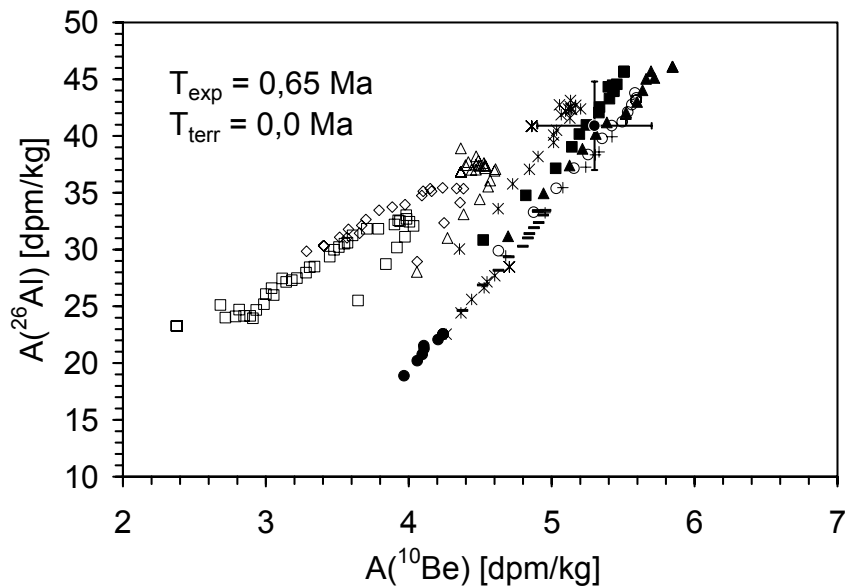


Abbildung 4.21: Theoretisch berechnete ^{26}Al -Aktivität gegen die ^{10}Be -Aktivität in EETA 79001A für ein Bestrahlungsalter von 0,65 Ma und ein terrestrisches Alter von 0 Ma. Der gemessene Punkt mit den Fehlerbalken liegt genau im berechneten Bereich für 40 bis 50 cm große Meteoroiden.

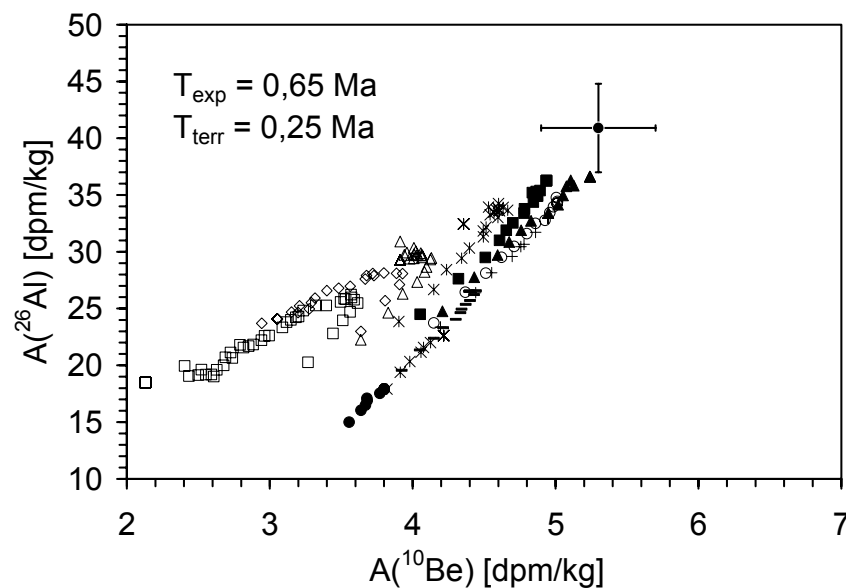


Abbildung 4.22: Theoretisch berechneten ^{26}Al -Aktivität gegen die ^{10}Be -Aktivität in EETA 79001A für ein Bestrahlungsalter von 0,65 Ma und ein terrestrisches Alter von 0,25 Ma. Die berechneten Aktivitäten (Punkteschar) sind zu kleineren Aktivitäten verschoben. Innerhalb der Messfehler wäre ein terrestrisches Alter von 0,25 Ma gerade noch im Einklang mit den Berechnungen. Bei einem noch größeren terrestrischen Alter würden die berechneten Punkte aufgrund des Zerfalls vom ^{26}Al bei geringeren Werten liegen und nicht mehr in Übereinstimmung mit den gemessenen Aktivitäten sein.

Mit diesen Berechnungen kann das in [SAR85a] berechnete, terrestrische Alter sehr stark angezweifelt werden. Außerdem ist völlig unklar, wie in einem Meteorit, der 320 ka [SAR85a] weitgehend von Radionuklid produzierender Strahlung abgeschirmt wäre, überhaupt irgendwelche ^{14}C -Aktivitäten aufweisen könnte. In EETA 79001 ist jedoch eine ^{14}C -Konzentration von $(15,9 \pm 0,2)$ dpm/kg nachgewiesen worden [JUL88]. Dem terrestrischen Alter von (12 ± 2) ka aus [JUL88] ist daher der Vorzug zu geben und wird auch als Basis für die weitere Diskussion herangezogen. Auch die einfache Bildung eines Mittelwertes der terrestrischen Alter, wie sie von Eugster et al. [EUG97] vorgenommen wurde, erscheint nicht sinnvoll.

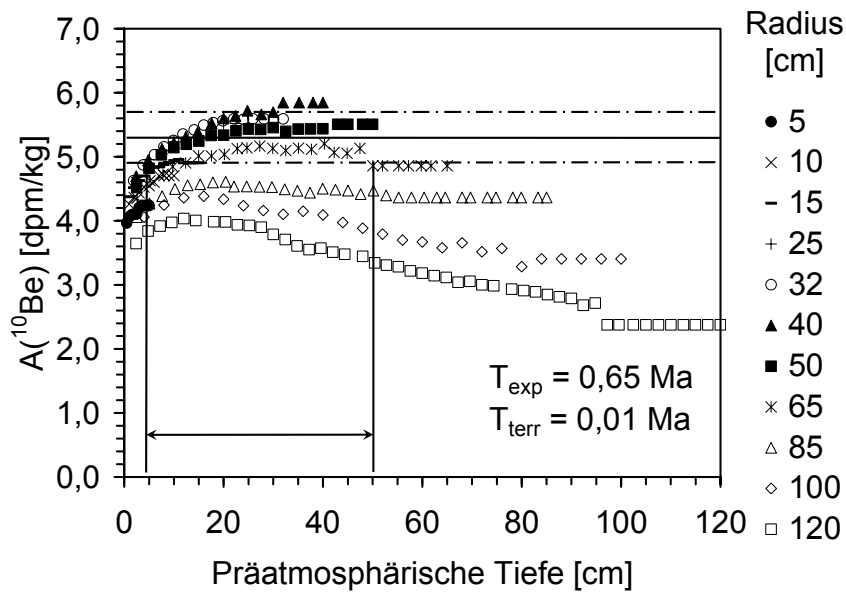


Abbildung 4.23: Mit den im Diagramm angegebenen Parametern für verschiedene Meteoroiden-Radien berechnete ^{10}Be -Aktivitäten als Funktion der präatmosphärischen Tiefe. Die horizontale Linie ist die gemessene Aktivität mit Fehler (strichliert).

Die gemessene ^{10}Be -Aktivität kann im Rahmen der Fehler (strichlierte Linie) nur dann zustande kommen, wenn der Meteoroid einen Radius zwischen 25 und 65 cm hatte. Die Probe muss sich in einer Tiefe zwischen 5 und 50 cm befunden haben.

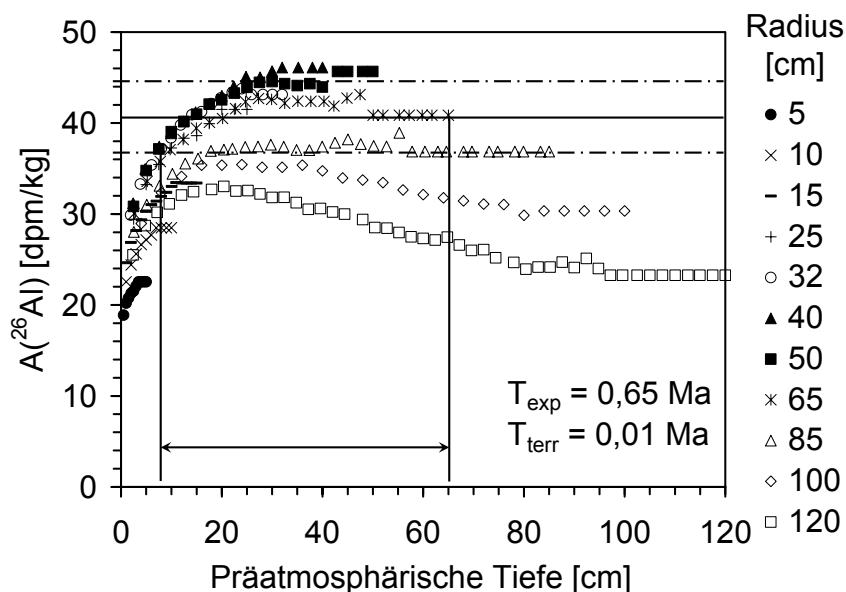


Abbildung 4.24: Für verschiedene Meteoroiden-Radien berechnete ^{26}Al -Aktivität gegen die präatmosphärische Tiefe. Die Berechnung wurde für die im Diagramm angegebenen Alter durchgeführt. Der gemessene Wert ist mit Fehler (strichliert) als horizontale Linie eingetragen.

Ein Meteoroid mit einem Radius von 15 cm kann die beobachtete ^{26}Al -Aktivität nicht aufbauen (Abbildung 4.24). Die möglichen Radien von 25 cm bis 65 cm sind mit der beobachteten ^{26}Al -Aktivität verträglich. Die Probe muss sich in einer Tiefe zwischen 8

und 50 cm befunden haben, wobei Tiefen größer als 50 cm durch die gemessene ^{10}Be -Aktivität ausgeschlossen werden können (Diagramm 4.23)

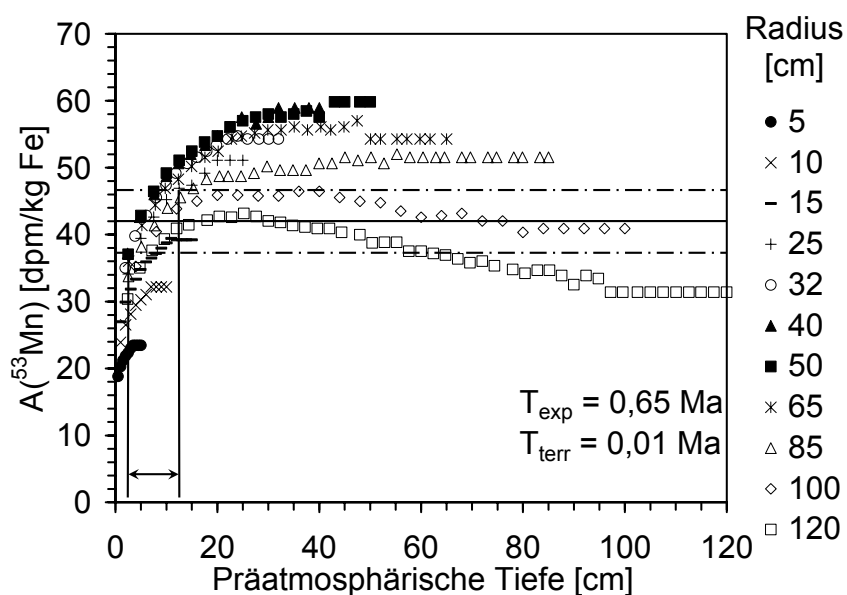


Abbildung 4.25: Dieselbe Auftragung wie in Abb. 4.23 und 4.24 für ^{53}Mn .

Mit der gemessenen ^{53}Mn -Aktivität wird die Abschirmtiefe der Probe wesentlich eingeschränkt, wenn man von einem Meteoroid mit einem Radius von 25 bis 65 cm ausgeht. Die gemessene ^{53}Mn -Aktivität kann in Körpern mit dieser Größe im Rahmen der Fehler nur in einem Bereich von 2 bis 13 cm gebildet werden. Damit lässt sich die Abschirmtiefe zwischen 7 cm (^{26}Al -Aktivität, Abbildung 4.24) und 13 cm (^{53}Mn -Aktivität, Abbildung 4.25) festlegen.

Im Falle von EETA 79001A kann somit der in [SAR85a] veröffentlichte Wert für das terrestrische Alter falsifiziert werden und das Bestrahlungsalter lässt sich zu $(0,65 \pm 0,1) \text{ Ma}$ angeben. Der Radius lässt sich zwischen 25 und 65 cm festlegen. Die analysierte Probe befand sich in einer Tiefe zwischen 7 und 13 cm.

Es konnten also im Gegensatz zu [NIS86b] keine eindeutigen SCR-Effekte nachgewiesen werden. SCR, die die beobachtete Ne-Überproduktion hervorgerufen haben könnte, hätte zumindest auch die Niederenergie-Produkte ^{26}Al und ^{53}Mn produzieren sollen. Bei diesen Produkten konnte jedoch keine Überproduktion gefunden werden (Abbildungen 4.24 und 4.25).

Damit könnte EETA 79001A evt. auf dem Mars vorbestrahlt worden sein. Dann müsste die Lage der Probe auf dem Mutterkörper in einer Tiefe gelegen haben, in der zwar eben noch Ne-Isotope gebildet worden wären, jedoch keine nennenswerten Radionuklidkonzentrationen. Nishiizumi et al. geben dafür eine Tiefe von mehr als 3 m an [NIS86b]. Das geringe Gesamt-Bestrahlungsalter von nur 0,65 Ma spricht jedoch eher dagegen, da eine Bestrahlung von 100 Ma in mehr als 3 m Tiefe, die die Ne-Überproduktion erklären würde, einem scheinbaren Bestrahlungsalter von 1 Ma entsprechen würden [NIS86b].

Governador Valadares

In die Modellrechnungen wurde die chemische Zusammensetzung von [LOD98] eingesetzt, für Rb, Sr, Y und Zr die same-sample Daten aus [JOC02]. Für C gibt es keine Messungen in der Literatur, daher wurde der Mittelwert von Nakhla und Lafayette, die wie Governor Valadares Nakhlite sind, eingesetzt.

Tabelle 4.6: Konzentrationen der kosmogene Nuklide in Governor Valadares, Edelgase von Schwenzer [SCH03b]

Governador Valadares	
^{10}Be	$(23,9 \pm 2,0)$ dpm/kg
^{26}Al	$(84,5 \pm 7,0)$ dpm/kg
^{53}Mn	(513 ± 61) dpm/kg Fe
^3He	$(18,64 \pm 1,29) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{21}Ne	$(2,497 \pm 0,060) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{22}Ne	$(2,891 \pm 0,149) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{38}Ar	$(2,131 \pm 0,054) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
$^{80}\text{Kr}^*$	$(8,5 \pm 2,2) \cdot 10^{-13}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{83}Kr	$(3,8 \pm 0,4) \cdot 10^{-12}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP

* Neutroneninduzierte Komponente

Die gemessene ^{10}Be -Aktivität befindet sich im Bereich bisher veröffentlichter Werte (22,4-25 dpm/kg [MET03 und Zitate darin]). ^{26}Al und ^{53}Mn sind erstmalig im Rahmen dieser Arbeit gemessen worden.

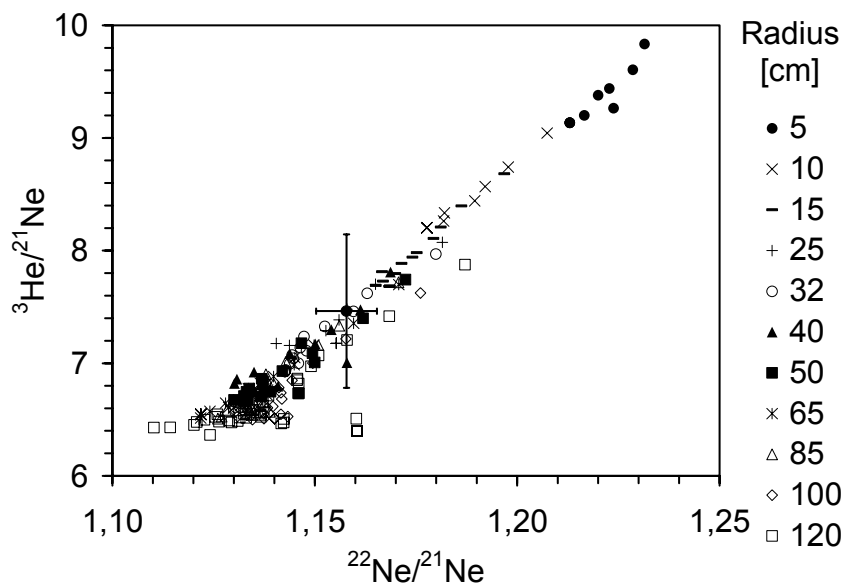


Abbildung 4.26: Bernplot für Governor Valadares. Der Messwert liegt auf der Bernlinie, es trat weder ^{22}Ne -Überproduktion noch ein ^3He -Verlust auf. ^3He und ^{21}Ne sollten demnach konkordante Alter liefern.

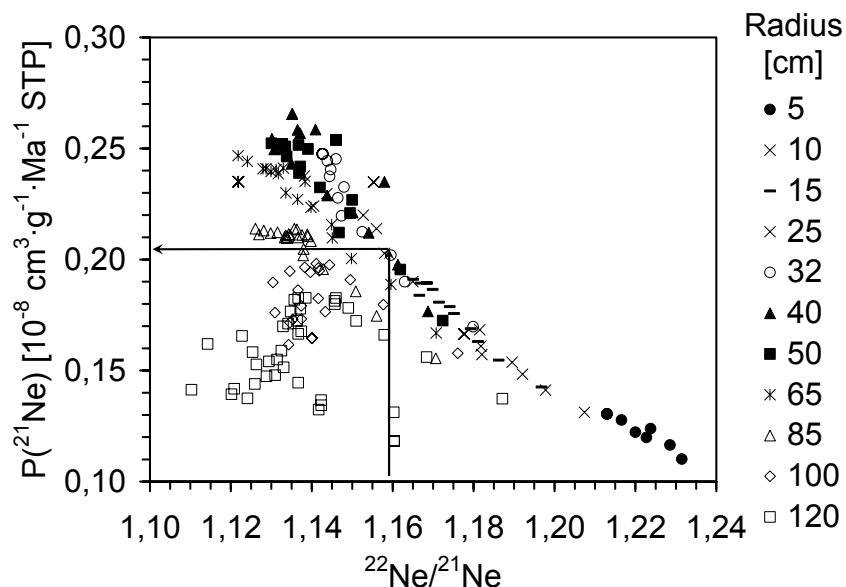


Abbildung 4.27: ^{21}Ne -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die für verschiedene Meteoroiden-Radien berechneten Werte sind durch Punkte dargestellt. Entlang der Pfeile lässt sich die ^{21}Ne -Produktionsrate ablesen.

Mit einem $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis von $1,158 \pm 0,008$ ergibt sich die ^{21}Ne -Produktionsrate zu $P_{21} = (0,204 \pm 0,018) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$. Daraus errechnet sich das ^{21}Ne -Alter zu $T_{21} = (12,2 \pm 1,3) \text{ Ma}$.

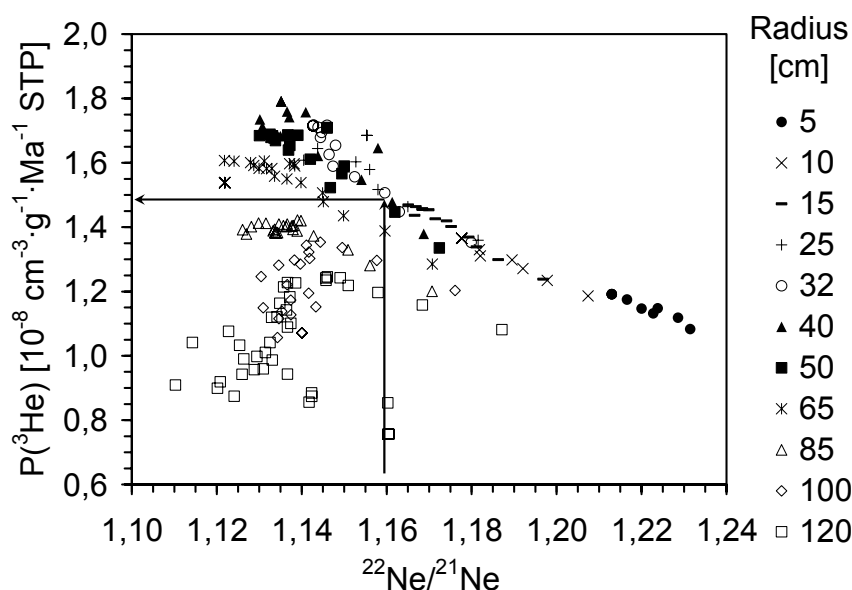


Abbildung 4.28: Das gleiche Diagramm wie Abbildung 4.27: ^3He -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis.

Die ^3He -Produktionsrate lässt sich zu $P_3 = (1,49 \pm 0,13) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$ ermitteln, woraus ein ^3He -Alter von $(12,5 \pm 1,4) \text{ Ma}$ folgt. Damit ergibt sich das Bestrahlungsalter aus dem Mittelwert beider konkordanter Edelgas-Alter zu $T_{\text{exp}} = (12,4 \pm 1,1) \text{ Ma}$. ^{10}Be und ^{26}Al sind somit in Sättigung, ^{53}Mn hat erst 90 % seiner Sättigungsaktivität erreicht. Mit diesen Informationen werden der präatmosphärische

Radius von Governador Valadares und die Abschirmtiefe der Probe anhand der Radionuklide ermittelt.

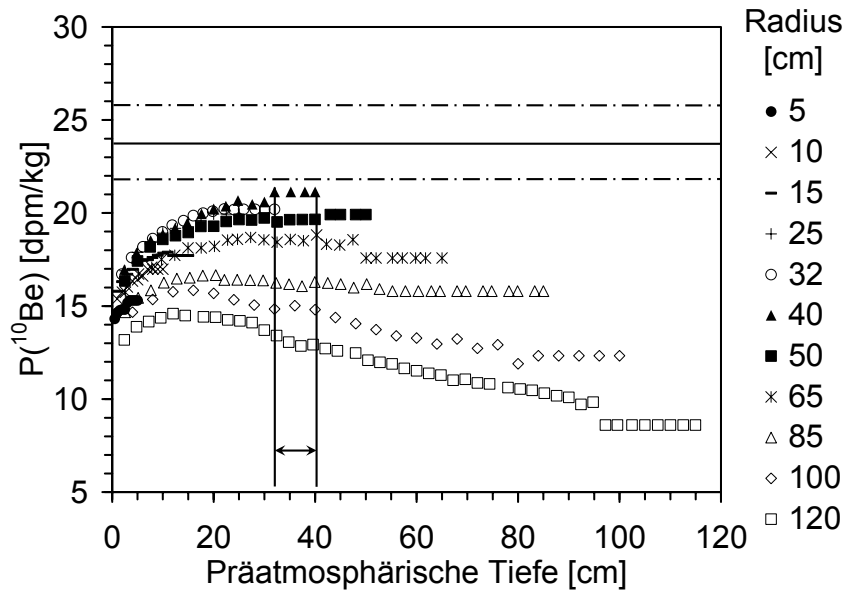


Abbildung 4.29: ^{10}Be -Produktionsrate gegen die Abschirmtiefe der Probe, berechnet für verschiedene Meteoroiden-Radien. Die horizontale Linie kennzeichnet die gemessene Aktivität, die Fehler sind strichliert eingezeichnet.

Im Rahmen einer 9 %igen Unsicherheit des Modells kann ein präatmosphärischer Radius von Governador Valadares von 40 cm bei einer zentralen Lage der Probe (32-40 cm) die darin gemessene ^{10}Be -Aktivität erklären.

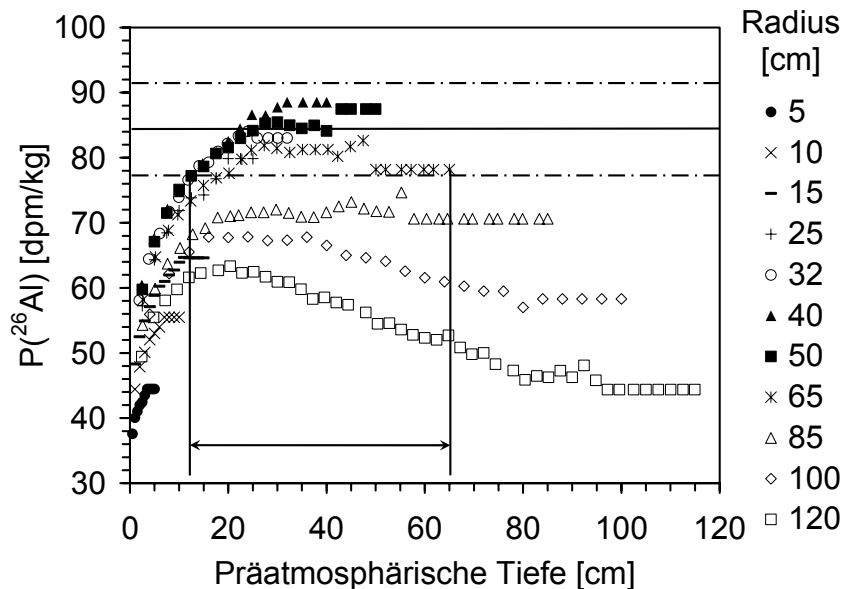


Abbildung 4.30: ^{26}Al -Produktionsrate gegen die präatmosphärische Tiefe. Die berechneten Werte sind als Punkte eingezeichnet, der gemessene Wert als horizontale Linie, seine Fehler strichliert.

Die Aktivität des ^{26}Al ist mit einem präatmosphärischen Radius von 25-65 cm vereinbar. Die Abschirmtiefe der Probe ist größer als 12 cm.

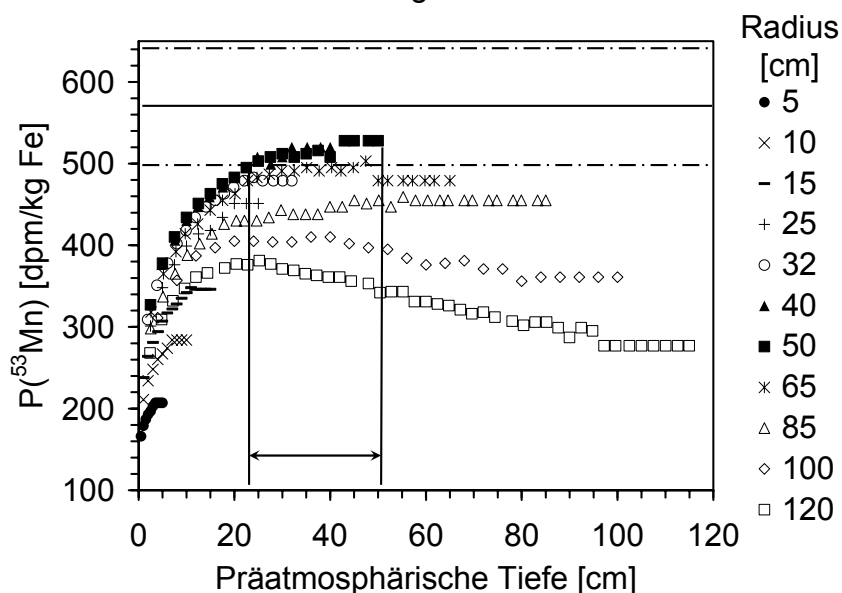


Abbildung 4.31: ^{53}Mn -Produktionsrate gegen die präatmosphärische Tiefe. Der eingetragene Wert ist auf Sättigung korrigiert und als horizontale Linie eingetragen, die Fehler sind strichliert eingezeichnet.

Die gemessene ^{53}Mn -Aktivität kann in einem 40-50 cm großen Meteoroiden gebildet werden. Fasst man die Einschränkungen für Radius und Abschirmtiefe zusammen, die sich aus den drei Radionuklid-Aktivitäten ergeben, dann hatte der Meteoroid von Governador Valadares einen Radius von 40 cm und die Abschirmtiefe der Probe beträgt 32 bis 40 cm. Das Bestrahlungsalter beträgt $T_{\text{exp}} = (12,4 \pm 1,1)$ Ma.

Lafayette

In diesem Fall wurden die Berechnungen der theoretischen Produktionsraten mit der Bulkanalyse von [LOD98] durchgeführt. Für die Elemente Rb, Sr, Y und Zr lagen same-sample-Daten aus [JOC02] vor. Die Analyse folgt nach demselben Schema wie auch schon bei den vorigen Meteoriten.

Tabelle 4.7: Konzentrationen kosmogener Nuklide, Edelgase nach [SCH03b]

Lafayette	
^{10}Be	$(21,0 \pm 1,7)$ dpm/kg
^{26}Al	$(80,7 \pm 6,6)$ dpm/kg
^{53}Mn	(318 ± 36) dpm/kg Fe
^3He	$(19,77 \pm 1,50) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{21}Ne	$(2,123 \pm 0,135) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{22}Ne	$(2,569 \pm 0,064) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{38}Ar	$(2,204 \pm 0,087) \cdot 10^{-8}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
$^{80}\text{Kr}^*$	$(10,2 \pm 5,5) \cdot 10^{-12}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{83}Kr	$(94,5 \pm 1,2) \cdot 10^{-12}$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP

* Neutroneninduzierte Komponente

Sowohl die ^{10}Be -Aktivität als auch die die ^{26}Al -Aktivität stimmen mit den bis dato veröffentlichten Werten (^{10}Be : 18,1-19,3 dpm/kg [MET03 und Zitate darin], [NIS87]), (^{26}Al : 86,7 dpm/kg [NIS87]) überein. ^{53}Mn ist im Rahmen dieser Arbeit erstmalig bestimmt worden.

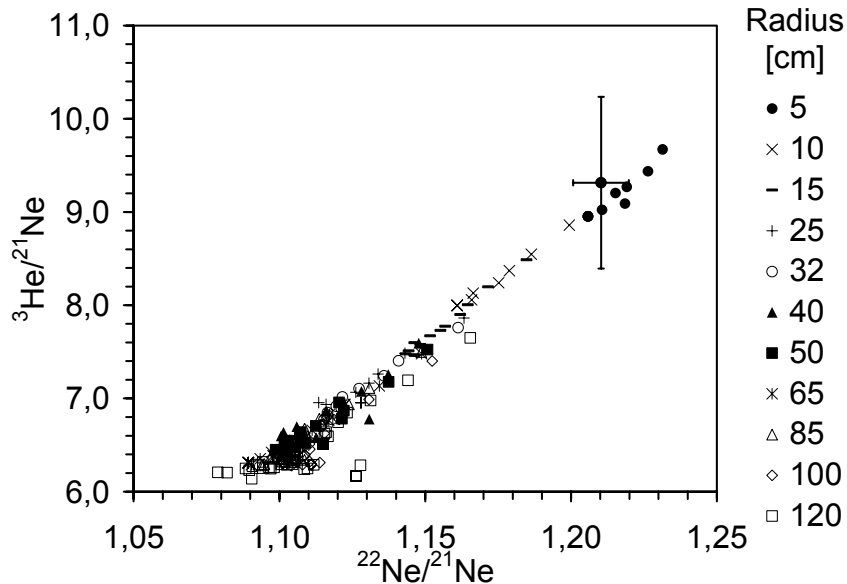


Abbildung 4.32: Bernplot für Lafayette. Die gemessenen Edelgas-Verhältnisse liegen auf der berechneten Bernlinie. Es ist weder eine ^{22}Ne -Überproduktion noch ein ^3He -Verlust aufgetreten, die Bestrahlungsalter aus ^3He und ^{21}Ne sollten konkordante Alter liefern.

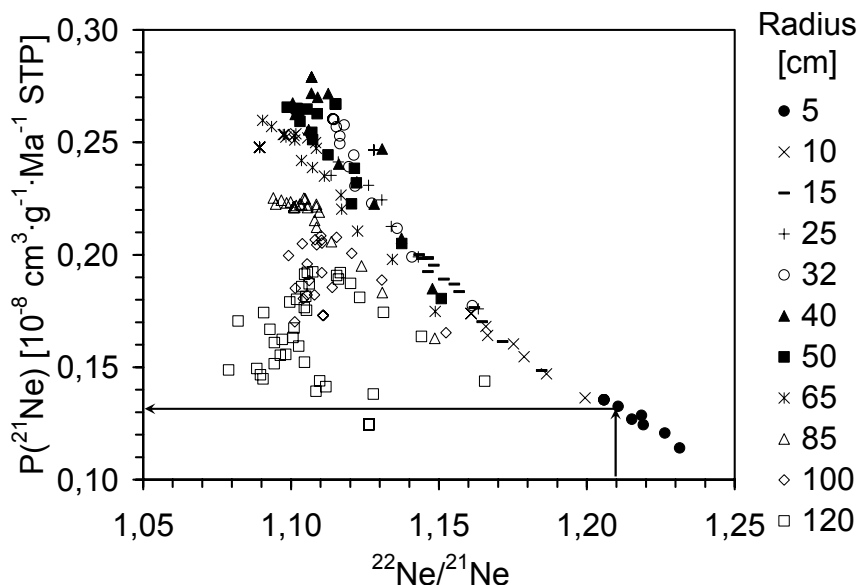


Abbildung 4.33: ^{21}Ne -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die für verschiedenen Meteoroiden-Radien berechneten Werte sind als Punkte eingezeichnet. Dem gemessenen $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis entnimmt man entlang der Pfeile die Produktionsrate von ^{21}Ne .

Mit einer Produktionsrate von $(0,131 \pm 0,118) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$ (Abbildung 4.33) ergibt sich aus der gemessenen ^{21}Ne -Konzentration (Tabelle 4.7) ein Bestrahlungsalter für Lafayette von $(16,2 \pm 1,9) \text{ Ma}$.

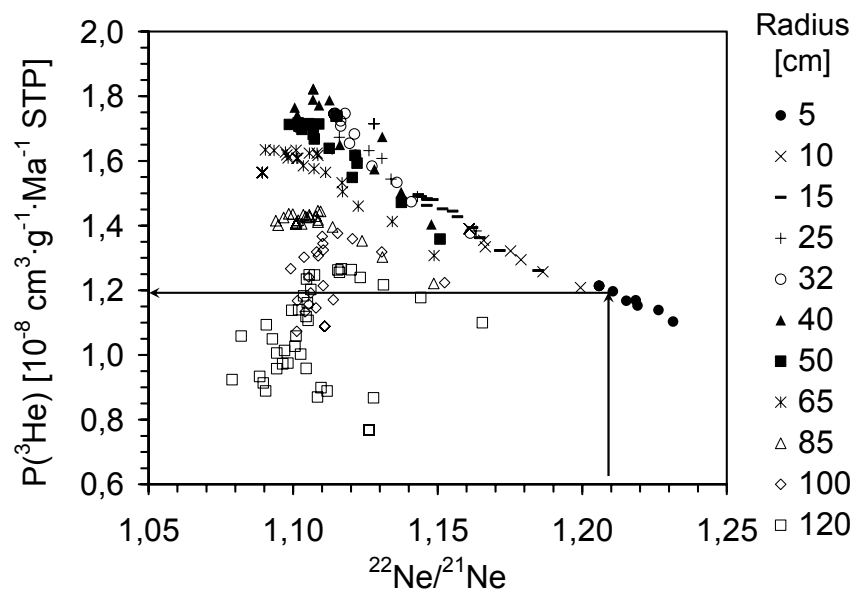


Abbildung 4.34: ^3He -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die Punkte sind die für verschiedene Meteoroiden-Radien berechneten Produktionsraten, entlang der Pfeile entnimmt man die ^3He -Produktionsrate.

Mit einer Produktionsrate von $(1,19 \pm 0,11) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ Ma}^{-1} \text{ STP}$ folgt ein zum ^{21}Ne -Alter konkordantes ^3He -Alter von $(16,6 \pm 2,0) \text{ Ma}$. Damit ergibt sich das Bestrahlungsalter von Lafayette zu $(16,4 \pm 1,8) \text{ Ma}$, was bedeutet, dass die untersuchten Radionuklide in Sättigung sind. Dieses Alter ist höher als das von Eugster et al. ($(11,4 \pm 2,1) \text{ Ma}$ [EUG97]). Das kann zum einen an der prinzipiellen höheren Produktionsrate des empirischen Modells für sehr kleine Meteoroiden liegen. Aus Abbildung 4.33 und 4.34 ist ersichtlich, dass das gemessene Ne-Verhältnis in einem Meteoroiden mit einem Radius von 5 cm produziert werden sollte.

Eine andere Erklärung für das hier höher bestimmte Bestrahlungsalter wären SCR-Effekte, die zu einer Überproduktion von Nukliden führen können. Das verwendete Modell berücksichtigt lediglich den GCR-Anteil der kosmischen Strahlung. Weitere Anhaltspunkte für SCR-Effekte liefern die Radionuklide (Abbildung 4.35).

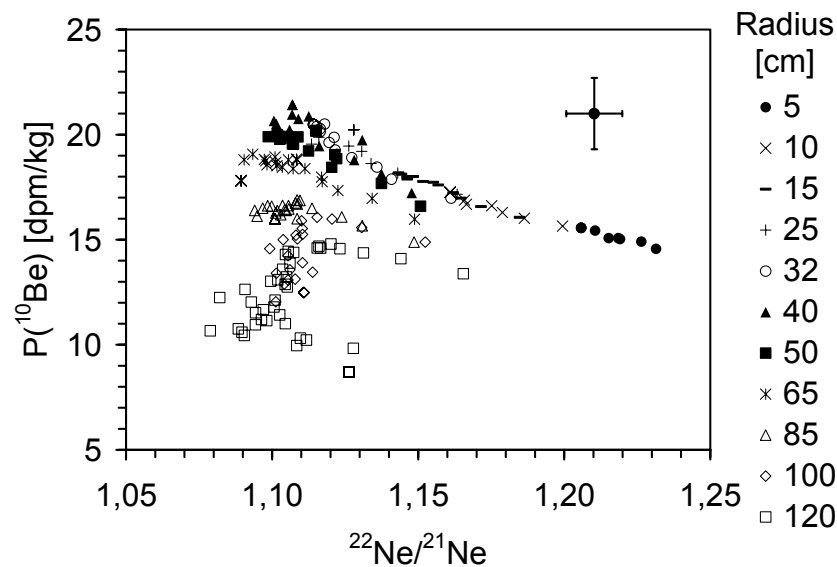


Abbildung 4.35: ^{10}Be Produktionsraten gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis, berechnet für verschiedene Meteoroiden-Radien. Die gemessene ^{10}Be -Konzentration ist etwa 30 % höher als vom Modell unter Berücksichtigung von GCR berechnete Werte.

In Abbildung 4.33 und 4.34 erkennt man, dass das gefundene $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis das für Meteoroiden mit einem Radius von 5 cm berechnete Verhältnis schneidet. Das bedeutet, dass das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis einen Meteoroid mit ebendiesem Radius anzeigt. Die gefundene ^{10}Be -Aktivität kann jedoch nicht durch GCR in einem Meteoroiden mit einem Radius von 5 cm erzeugt werden (Abbildung 4.35). Es hat als eine Überproduktion an ^{10}Be stattgefunden. Der Vergleich der gemessenen ^{26}Al - und ^{53}Mn -Aktivitäten mit den berechneten zeigt einen ähnlichen Effekt (Abbildung 4.36 und 4.37).

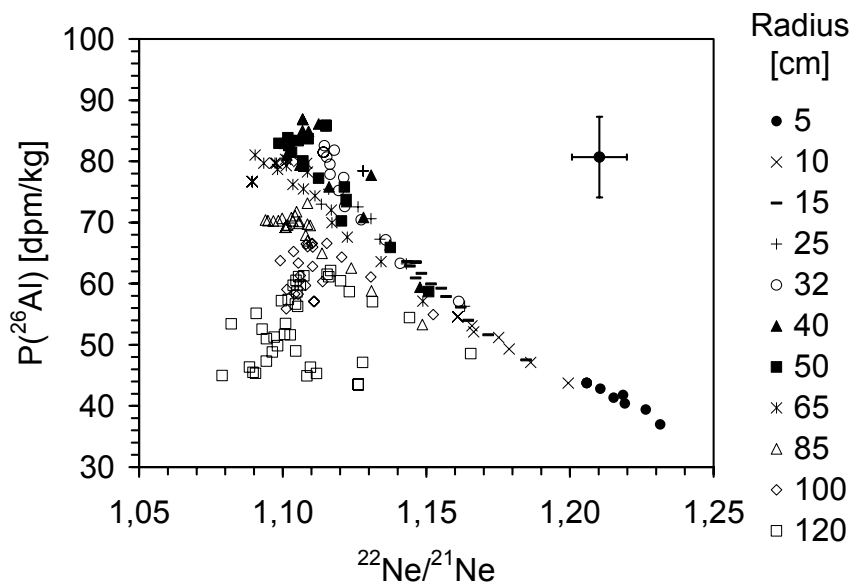


Abbildung 4.36: ^{26}Al -Produktionsrate gegen die präatmosphärische Tiefe. Die Punkte zeigen die für verschiedene Meteoroiden-Radien berechneten Produktionsraten, die gemessene Aktivität ist mit Fehler eingezeichnet. Auch die ^{26}Al -Aktivität ist etwa doppelt so hoch wie auf Basis reiner GCR-Produktion zu erwartende Werte.

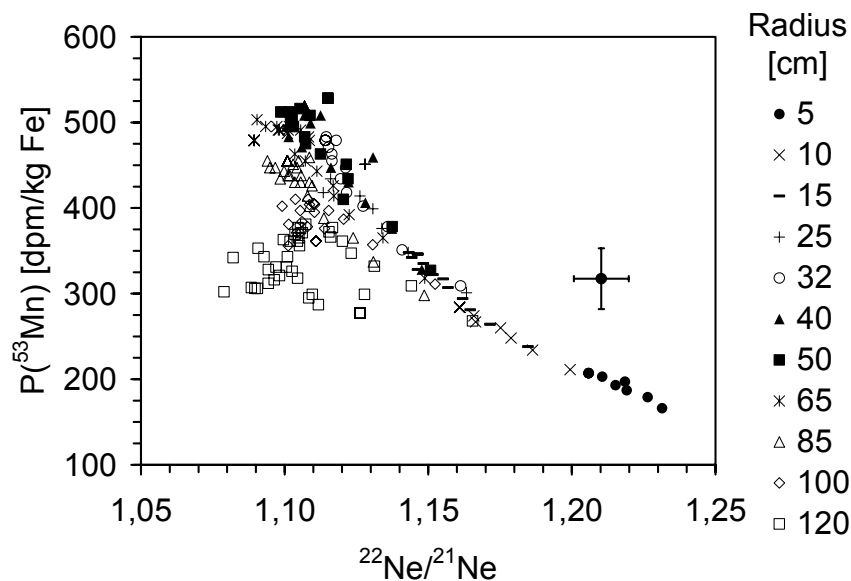


Abbildung 4.37: Gleiche Auftragung wie in Abbildung 4.35 und 4.36 für ^{53}Mn . Auch die gemessene ^{53}Mn -Konzentration ist zu hoch, als das sie in einem 5 cm großen Meteoroiden hätte erzeugt werden können, allerdings weniger ausgeprägt als dies bei ^{26}Al der Fall ist.

Die Radionuklide deuten also – neben dem gegenüber [EUG97] höheren Bestrahlungsalter – auf einen Beitrag solarer kosmischer Strahlung zur Nuklidproduktion hin, die vom verwendeten Modell nicht berücksichtigt wird. Ausschließen lässt sich, dass eine falsche Elementzusammensetzung als Parameter für die Berechnungen verwendet wurde. Dies hätte bei einem Nuklid zu einer Inkonsistenz führen können, jedoch nicht bei allen. Der Hauptanteil des ^{10}Be wird aus C und O gebildet, die wesentlichen Targetelemente für die Produktion von ^{26}Al sind Al und Si und für die Bildung von ^{53}Mn ist dies Fe. Dass alle diese Elemente mit einem ähnlichen systematischen Fehler behaftet Eingang in die Berechnungen gefunden haben, ist unwahrscheinlich.

Die nicht im selben Maße wie ^{26}Al überhöhte ^{53}Mn -Aktivität (vergleiche Abbildungen 4.36 und 4.37) ließe sich auch durch eine Überproduktion erklären: auf der einen Seite wird ^{53}Mn stark durch SCR gebildet, da es ein Niederenergie-Produkt ist. Es wäre also, verglichen mit ^{10}Be und ^{26}Al eine besonders hohe Überproduktion zu erwarten. Auf der anderen Seite würde aus der Berücksichtigung von SCR-Effekten bei den Edelgasen eine kürzere Bestrahlungszeit folgen. Eine kürzere Bestrahlungszeit hätte aber zur Folge, dass ^{53}Mn als Nuklid mit der längsten HWZ am stärksten „untersättigt“ wäre, d.h. es wäre in dieser kürzeren Zeit aufgrund seiner längsten Halbwertszeit am wenigsten gebildet worden.

Dies wären die ersten deutlich sichtbaren SCR-Effekte in Lafayette und würden zeigen, dass in diesem Falle das von Begemann et al. [BEG88] eingeführte und von Eugster et al. [EUG97] angewendete Verfahren zur Abschätzung von SCR-Effekten bei Lafayette versagt hat. Bei diesem Verfahren wird eine Auftragung des Verhältnisses $\text{Mg}/(\text{Si}+\text{Al})$ gegen das Verhältnis $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ verwendet. Überschreitet das $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ -Verhältnis bei gegebenen $\text{Mg}/(\text{Si}+\text{Al})$ -Wert einen bestimmten Wert (0,75 bei $\text{Mg}/(\text{Si}+\text{Al}) = 0$; 0,85 bei $\text{Mg}/(\text{Si}+\text{Al}) = 1,1$), so wird dieses SCR produziertem Ne zugeschrieben. Offensichtlich scheint bei [EUG97] eine Probe mit einem großen

$^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ -Verhältnis gemessen worden zu sein, so dass SCR-Effekte verborgen blieben. Deren Probe müsste sich demnach in größerer präatmosphärischer Tiefe befunden haben.

Die Variabilität der Ergebnisse des empirischen Verfahrens von Begeman et al. und Eugster et al. wird bei einem Vergleich von Abbildung 1 aus [EUG97] und Abbildung 6 aus [GAR95] deutlich. In [EUG97] liegt z.B. das $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ -Verhältnis von EETA 79001A deutlich auf der Seite reinen GCR-Neons, in [GAR95] klar auf der Seite SCR produzierten Neons. Lafayette liegt in [EUG97] nahe bei EETA79001.

Nakhla

Eingabeparameter für die Berechnungen ist die Bulkanalyse nach [LOD98], für Rb, Sr, Y und Zr die same-sample-Daten von [JOC02].

Tabelle 4.8: Konzentrationen kosmogener Nuklide, Edelgase nach [SCH03b].

Nakhla	
^{10}Be	$24,7 \pm 2,0$ dpm/kg
^{26}Al	$87,6 \pm 7,2$ dpm/kg
^{53}Mn	384 ± 42 dpm/kg Fe
^3He	$(19,93 \pm 1,38) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
^{21}Ne	$(2,551 \pm 0,144) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
^{22}Ne	$(2,48 \pm 0,057) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
^{38}Ar	$(2,411 \pm 0,047) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
$^{80}\text{Kr}^*$	$(25,7 \pm 4,3) \cdot 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
^{83}Kr	$(186,7 \pm 7,4) \cdot 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$

* Neutroneninduzierte Komponente.

Die gemessenen Aktivitäten von ^{10}Be und ^{26}Al befinden sich im Rahmen der Fehler im Bereich der bisher gemessenen Aktivitäten (^{10}Be : 19,7-22,2 dpm/kg, ^{26}Al : 81-89 dpm/kg [MET03 und Zitate darin], Tabelle. ^{53}Mn ist erstmalig bestimmt worden.

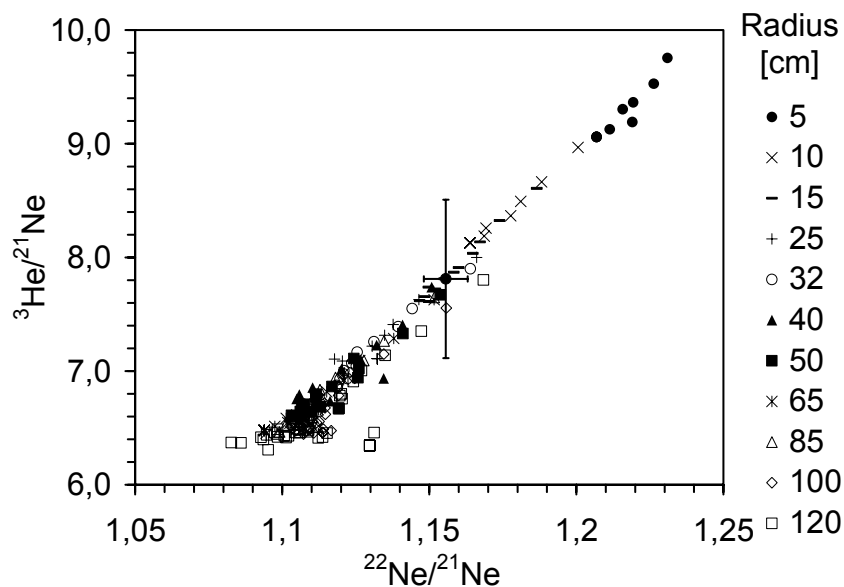


Abbildung 4.38: Bernplot für Nakhla. Die in diesem Meteorit gefundenen Edelgasverhältnisse liegen im theoretisch errechneten Bereich auf der Bern-Linie.

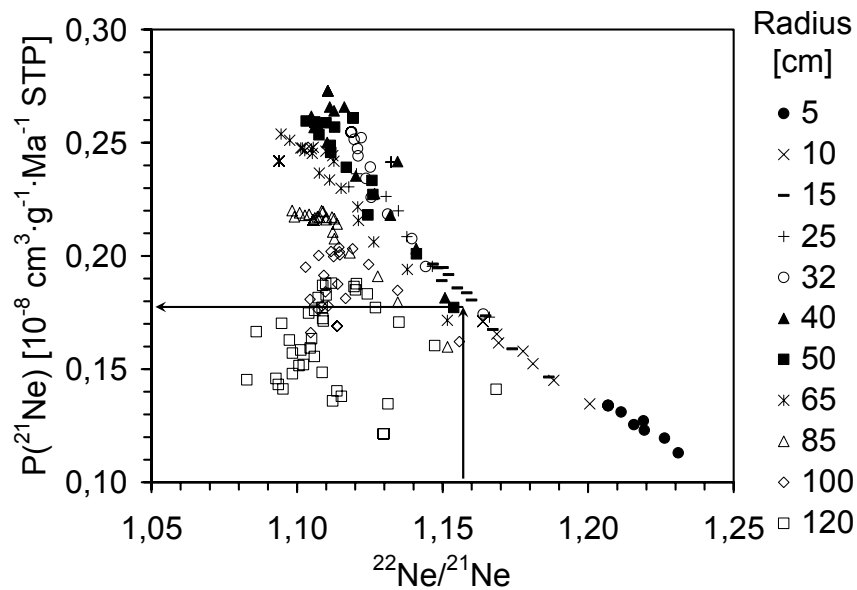


Abbildung 4.39: ^{21}Ne -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die berechneten Werte sind als Punkte eingetragen. Entlang der Pfeile wird die ^{21}Ne -Produktionsrate abgelesen.

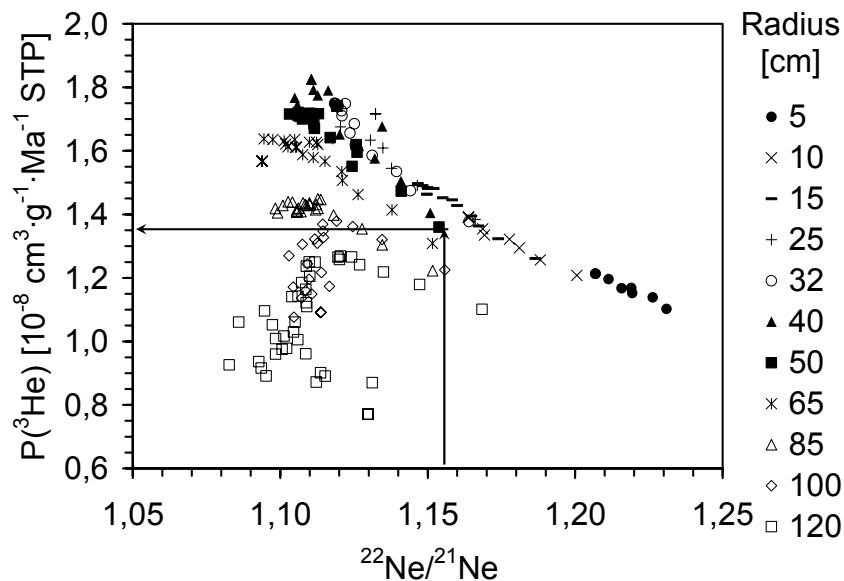


Abbildung 4.40: ^3He -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die berechneten Werte sind als Punkte eingezeichnet. Entlang der Pfeile wird die ^3He -Produktionsrate entnommen.

Aus den Abbildungen 4.39 und 4.40 ergeben sich die Produktionsraten für die Edelgase zu $P_{21} = (0,177 \pm 0,016) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$ und $P_3 = (1,35 \pm 0,12) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$. Damit errechnen sich die Edelgas-Bestrahlungsalter zu $T_{21} = (14,4 \pm 1,5) \text{ Ma}$ und $T_3 = (14,8 \pm 1,7) \text{ Ma}$, die somit konkordant sind. ^{10}Be und ^{26}Al befinden sich damit in Sättigung, ^{53}Mn hat 93 % seiner Sättigungsaktivität erreicht. Mit diesen Informationen lässt sich eine Radius-Abschätzung und Einschränkung der präatmosphärischen Tiefe der Probe vornehmen (Abbildungen 4.41, 4.42 und 4.43).

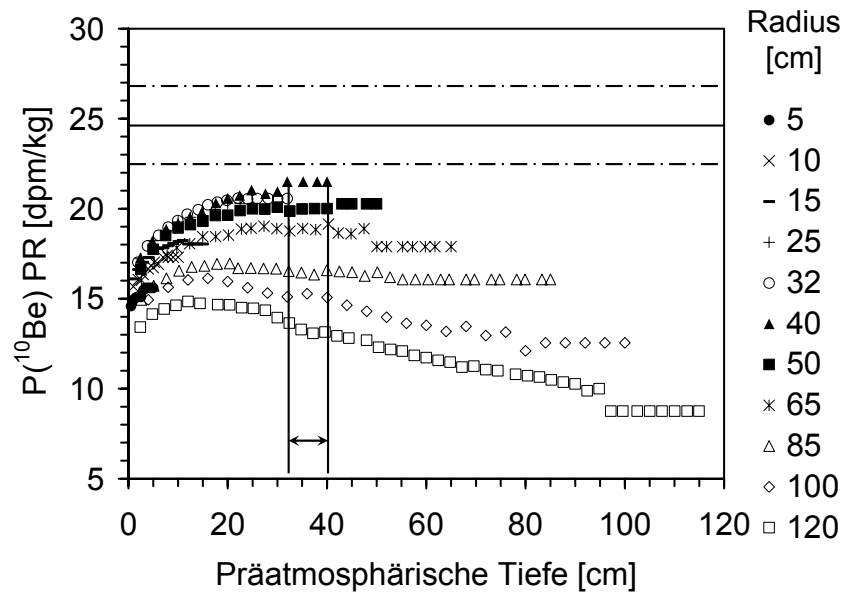


Abbildung 4.41: Produktionsrate von ^{10}Be gegen die Präatmosphärische Tiefe, berechnet für verschiedene Meteoroiden-Radien (Punkteschar). Im Rahmen einer 9 % igen Ungenauigkeit wird die gefundene Aktivität durch einen 40 cm großen Meteoroiden in einer Tiefe von mehr als 30 cm aufgebaut.

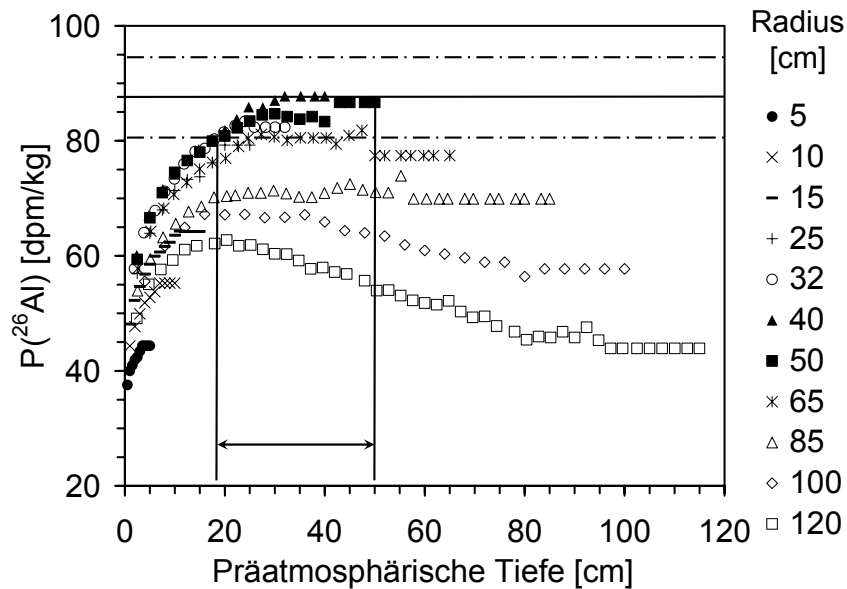


Abbildung 4.42: Das gleiche Diagramm wie in Abbildung 4.41, aber für ^{26}Al : die gefundene ^{26}Al -Aktivität spricht für einen 25-65 cm großen Körper bei einer Abschirmtiefe der untersuchten Probe von mehr als 18 cm.

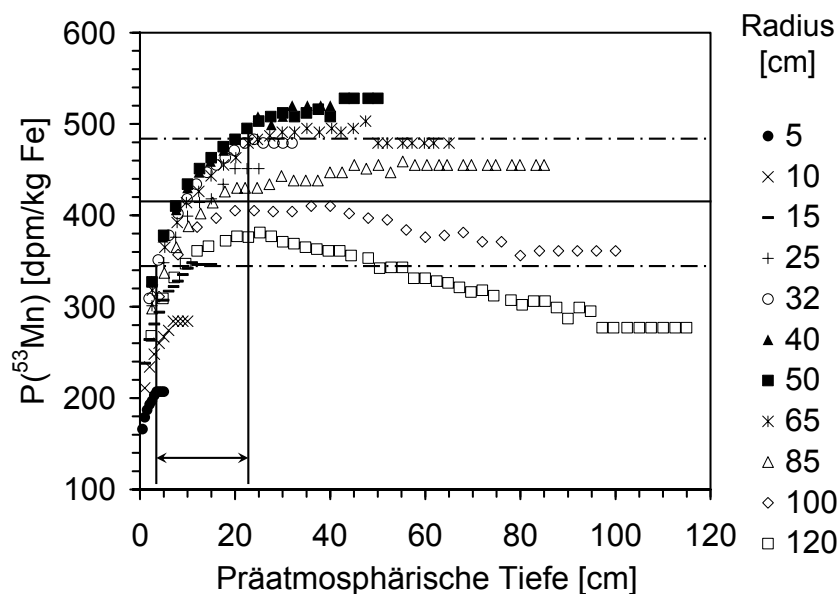


Abbildung 4.43: Das gleiche Diagramm wie in Abbildung 4.41 und 4.42, hier für ^{53}Mn . Im Rahmen der Ungenauigkeiten des Modells wäre ein Körper mit mehr als 15 cm Radius in der Lage die gefundene Aktivität zu produzieren. Die Probe sollte sich in einer maximalen Tiefe von 23 cm befunden haben.

Zusammenfassend kann man damit feststellen, dass Nakhla ein Bestrahlungsalter von $T_{\text{exp}} = (14,6 \pm 1,5)$ Ma und einen präatmosphärischen Radius von ≈ 40 cm hatte. Für eine konsistente Diskussion der Abschirmtiefe hat die ^{10}Be -Aktivität einen etwas zu hohen Wert. Im Rahmen der Fehler des Modells ist dennoch möglich, dass in einer Tiefe von ≈ 30 cm die gemessenen Aktivitäten erzeugt werden können. Während ^{10}Be und ^{26}Al auf eine zentrale Lage (Abschirmtiefe ≥ 30 cm) hindeuten, zeigt der ^{53}Mn -Wert eine maximale Tiefe von 25 cm. Der hier bestimmte präatmosphärische Radius deckt sich mit der von Eugster et al. angegebenen [EUG02] Minimalabschätzung.

Das in [EUG02] und [TER00] mit $(10,8 \pm 0,8)$ Ma angegebene Bestrahlungsalter liegt hingegen niedriger als das in dieser Arbeit bestimmte.

Sayh al Uhaymir 005

Für diesen Meteorit liegen keine Edelgasdaten vor (Tabelle 4.8). Daher wird versucht, lediglich anhand der gefundenen Radionuklidkonzentrationen ein Bestrahlungsalter und eine Größenabschätzung vorzunehmen. Für die Rechnungen wurde die Bulkanalyse aus [LOD98] sowie die same-sample-Analysen für Sr, Rb, Y und Zr aus [JOC02] verwendet.

Tabelle 4.9: Gemessene Radionuklidkonzentrationen.

Sayh al Uhaymir 005	
^{10}Be	$(13,5 \pm 1,1)$ dpm/kg
^{26}Al	$(47,2 \pm 4,0)$ dpm/kg
^{53}Mn	(75 ± 9) dpm/kg

Die hier gemessenen ^{26}Al -Daten liegen über dem bisher veröffentlichten Wert von 37,4 dpm/kg [PÄT00], was durch unterschiedliche Abschirmtiefen der Proben erklärbar ist. ^{10}Be und ^{53}Mn sind hier erstmalig bestimmt worden.

Zur Bestimmung des Bestrahlungsalters werden die gemessenen ^{26}Al - und ^{53}Mn -Konzentrationen mit berechneten Werten verglichen. Dabei stellt sich eine deutliche Unterproduktion der beiden Radionuklide heraus (Abbildung 4.44), die durch eine kurze Bestrahlungszeit zustande kommen kann. Daher wird der Aktivitätsaufbau von ^{26}Al und ^{53}Mn im Laufe der Bestrahlung rekonstruiert. Bei einer Bestrahlungszeit von $T_{\text{exp}} = 0$ Ma liegen keine Radionuklide vor. Anhand der Aktivitätsgleichung (1.11) wird der Aufbau beider Aktivitäten bis zu den vom Modell berechneten Sättigungsaktivitäten nachvollzogen (Pfade in Abbildung 4.44). Dabei wird ersichtlich, dass die gemessenen Aktivitäten nur dann durchlaufen werden, wenn der bestrahlte Körper einen Radius von mehr als 5 cm hatte.

Um den Zeitpunkt zu bestimmen, zu dem der Aufbau der Aktivitäten die gemessenen Aktivitäten produziert hat, wird das Verhältnis $^{26}\text{Al}/^{53}\text{Mn}$ gegen die Zeit aufgetragen (Abbildung 4.45). In dieses Diagramm werden die Pfade, die die gefundenen Aktivitäten aufbauen können (Abbildung 4.44), eingezeichnet und mit dem gemessenen Verhältnis verglichen.

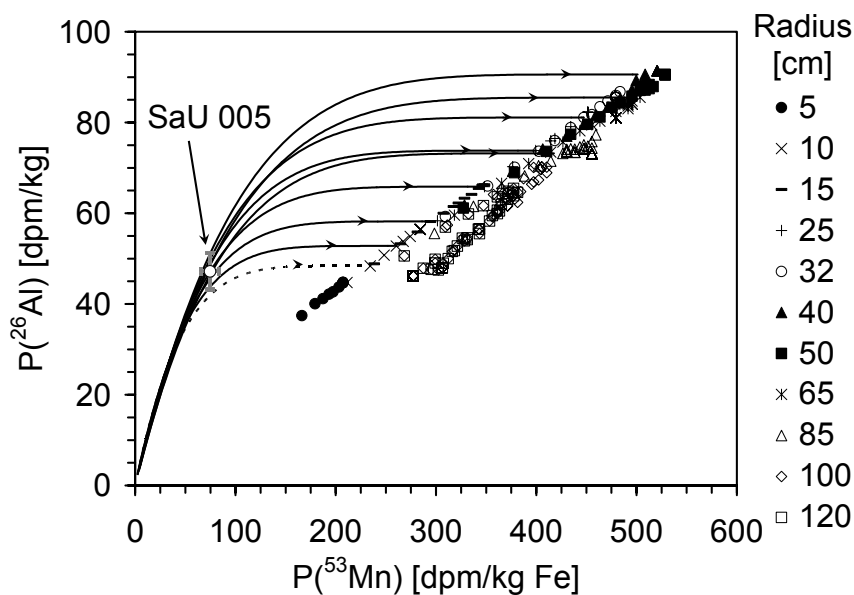


Abbildung 4.44: Produktionsrate von ^{26}Al gegen die Produktionsrate von ^{53}Mn . Die berechneten Sättigungsaktivitäten (=Produktionsraten) sind als Punkteschar eingetragen. Der Messwert mit seinen Fehlern ist gekennzeichnet. Die gemessenen Daten liegen sehr weit von den theoretisch zu erwartenden Sättigungsaktivitäten entfernt. Die eingezeichneten Linien verdeutlichen, wie sich das $^{26}\text{Al}/^{53}\text{Mn}$ -Verhältnis im Laufe der Bestrahlung des Körpers entwickelt: zu Beginn der Bestrahlung liegt keine Aktivität vor. Diese wird nach und nach aufgebaut, bis die theoretisch berechneten Sättigungsaktivitäten erreicht sind. Einige dieser „Pfade“ des Aktivitätsaufbaus können nicht durch den gemessenen Wert führen: der Meteoroid muss größer als 5 cm gewesen sein. Alle durchgezogenen Linien verlaufen durch den gemessenen Wert, die punktierte Linie bildet die untere Grenze.

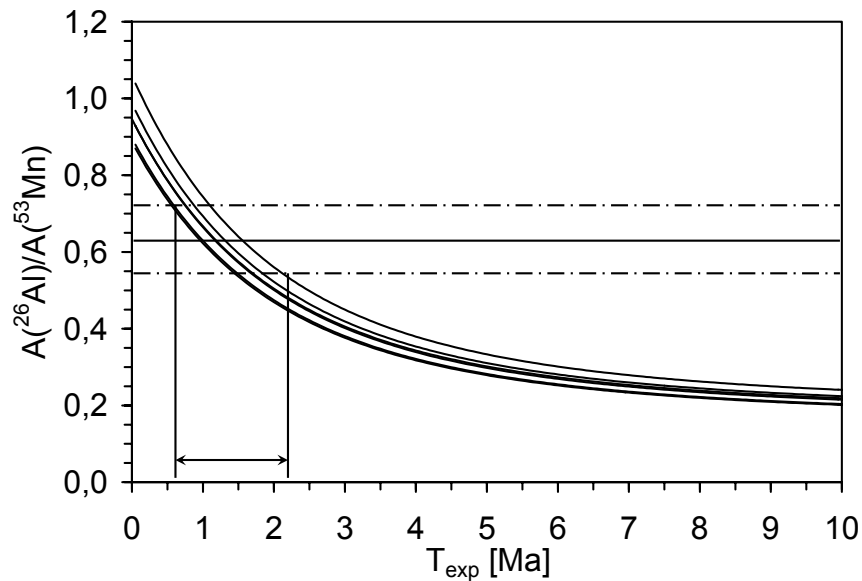


Abbildung 4.45: Aktivitätsverhältnis $A(^{26}\text{Al})/A(^{53}\text{Mn})$ gegen die Bestrahlungszeit. Eingezeichnet sind die Entwicklungen der Verhältnisse aus Abbildung 4.44, die den Messpunkt dort schneiden. Das gemessene Verhältnis ist als horizontale Linie eingezeichnet, der Fehler ist strichliert. Das gemessene Verhältnis wird bei einer Bestrahlungszeit von $(1,4 \pm 0,8)$ Ma durchlaufen.

Das Bestrahlungsalter von Sayh al Uhaymir ist nach Abbildung 4.44 und 4.45 $T_{\text{exp}} = (1,4 \pm 0,8)$ Ma. Mit dieser Information ist es möglich die gemessene ^{10}Be -Aktivität auf eine Sättigungsaktivität von (28 ± 8) dpm/kg zu korrigieren. Dieser Wert kann mit berechneten Produktionsraten verglichen werden.

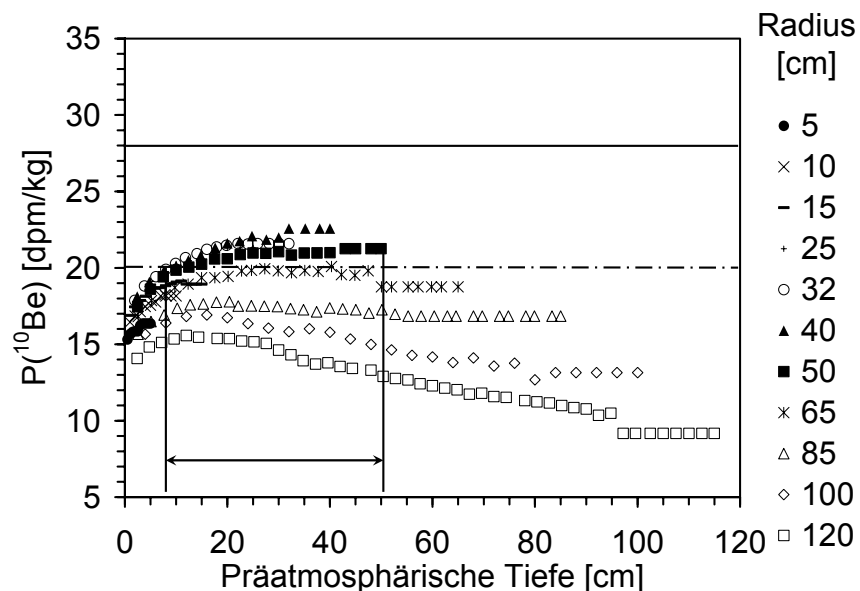


Abbildung 4.46: ^{10}Be -Produktionsrate gegen die präatmosphärische Tiefe. Als Punkte sind die berechneten Werte eingezeichnet. Die horizontale Linie ist die auf Sättigungsaktivität korrigierte ^{10}Be -Aktivität. Die strichlierte Linie gibt den unteren Fehler an. Man erkennt, dass innerhalb der Fehlergrenzen diese Aktivität weder sehr kleine ($r \leq 15$ cm) noch sehr große Meteorite ($r \geq 50$ cm) zulässt.

Durch die Messung der Radionuklide ^{10}Be , ^{26}Al und ^{53}Mn kann ein Bestrahlungsalter von $(1,4 \pm 0,8)$ Ma angegeben werden. Dieses befindet sich in Übereinstimmung mit Literaturdaten [EUG02], [PÄT00]. Park et al. [PAR01] ermittelten ein Bestrahlungsalter zwischen 0,7 Ma und 1,3 Ma. Eine Radiusabschätzung des Meteoroiden fällt mit 25 cm bis 50 cm ungenauer aus. Die Probe hat vermutlich tiefer als 8 cm unter der präatmosphärischen Oberfläche gelegen (Abbildung 4.16). Auf die Diskussion von Literaturdaten aus anderen Proben wurde bewusst verzichtet, um eine einheitliche Diskussion aller Marsmeteorite mit same-sample-Daten zu gewährleisten.

Shergotty

Tabelle 4.10 zeigt eine Übersicht der gemessenen Konzentrationen kosmogener Nuklide, die Modellrechnungen werden mit Hilfe der Bulkanalyse von [LOD98] durchgeführt, für die Elemente Rb, Sr, Y und Zr werden same-sample-Daten aus [JOC02] eingesetzt.

Tabelle 4.10: Zusammenstellung der gemessenen Konzentrationen kosmogener Nuklide, Edelgase nach [SCH03b]

Shergotty	
^{10}Be	$(16,6 \pm 1,4)$ dpm/kg
^{26}Al	$(80,0 \pm 6,6)$ dpm/kg
^{53}Mn	(160 ± 17) dpm/kg
^3He	$(3,81 \pm 0,33) \cdot 10^{-8}$ cm ³ ·g ⁻¹ STP
^{21}Ne	$(0,544 \pm 0,30) \cdot 10^{-8}$ cm ³ ·g ⁻¹ STP
^{22}Ne	$(0,693 \pm 0,056) \cdot 10^{-8}$ cm ³ ·g ⁻¹ STP
^{36}Ar	$(0,179 \pm 0,018) \cdot 10^{-8}$ cm ³ ·g ⁻¹ STP
^{38}Ar	$(0,268 \pm 0,018) \cdot 10^{-8}$ cm ³ ·g ⁻¹ STP
^{83}Kr	$(1,444 \pm 0,23) \cdot 10^{-12}$ cm ³ ·g ⁻¹ STP

Hier werden die ersten ^{53}Mn -Daten angegeben, die ^{10}Be -Daten und die ^{26}Al -Daten befinden sich im bisher von verschiedenen Autoren gemessenen Bereich (^{10}Be : 13,4 - 17,3 dpm/kg, ^{26}Al : 66-101 dpm/kg [MET03 und Zitate darin], [NIS87]).

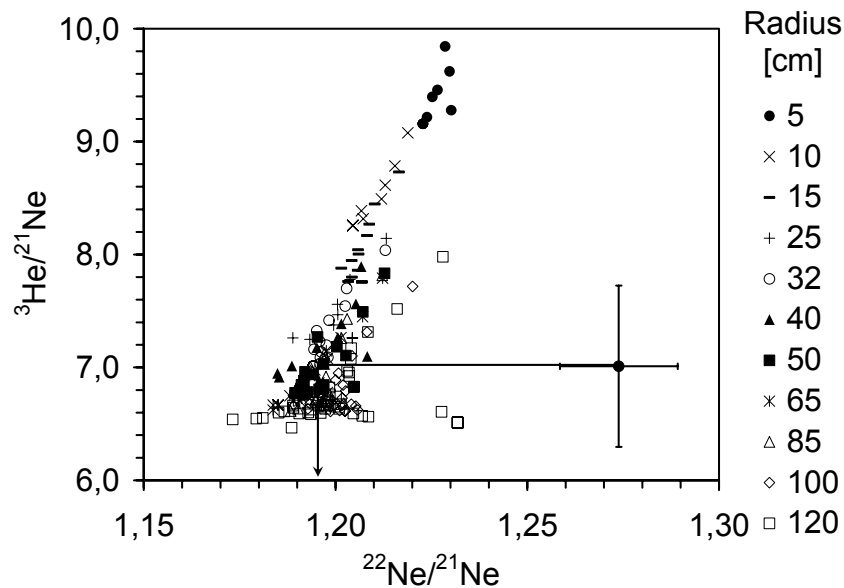


Abbildung 4.47: Bernplot für Shergotty: der gemessene Wert (Punkt mit Fehlern) weicht deutlich von den berechneten Verhältnissen ab (Punkteschar).

Das Abweichen des gemessenen $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältniss wird als Überproduktion von ^{22}Ne interpretiert, weswegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis korrigiert wird. Dieses korrigierte Verhältnis ergibt sich zu $1,195 \pm 0,107$. Mit diesem korrigierten Verhältnis werden die Produktionsraten für ^3He und ^{21}Ne berechnet (Abbildung 4.48 und 4.49). Vermutliche Ursache für diese Abweichung ist wahrscheinlich die elementare Zusammensetzung von Shergotty (siehe unten), da für SCR-Effekte keine weiteren Hinweise bei den Radionukliden gefunden werden können. Es könnte auch eine Vorbestrahlung auf dem Mars in großer Tiefe ($\approx 3\text{m}$ Tiefe) stattgefunden haben (siehe bei EETA 79001A).

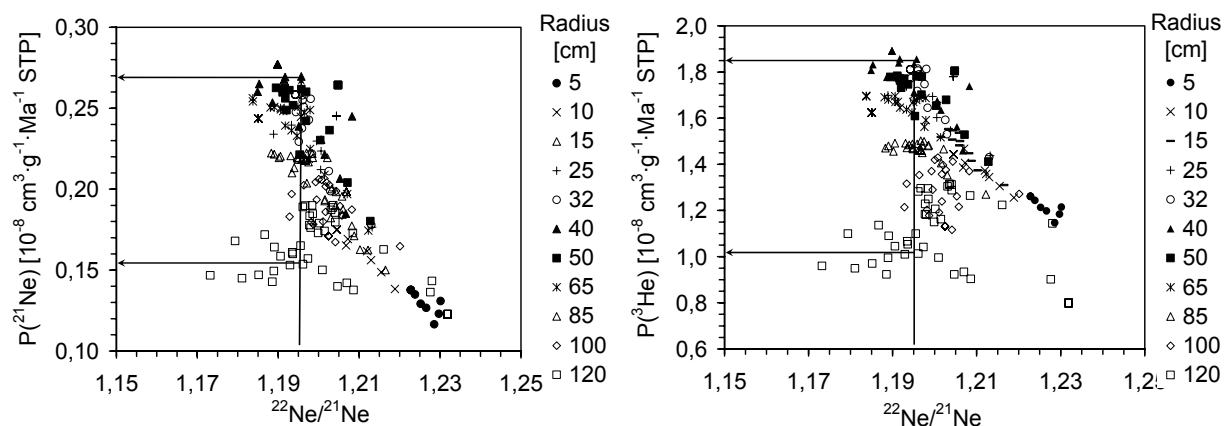


Abbildung 4.48: ^{21}Ne -Produktionsrate (links) bzw. der ^3He -Produktionsrate (rechts) gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die berechneten Werte sind als Punkteschar eingetragen. Diese bilden keinen Eindeutigen Zusammenhang zwischen Produktionsrate und $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Mit dem gemessenen $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis lässt sich deshalb zunächst nur ein großer Bereich für die Produktionsraten angeben, der zu hohen Fehlern bei der Altersbestimmung führen würde.

In Abbildung 4.48 fällt auf, dass kein eindeutiger Zusammenhang zwischen $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis und der ^{21}Ne - bzw. ^3He -Produktionsrate herstellbar ist. Ursache dafür ist der

Beitrag einzelner Targetelemente zur Produktion der Neon-Isotope. Durch die chemische Zusammensetzung von Shergotty (und auch Zagami, dort jedoch nicht so ausgeprägt) findet die Erzeugung von Neon-Isotopen relativ zu anderen in dieser Arbeit untersuchten Meteoriten vermehrt durch Kernreaktionen am Al, Na und Si und weniger am Mg statt (Tabelle 4.11). Die prozentualen Werte für die Anteile der Elemente an der Produktion der Ne-Isotope in Tabelle 4.11 sind durch eine Aufsummierung der Produktionsraten für alle berechneten Radien und alle berechneten Tiefen und Verhältnisbildung aus den Modellrechnungen erhalten worden.

Tabelle 4.11: Prozentuale Beiträge der im Modell berücksichtigten Targetelemente zur Produktion von ^{21}Ne und ^{22}Ne in den untersuchten Shergottiten. Die angegebenen Prozentwerte sind die Mittelwerte aller berechneten Produktionsraten für alle betrachteten Radien (5-120 cm) und Tiefen (Oberfläche bis Zentrum). Der Beitrag von Mg zur ^{21}Ne - und ^{22}Ne -Produktion in Shergotty und Zagami ist besonders gering. Die Anteile von Na, Al und Si sind hingegen höher als bei den übrigen Shergottiten. Der Unterschied ist bei Shergotty besonders ausgeprägt.

	^{21}Ne						^{22}Ne					
	Na	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Na	Mg	Al	Si	Ca	Fe
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
ALHA 77005	1	68	2	27	1	1	2	65	3	28	1	1
EETA 79001A	2	58	5	33	1	1	6	45	8	39	2	1
SaU 005	2	58	5	33	1	1	4	54	5	34	1	1
Shergotty	6	34	9	46	3	1	10	30	10	45	3	1
Zagami	5	39	8	44	3	1	9	35	9	43	3	1

Die Produktion von Ne-Isotopen in Meteoroiden ist tiefenabhängig (Abbildung 4.2). Diese Tiefenabhängigkeit ist je nach Targetelement verschieden (Abbildung 4.49). Die Produktion von Ne aus Si zeigt keine nennenswerte Tiefenabhängigkeit, die von Al und Na ist genau entgegengesetzt zu der des Mg (Abbildung 4.49).

Daher kann je nach Zusammensetzung eines Meteoriten die sonst übliche Eindeutigkeit der Tiefenabhängigkeit der Ne-Produktion (vergleiche Abbildung 4.2) stark gestört werden. Der bestimmende Faktor für diese Eindeutigkeit (zumindest für nicht sehr große Radien) ist Mg. Man vergleiche Abbildung 4.2, welche eine typische, häufig beobachtete Tiefenabhängigkeit des $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnisses zeigt, mit Abbildung 4.49 für Mg, die Tiefenabhängigkeit in beiden Abbildungen ist ähnlich.

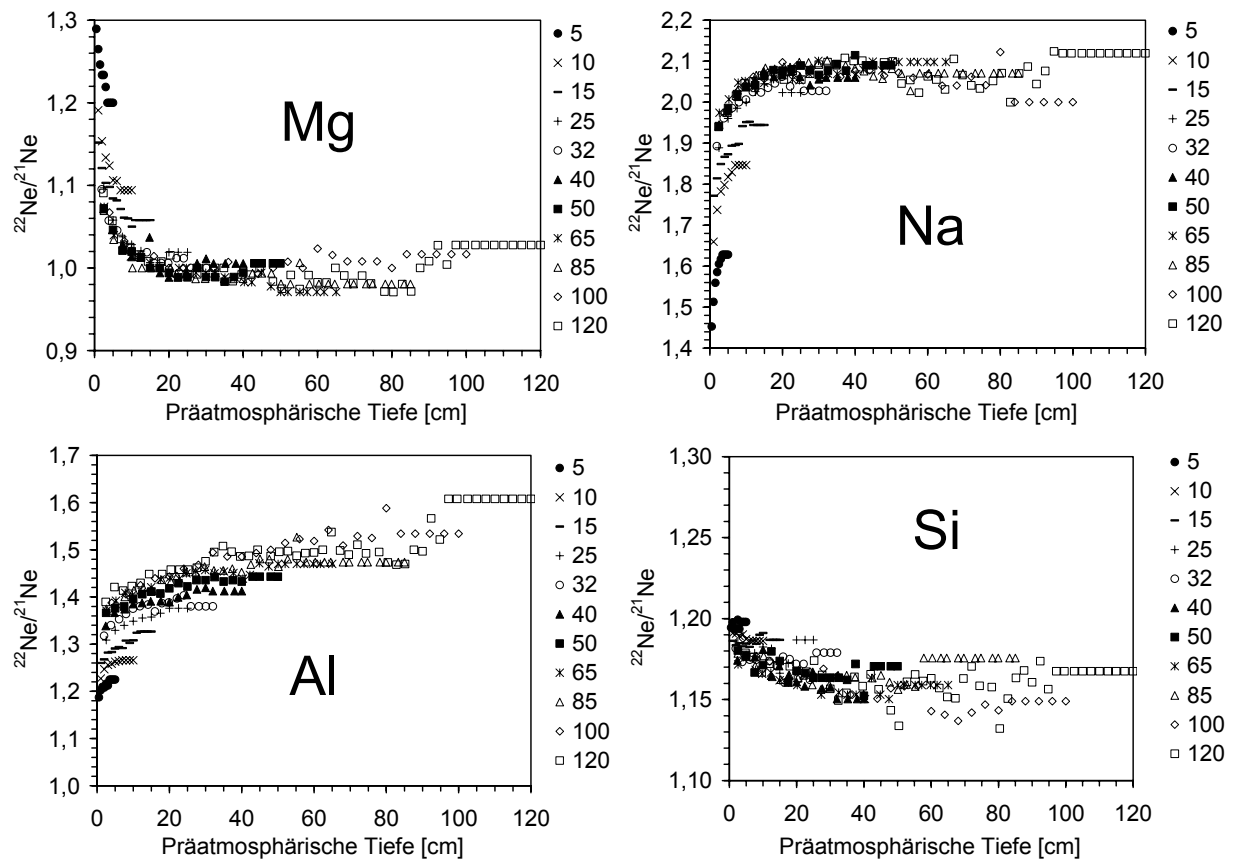


Abbildung 4.49: Beiträge der wichtigsten Targetelemente zur ^{21}Ne - und ^{22}Ne -Produktion. Aufgetragen ist das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis gegen die Präatmosphärische Tiefe. Berechnet wurden die tiefenabhängigen Beiträge der einzelnen Elemente in Shergotty. Man erkennt die verschiedenartige Tiefenabhängigkeit der Produktion aus verschiedenen Elementen. Ursache dafür sind unterschiedliche Energieabhängigkeiten der beteiligten Kernreaktionen.

Somit kann im Rahmen der Möglichkeiten des physikalischen Modells ohne eine Größeninformation keine genaue Produktionsrate für ^{21}Ne und ^3He anhand des $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnisses gewonnen werden (auch für Produktionsraten anderer Nuklide hat sich dies als unmöglich erwiesen). Daher wird zunächst mit Hilfe der Radionuklide ^{26}Al und ^{53}Mn ein Bestrahlungsalter berechnet. Dies geschieht wie beim Meteoriten Sayh al Uhaymir 005 durch das $^{26}\text{Al}/^{53}\text{Mn}$ -Verhältnis (Abbildungen 4.50 und 4.51). Zunächst werden die Produktionsraten ausgeschlossen, zu deren Aufbau die ^{26}Al und ^{53}Mn -Aktivitäten im Laufe der Bestrahlung nicht durch den gemessenen Wert laufen (Abbildung 4.48). Der zeitliche Verlauf der Aktivitätsverhältnisse $^{26}\text{Al}/^{53}\text{Mn}$, die den Messwert zu irgendeiner Zeit erreichen können, wird in einem Diagramm das Verhältnis $A(^{26}\text{Al})/A(^{53}\text{Mn})$ gegen die Bestrahlungzeit aufgetragen, um den Zeitpunkt zu bestimmen, zu dem das gemessene Verhältnis erreicht war (Abbildung 4.49).

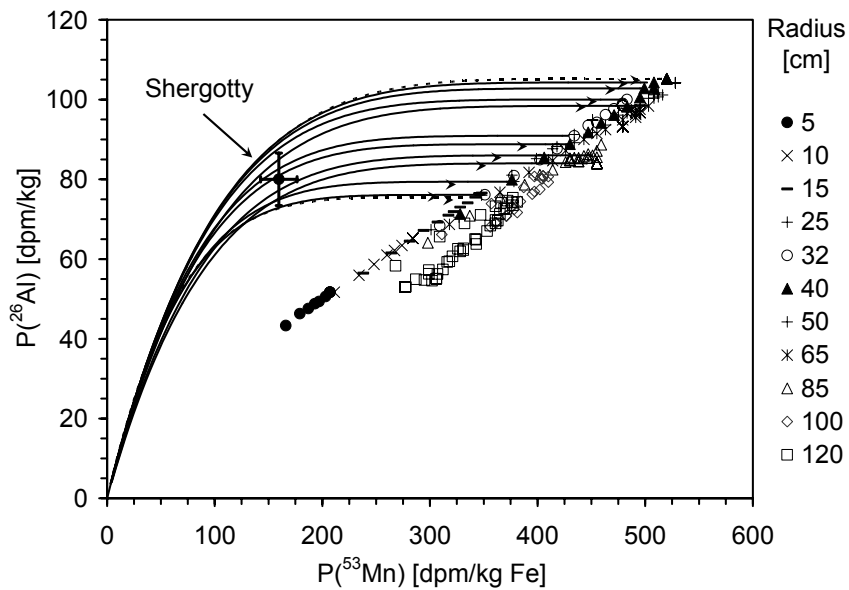


Abbildung 4.50: Produktionsrate von ^{26}Al gegen die ^{53}Mn -Produktionsrate. Eingetragen sind die berechneten Werte (Punkteschar), der gemessene Wert (Punkt mit Fehlern) und die Pfade entlang derer sich die Aktivitäten im Laufe der Zeit durch Bestrahlung des Meteoroiden aufbauen. Der Messpunkt liegt weit entfernt von den berechneten Werten. Sättigungsaktivitäten, die außerhalb des durch die strichlierten Linien eingegrenzten Bereichs liegen, erreichen den Messpunkt nicht.

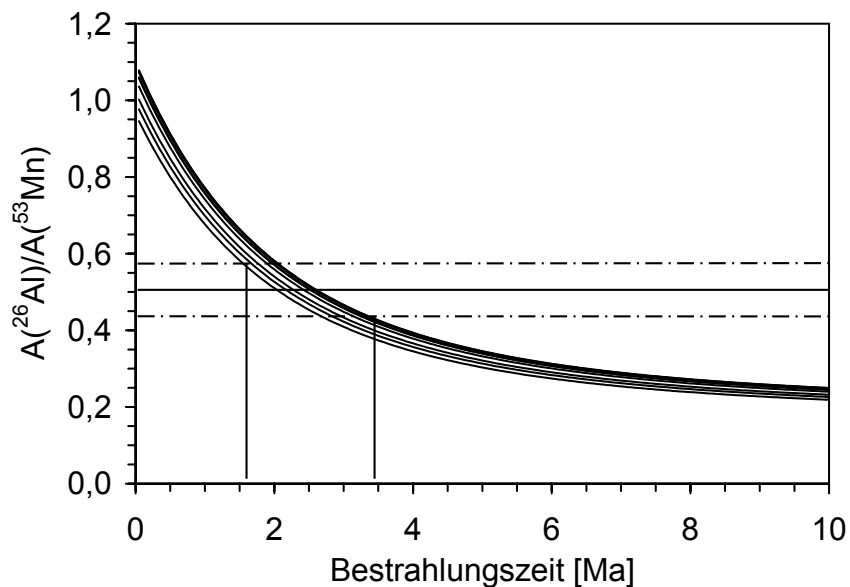


Abbildung 4.51 Auftragung des $^{26}\text{Al}/^{53}\text{Mn}$ -Verhältnis gegen die Bestrahlungszeit. Der gemessene Wert ist als horizontale Linie mit strichlierten Fehlergrenzen eingezeichnet. Die Verhältnisse, die durch den Messwert in der Abbildung 4.50 laufen (nur diese sind eingezeichnet), durchlaufen das gemessene Verhältnis nach $2,5 \pm 0,9$ Ma

Mit dem ^{26}Al - ^{53}Mn -Bestrahlungsalter von $(2,5 \pm 0,9)$ Ma wird unter Zuhilfenahme der gemessenen ^{10}Be -Aktivität der Radius des Meteoroiden eingeschränkt (Abbildung 4.52).

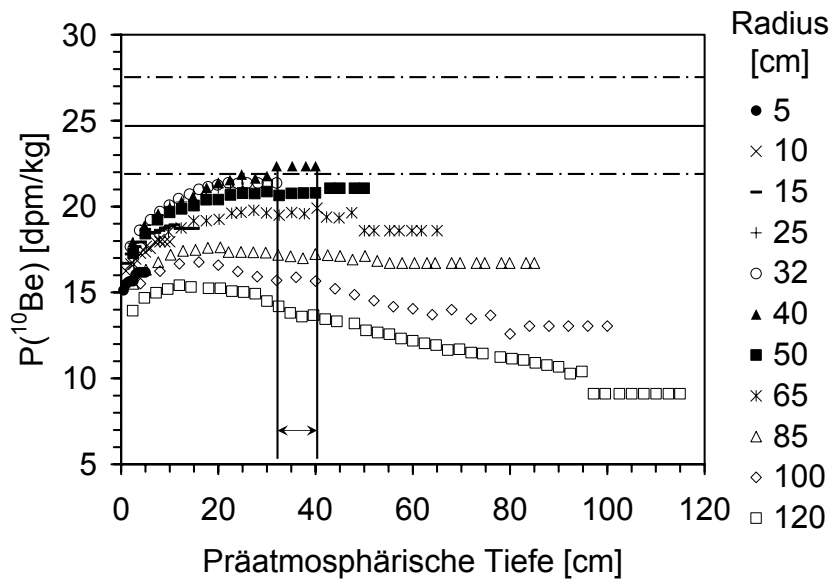


Abbildung 4.52: ^{10}Be -Produktionsrate gegen die Präatmosphärische Tiefe, berechnet für Meteoroiden-Radien zwischen 5 und 120 cm (Punkteschar). Eingezeichnet ist der mit Hilfe des $^{26}\text{Al}/^{53}\text{Mn}$ -Verhältnis gewonnenen Bestrahlungsalters auf Sättigung korrigierte Wert der gemessenen ^{10}Be -Konzentration (horizontale Linie, Fehler strichliert).

Es ergibt sich im Rahmen der Fehler ein präatmosphärischer Radius von 40 cm, bei einer Abschirmtiefe der Probe von 32 bis 40 cm. Mit dieser Information über den Radius des Meteoroiden lässt sich eine genauere Produktionsrate für die Edelgase angeben (Abbildung 4.53 und 4.54).

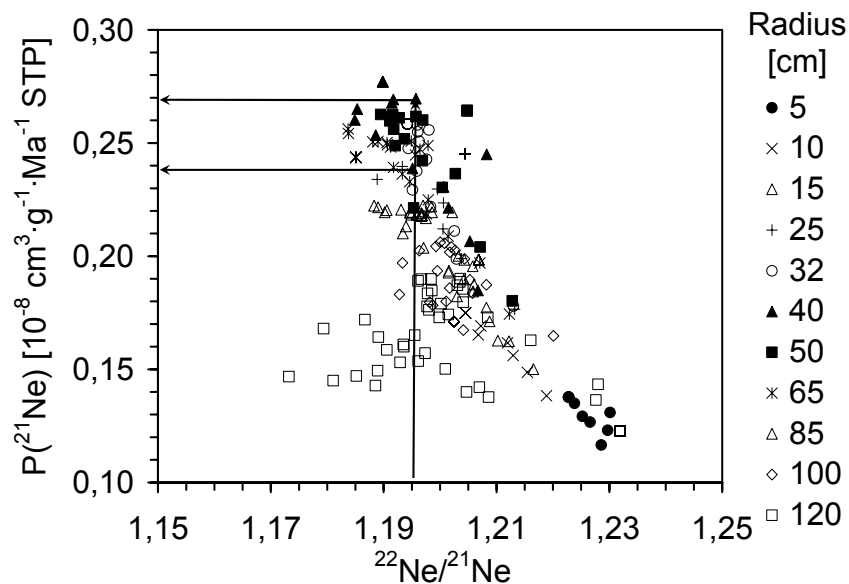


Abbildung 4.53: ^{21}Ne -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die berechneten Werte sind als Punkte eingezeichnet. Entlang der Pfeile lässt sich die untere und obere Grenze für die ^{21}Ne -Produktionsrate bestimmen.

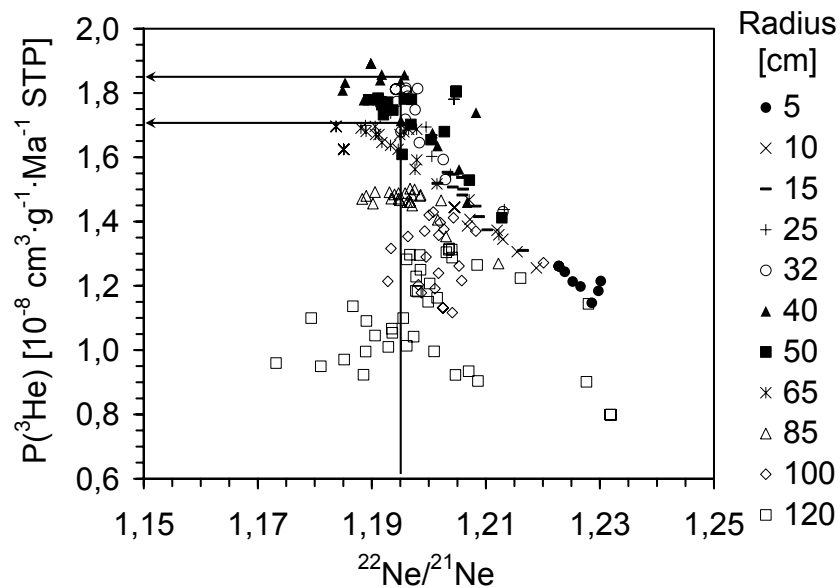


Abbildung 4.54: ^3He -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die berechneten Werte sind als Punkte eingezeichnet. Entlang der Pfeile lässt sich die untere und obere Grenze für die Produktionsrate bestimmen.

Anhand von Abbildung 4.52 und 4.53 ergeben sich die Produktionsraten zu $P_{21} = (0,25 \pm 0,04) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$ und $P_3 = (1,78 \pm 0,23) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$. Daraus errechnen sich mit den gemessenen Edelgaskonzentrationen (Tabelle 4.9) Bestrahlungsalter von $T_{21} = (2,2 \pm 0,4) \text{ Ma}$ und $T_3 = (2,1 \pm 0,3) \text{ Ma}$. Diese Alter sind untereinander und mit dem ^{26}Al - ^{53}Mn -Bestrahlungsalter von $(2,5 \pm 0,9) \text{ Ma}$ konkordant. Zusammenfassend kann man damit ein Bestrahlungsalter von $T_{\text{exp}} = (2,3 \pm 0,5) \text{ Ma}$ angeben, was im Rahmen der Fehler sowohl mit den Daten aus [EUG02] als auch mit dem ^{81}Kr - Kr -Alter aus [TER00] übereinstimmt.

Der Meteoroiden-Radius kann mit etwa 40 cm angegeben werden, wobei sich die untersuchte Probe in einer Tiefe von mehr als 32 cm befunden haben sollte. Der gemessene Meteoroiden-Radius stimmt mit der Minimal-Abschätzung aus [EUG02] überein, nicht jedoch mit den Abschätzungen von Nishiizumi et al. [NIS86b], der einen präatmosphärischen Radius von 10-15 cm angibt. Die auch in dieser Arbeit gefundene Ne-Überproduktion lässt sich anhand der hier analysierten Probe nicht auf SCR-Effekte zurückführen, da dies zumindest auch die ^{26}Al - und ^{53}Mn -Konzentration beeinflusst hätte. Damit wäre für den Meteoriten Shergotty, wie auch für den Meteoriten EETA 79001A eine Vorbestrahlung tief unter der Mars-Oberfläche ($\approx 3 \text{ m}$) denkbar, womit sich der gefundene ^{22}Ne -Überschuss und die fehlenden Effekte bei den ^{26}Al - und ^{53}Mn -Konzentrationen erklären ließen.

Zagami

Die Modellrechnungen werden mit Hilfe der Bulkanalyse von [LOD98] durchgeführt, für die Elemente Sr, Rb, Y und Zr werden same-sample-Daten aus [JOC02] eingesetzt. Zuerst wird wiederum der Bernplot benutzt, um die Verhältnisse der Edelgase zu korrigieren. Daraufhin werden die Edelgasalter bestimmt. Zuletzt wird der Radius mit Hilfe der Radionuklide eingeschränkt.

Tabelle 4.12: Konzentrationen kosmogener Nuklide, Edelgase nach [SCH03b]

Zagami	
^{53}Mn	$(317 \pm 34) \text{ dpm/kg Fe}$
^3He	$(4,74 \pm 0,34) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
^{21}Ne	$(0,568 \pm 0,030) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
^{22}Ne	$(0,692 \pm 0,053) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
^{36}Ar	$(0,251 \pm 0,009) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
^{38}Ar	$(0,377 \pm 0,011) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
$^{80}\text{Kr}^*$	$(2,0 \pm 1,2) \cdot 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
^{83}Kr	$(1,70 \pm 0,22) \cdot 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$

* Neutroneninduzierte Komponente

Der im Rahmen dieser Arbeit gefundene ^{53}Mn -Wert liegt höher als die von Schnabel et al. zu $(221 \pm 16) \text{ dpm/kg Fe}$ [SCH01] bestimmte Konzentration. Der Unterschied ist unter der Annahme verschiedener Abschirmtiefen beider Proben erklärbar.

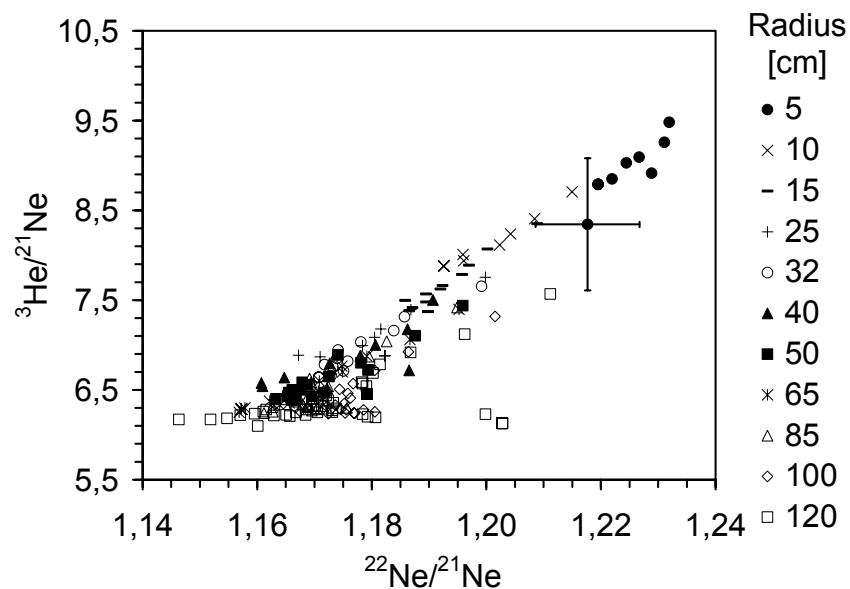


Abbildung 4.55: Bernplot für Zagami. Die berechneten Werte sind als Punkte eingetragen, der Messwert mit Fehlern liegt auf der Bernlinie.

Da die Edelgasverhältnisse auf der berechneten Bernlinie liegen, sollten die gemessenen ^3He - und ^{21}Ne -Konzentrationen konkordante Alter liefern.

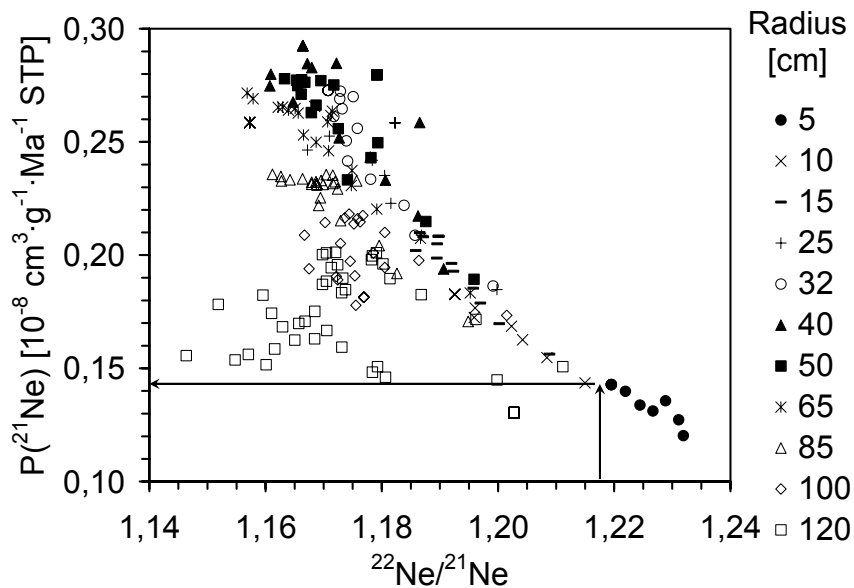


Abbildung 4.56: Produktionsrate von ^{21}Ne gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die Punkte sind berechnete Werte, entlang der Pfeile wurde die ^{21}Ne -Produktionsrate bestimmt.

Mit der ^{21}Ne -Produktionsrate aus Abbildung 4.56 von $P_{21} = (0,142 \pm 0,013) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$ berechnet sich das ^{21}Ne -Bestrahlungsalter von Zagami mit der gemessenen ^{21}Ne -Konzentration (Tabelle 4.12) zu $T_{21} = (4,0 \pm 0,4) \text{ Ma}$.

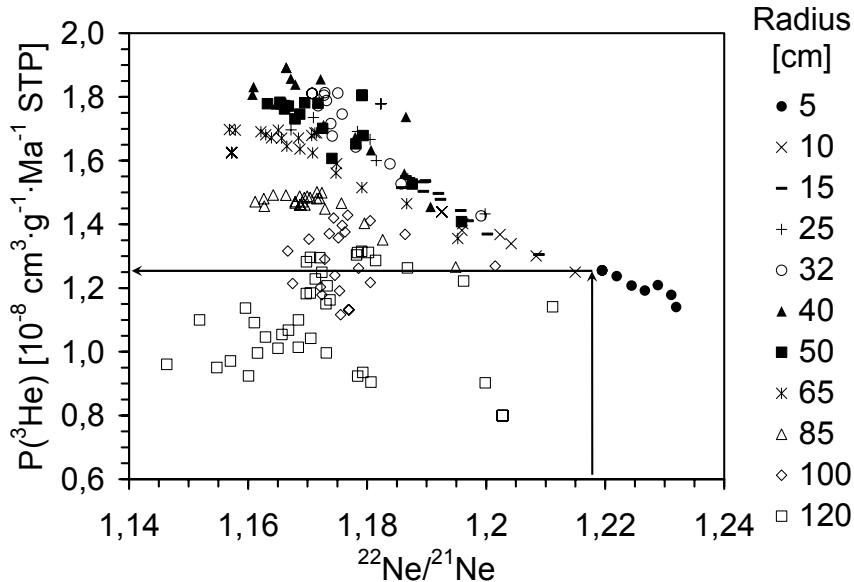


Abbildung 4.57 Dieselbe Auftragung wie 4.56 für ^3He . Entlang der Pfeile wurde die ^3He -Produktionsrate abgelesen.

Mit der ^3He -Produktionsrate aus Abbildung 4.57 von $P_3 = (1,25 \pm 0,11) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$ ergibt sich das ^3He -Bestrahlungsalter zu $T_3 = (3,8 \pm 0,4) \text{ Ma}$. Damit sind das ^{21}Ne - und das ^3He -Bestrahlungsalter zwar konkordant, aber höher als das in [EUG97] angegebene Bestrahlungsalter von $(2,81 \pm 0,18) \text{ Ma}$. Diese Diskrepanz ließe sich durch eine Überproduktion von

Edelgasen erklären. Die gemessene ^{53}Mn -Aktivität deutet auf eine ^{53}Mn -Überproduktion hin (Abbildung 4.58).

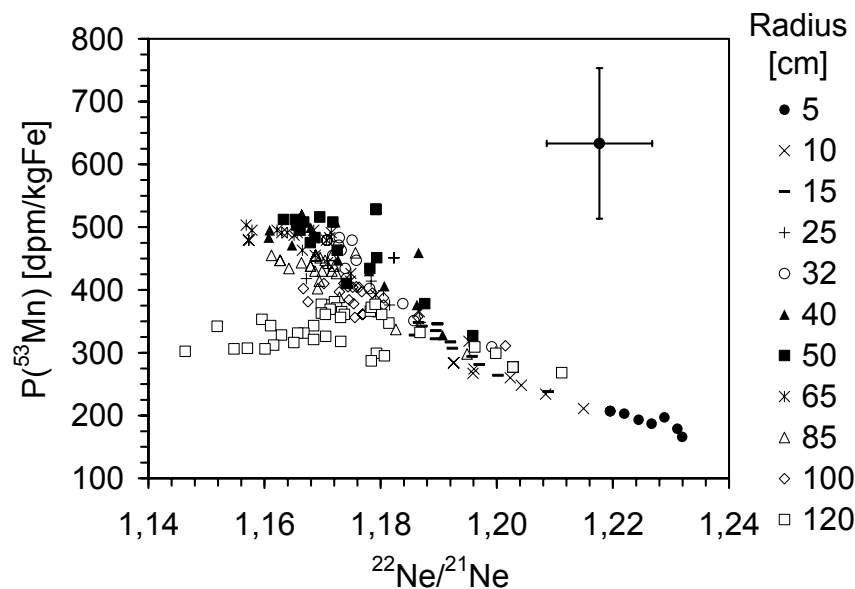


Abbildung 4.58: ^{53}Mn -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die Punkteschar repräsentiert die berechneten Produktionsraten. Die gemessene und mit oben bestimmtem Bestrahlungsalter auf Sättigung korrigierte ^{53}Mn -Aktivität ist mit Fehlern eingezeichnet. Sie liegt höher als die berechneten Werte.

4.1.2 Zusammenfassung der Ergebnisse für Marsmeteorite

Im Rahmen dieser Arbeit konnten einige Radionuklidkonzentrationen erstmalig bestimmt werden (Tabelle 4.13). Die übrigen Daten befinden sich überwiegend im Bereich bisher gemessener Radionuklidkonzentrationen.

Tabelle 4.13: Gemessene Radionuklidkonzentrationen. Die fettgedruckten Daten sind im Rahmen dieser Arbeit erstmalig bestimmt worden.

Meteorit	^{10}Be [dpm/kg]	^{26}Al [dpm/kg]	^{53}Mn [dpm/kg Fe]
ALHA 77005	-	-	127 ± 15
ALH 84001	23,1 ± 1,9	70,6 ± 5,8	253 ± 30
Chassigny	22,7 ± 1,9	49,1 ± 4,1	257 ± 26
EETA79001A	5,3 ± 0,4	40,9 ± 3,9	39,9 ± 4,5
Governador Valadares	23,9 ± 0,8	86,8 ± 2,8	543,7 ± 45,1
Lafayette	21,0 ± 1,7	80,7 ± 6,6	318 ± 36
Nakhla	24,7 ± 2,0	87,6 ± 7,2	384 ± 42
SaU 005	13,5 ± 0,4	48,5 ± 1,7	78,6 ± 6,1
Shergotty	16,6 ± 1,4	80,0 ± 6,6	160 ± 17
Zagami	-	-	317 ± 34

Die untersuchten Marsmeteorite konnten zum überwiegenden Teil konsistent diskutiert werden, in drei Meteoriten zeigten sich jedoch deutliche SCR-Effekte: ALHA77005, Lafayette und Zagami.

Die SCR-Effekte im Meteoriten ALHA 77005 zeigten sich in Übereinstimmung mit Arbeiten von Nishiizumi et al. [NIS86], [NIS86b]. Auch im Meteoriten Zagami wurde, in Übereinstimmung mit den Untersuchungen von Garrison et al. [GAR95] eine deutliche Ne-Überproduktion durch SCR gefunden. Hier konnten auch Überproduktionen der Radionuklide ^{10}Be , ^{26}Al und ^{53}Mn gefunden werden. Bei beiden Meteoriten sind die Auswirkungen der SCR auf die ^{53}Mn -Produktion erstmalig gefunden und untersucht worden.

SCR-Effekte im Meteorit Lafayette wurden im Rahmen dieser Arbeit erstmalig entdeckt. Diese zeigten sich nicht nur in SCR-produziertem Neon, sondern auch in einer Überproduktion von ^{10}Be , ^{26}Al und ^{53}Mn . Dadurch war allerdings, wie bei ALHA 77005 und Zagami, mit dem verwendeten Modell, welches lediglich GCR berücksichtigt, keine Berechnung eines abgesicherten Bestrahlungsalters möglich.

In den Meteoriten EETA 79001A und Shergotty wurden ebenfalls zu hohe $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnisse (Abbildung 4.18 und 4.47) gefunden. Nach der Korrektur dieser Überproduktion mittels des Bernplots waren alle kosmogenen Nuklide konsistent diskutierbar. Das berechnete Bestrahlungsalter von $(0,65 \pm 0,07)$ Ma ist in guter Übereinstimmung zu Literaturdaten ohne das SCR-Effekte, wie sie von Garrison et al. [GAR95] (EETA 79001A) und Nishiizumi et al. [NIS86b] (Shergotty) beobachtet wurden, berücksichtigt werden mussten. Die Ursache der ^{22}Ne -Überproduktion könnte mit einer Vorbestrahlung auf dem Mars in großer Tiefe erklärt werden. Da Edelgaskonzentrationen bei Bestrahlung linear mit der Zeit zunehmen, würde eine sehr lange Bestrahlung (> 100 Ma) in großer Tiefe (> 3 m) zwar langsam Edelgase produzieren, die Sättigungsaktivität der Radionuklide aus dieser Vorbestrahlung wäre jedoch sehr gering, durch die anschließende Produktion bei der 2π -Bestrahlung überdeckt und somit nicht mehr nachweisbar. Wegen der sehr schwachen Edelgas-Produktion in derart großen Tiefen lässt sich diese Zeitspanne mit dem verwendeten Modell nicht genauer datieren. Nishiizumi et al. geben für die Dauer einer derartigen Vorbestrahlung 100 Ma an [NIS86b].

In den sonstigen Marsmeteoriten ALH 84001, Chassigny, Governador Valadares, Nakhla und Sayh al Uhaymir 005 machten alle analysierten kosmogenen Nuklide eine konsistente Diskussion möglich. Dadurch war es nicht nur möglich, durch Anwendung verschiedener Methoden konkordante Bestrahlungsalter zu errechnen, sondern darüber hinaus konnten Größenabschätzungen vorgenommen und die Abschirmtiefen der untersuchten Proben angegeben werden. Die Größenabschätzungen sind in Übereinstimmung mit denen anderer Autoren [GOS97], [EUG02]. Für Governador Valadares konnten hier erstmalig Größenabschätzungen angegeben werden.

Ein Vergleich der im Rahmen dieser Arbeit gefundenen Bestrahlungsalter mit denen von Eugster et al. [EUG97], [EUG02] liefert eine weitgehende Übereinstimmung beider Modelle, mit einer Tendenz zu höheren Bestrahlungsaltern unter Verwendung des physikalischen Modells (Abbildung 4.59). Diese systematische Abweichung kommt durch generell niedrigere Produktionsraten zustande, die mit dem physikalischen Modell berechnet wurden (vergleiche Abbildung 4.53 in [LEY00a]). Eine Klärung, welches Modell exaktere Produktionsraten berechnet, steht noch aus [WIE02].

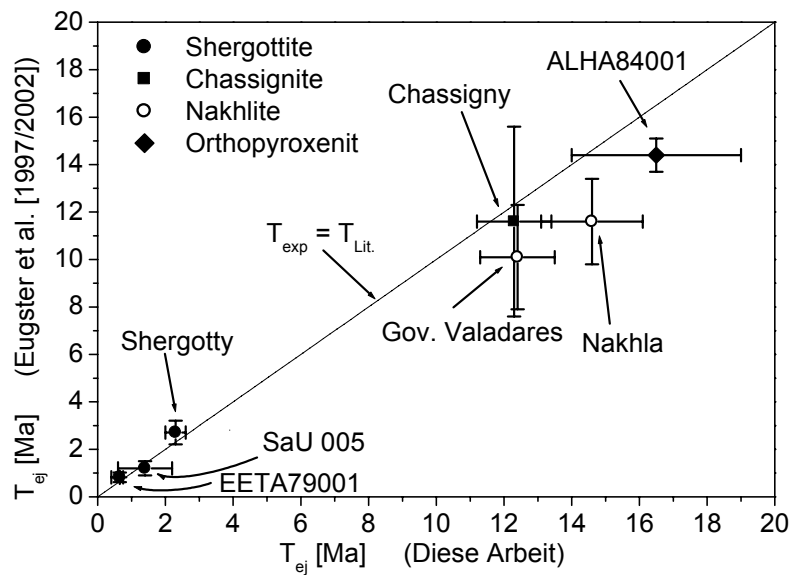


Abbildung 4.59: Vergleich der in dieser Arbeit bestimmten Ejektionsalter mit denen von Eugster et al. Alle Alter sind in guter Übereinstimmung. Die Anwendung des physikalischen Modells von Leya et al. [LEY00] führt tendenziell zu höheren Bestrahlungsaltern, in Übereinstimmung mit [LEY00a].

Für das terrestrische Alter des Meteoriten EETA 79001A konnte mit 250 ka eine engere obere Grenze als von Sarafin et al. (≤ 500 ka, [SAR85a]) angegeben werden. Das mittlere terrestrische Alter, welches dort angegeben wurde, ist mit den ^{14}C -Aktivitäten, welche in [JUL88] gefunden wurden, nicht vereinbar, so dass das terrestrische Alter aus [JUL88] vertrauenswürdiger erscheint.

Betrachtet man das Ejektionsalter der Marsmeteorite als Summe aus terrestrischem Alter und Bestrahlungsalter, dann ist es möglich, die Ejektionsalter der Meteorite, für die ein zuverlässiges Bestrahlungsalter (Tabelle 4.14) errechnet werden konnte, zu gruppieren. Dazu sind 4 Ejektionsereignisse erforderlich: ein Ereignis vor 1 Ma, für die Meteorite EETA 79001A und Sayh al Uhaymir 005 sowie eines vor 2,2 Ma für Shergotty. Dies ist in Übereinstimmung mit [EUG97] und [EUG02].

Nach den Daten dieser Arbeit sind für die länger als 10 Ma bestrahlten Meteorite zwei Einteilungen möglich: entweder ein Ereignis vor 12,4 Ma, welches Governador Valadares und Chassigny vom Mars ablöste und eines vor 15,5 Ma für die gleichzeitige Ejektion von Nakhla und ALHA 84001, oder eines vor 13,2 Ma, welches die drei Meteorite Chassigny, Governador Valadares und Nakhla vom Mars ablöste und eines vor 16,7 Ma, welches ALHA 84001 in den interplanetaren Raum beförderte. In jedem Falle liegen die Ejektionsereignisse, die aus den Berechnungen dieser Arbeit hervorgehen, für die länger als 10 Ma bestrahlten Meteorite bei höheren Altern, als in [EUG97] und [EUG02] (vergleiche Abbildung 4.59).

Die wichtigsten Daten, die im Rahmen dieser Arbeit für die Marsmeteorite gewonnen werden konnten, sind in Tabelle 4.14 nochmals zusammengefasst.

Tabelle 4.14: Zusammenfassung der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Daten zu den Mars Meteoriten.

Meteorit	Klasse	T _{terr} [Ma]	T _{exp} [Ma]	T _{ej} **** [Ma]	Radius [cm]	Abschirm- tiefe [cm]
ALHA 77005	LhSh	0,19**	-	-	5	≤ 2,5
EETA 79001A*	BaSh	≤ 0,25	0,65 ± 0,1	0,8 -0,25 +0,1	25-65	7-13
SaU 005	BaSh	≈ 0	1,4 ± 0,8	1,4 ± 0,8	15-50	> 8
Shergotty*	BaSh	Fall	2,3 ± 0,5	2,3 ± 0,5	40	32-40
Zagami	BaSh	Fall	-	-	10*****	≤ 2,5*****
Gov. Val.	Nak.	≈ 0	12,4 ± 1,1	12,4 ± 1,1	40	25-40
Lafayette	Nak.	≈ 0	-	-	10*****	≤ 2,5*****
Nakhla	Nak.	Fall	14,6 ± 1,5	14,6 ± 1,5	40	≈ 30
Chassigny	Ch.	Fall	12,3 ± 1,1	12,3 ± 1,1	25-40	10-15
ALHA 84001	OPX	0,010***	16,7 ± 1,6	16,7 ± 1,6	15	< 10

* unter Annahme einer einfachen Bestrahlungsgeschichte

** terrestrisches Alter nach [NIS89]

*** terrestrisches Alter als Mittelwert aus [JUL94] und [JUL98]

**** Das Ejektionsalter ist die Summe aus terrestrischem Alter und Bestrahlungsalter

***** Allein Aufgrund des $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnisses abgeschätzte Radien und Abschirmtiefen

4.1.3 Chondrite

Grüneberg

M. Wadhwa vom Field Museum in Chicago stellte uns Proben des Meteoriten Grüneberg zur Verfügung. Dieser Meteorit wurde untersucht, weil in ihm anhand des physikalischen Modells SCR-Effekte vermutet wurden [LEY01]. Leya et al. [LEY01] berechneten aus dem $^{36}\text{Cl}/^{36}\text{Ar}$ -Alter und der gemessenen ^{21}Ne -Konzentration eine ^{21}Ne -Produktionsrate, und verglichen diese mit Ergebnissen derselben Modellrechnungen, wie sie in dieser Arbeit verwendet wurden. Dabei zeigte sich eine ^{21}Ne -Überproduktion. Damit bot dieser Meteorit eine gute Möglichkeit, die Reproduzierbarkeit der Erkennung von SCR-Effekten zu überprüfen. Außerdem konnten hier zum ersten Mal Überproduktionen der kosmogenen Radionuklide in Grüneberg untersucht werden. Auf diese Weise ließen sich die in ALHA 77005, Lafayette und Zagami gefundenen SCR-Effekte absichern.

Für die Durchführung der Modellrechnungen für den Meteoriten Grüneberg wurden die im Rahmen dieser Arbeit via PGAA gemessenen Element-Konzentrationen benutzt. Zur Bestimmung des Bestrahlungsalters wurden Edelgasdaten aus [MET03, darin WEB92] herangezogen. ^3He ist vollständig kosmogenen Ursprungs, wohingegen Ne-Konzentrationen unter bestimmten Bedingungen korrigiert werden müssen. Dazu werden die Bedingungen und Beziehungen nach [SCH93] verwendet. Für den Meteorit Grüneberg ergaben diese Bedingungen ($^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ -Verhältnisse) jedoch, dass eine Korrektur nicht notwendig ist.

Tabelle 4.15: Kosmogene Nuklide in Grüneberg. Die Radionuklide wurden im Rahmen dieser Arbeit bestimmt, die Edelgase stammen aus [MET03], darin die neuesten Daten [WEB92]. Das gemessene $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ -Verhältnis beträgt $0,820 \pm 0,004$. Damit erübrigt sich eine Korrektur der Edelgasverhältnisse auf den rein kosmogenen Anteil [SCH93].

Grüneberg	
^{10}Be	$(23,1 \pm 1,9) \text{ dpm/kg}$
^{26}Al	$(75,2 \pm 6,2) \text{ dpm/kg}$
^{53}Mn	$(439 \pm 57) \text{ dpm/kg}$
^3He	$(13,20 \pm 0,66) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
^{21}Ne	$(1,900 \pm 0,095) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$
^{22}Ne	$(2,280 \pm 0,114) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ STP}$

Die Radionuklidkonzentrationen wurden im Fall von Grüneberg erstmalig bestimmt und liegen im für H-Chondrite üblichen Bereich.

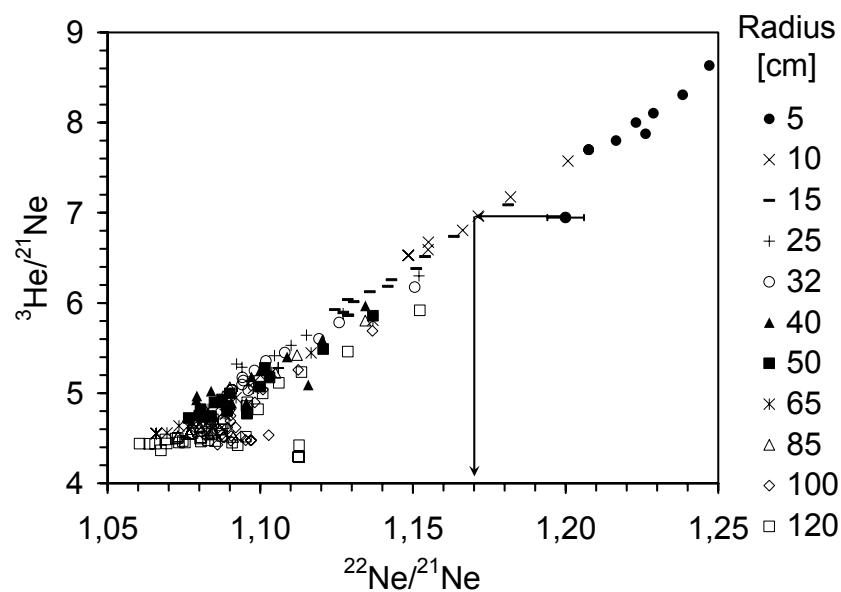


Abbildung 4.60: Bernplot für Grüneberg. Man erkennt eine Überproduktion an ^{22}Ne , das korrigierte $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis ergibt sich zu $1,171 \pm 0,035$.

Mit der Überproduktion von ^{22}Ne liefert der Bernplot einen ersten Hinweis auf SCR-Effekte. Mit dem korrigierten $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis wird nunmehr ein Bestrahlungsalter bestimmt (Abbildung 4.61 und 4.62)

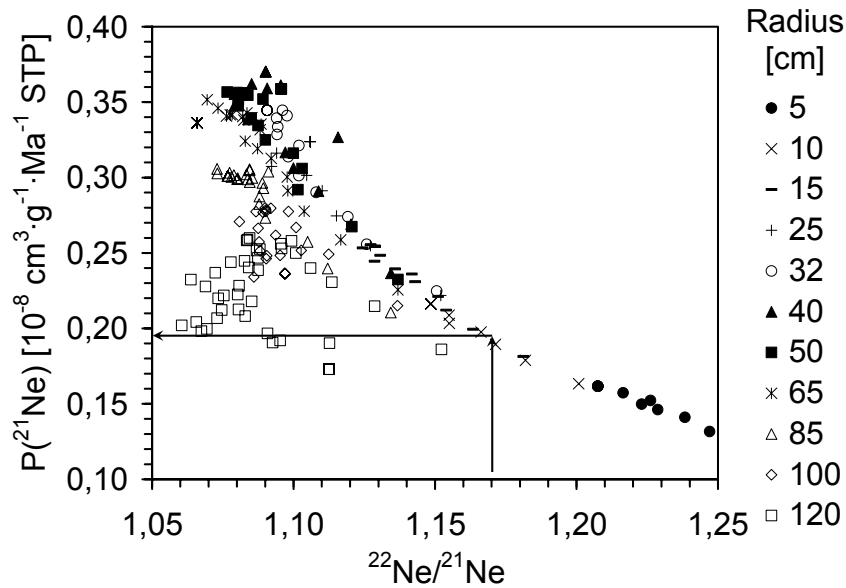


Abbildung 4.61: ^{21}Ne -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis zur Berechnung der Produktionsrate von ^{21}Ne in Grünberg. Die berechneten Werte sind als Punkte eingetragen, entlang der Pfeile lässt sich die ^{21}Ne -Produktionsrate ablesen

Mit einer Produktionsrate von $(0,193 \pm 0,018) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$ ergibt sich ein ^{21}Ne -Bestrahlungsalter von $T_{21} = (9,8 \pm 1,3) \text{ Ma}$.

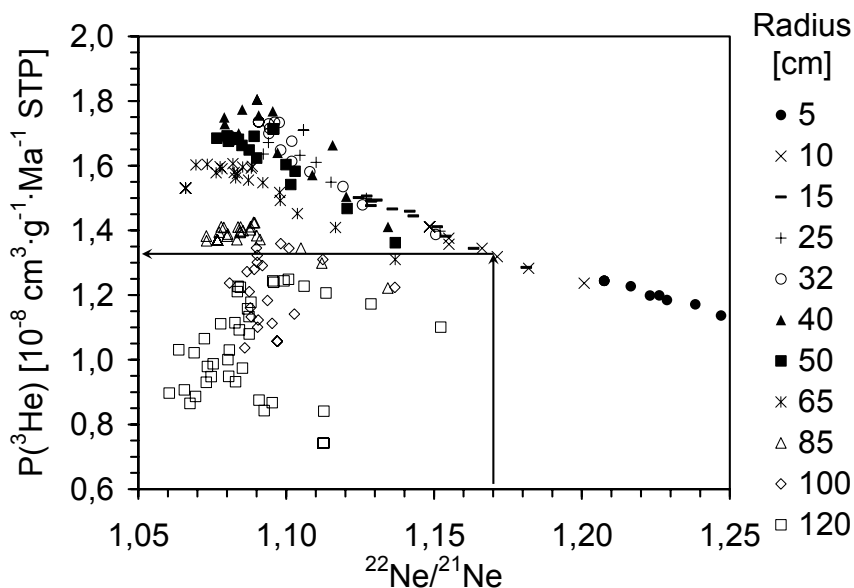


Abbildung 4.62: ^3He -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis zur Berechnung des ^3He -Alters. Die eingetragenen Punkte sind berechnete Werte. Entlang der Pfeile lässt sich die ^3He -Produktionsrate bestimmen.

Mit einer Produktionsrate von $P_3 = (1,32 \pm 0,13) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$ (Abbildung 4.62) ergibt sich das ^3He -Bestrahlungsalter zu $T_3 = (9,9 \pm 1,3 \text{ Ma})$, welches konkordant zum ^{21}Ne -Alter ist. Damit lässt sich ein Bestrahlungsalter aus dem Mittelwert beider Alter berechnen und ergibt sich zu $T_{\text{exp}} = (9,9 \pm 1,3) \text{ Ma}$. Das mit diesem Modell, welches lediglich GCR berücksichtigt, bestimmte Alter ist höher als das ^{36}Cl - ^{36}Ar -Alter mit $(7,54 \pm 0,24) \text{ Ma}$ [GRA01]. Die ^{36}Cl - ^{36}Ar -Methode der Altersbestimmung gilt als

besonders zuverlässig, da die so bestimmten Alter unabhängig von der Abschirmtiefe der Probe zu gleichen Resultaten führen [SCH65], [LAV99], [LEY00a]. ^{36}Ar wird in Ni und Fe fast ausschließlich über den Progenitor ^{36}Cl produziert. Separiert man also die magnetische Phase eines Meteoriten sauber ab, so lassen sich tiefenunabhängige $^{36}\text{Cl}/^{36}\text{Ar}$ -Verhältnisse messen, die sich nur mit der Bestrahlungszeit ändern.

Mit dem in dieser Arbeit gefundenem Alter von $(9,9 \pm 1,3)$ Ma wird die gemessene ^{53}Mn -Aktivität auf Sättigungsaktivität korrigiert: ^{53}Mn hat nach einer Bestrahlung von 9,9 Ma lediglich 84 % seiner Sättigungsaktivität erreicht. Bei dem berechneten Bestrahlungsalter und $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis hat eine Überproduktion aller gemessenen kosmogenen Radionuklide ^{10}Be , ^{26}Al und ^{53}Mn stattgefunden (Abbildungen 4.63 bis 4.65).

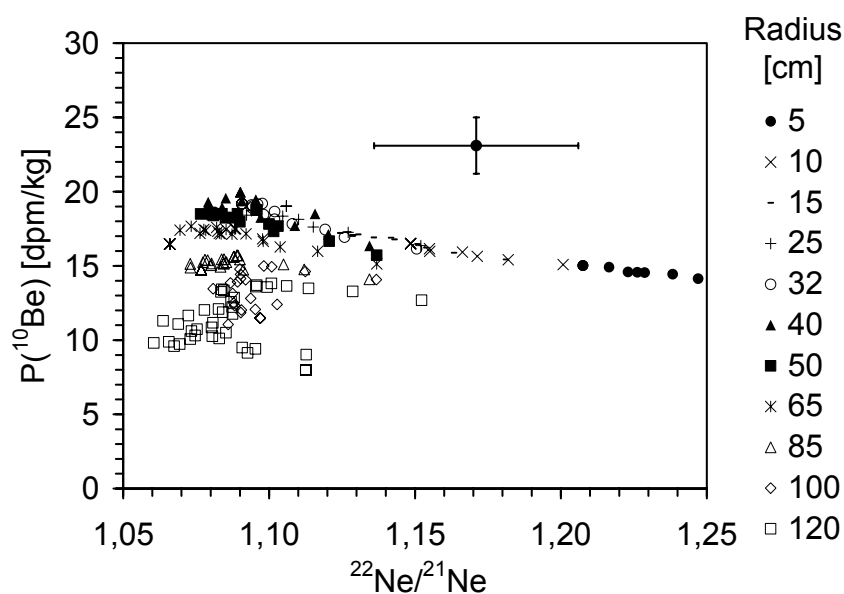


Abbildung 4.63: ^{10}Be -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die berechneten Werte sind durch Punkte wiedergegeben. Der gemessene ^{10}Be Wert ist mit dem anhand des Bernplots korrigierten $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis mit Fehlerbalken eingetragen. Die beobachtete ^{10}Be -Aktivität ist wesentlich höher als die berechneten Werte.

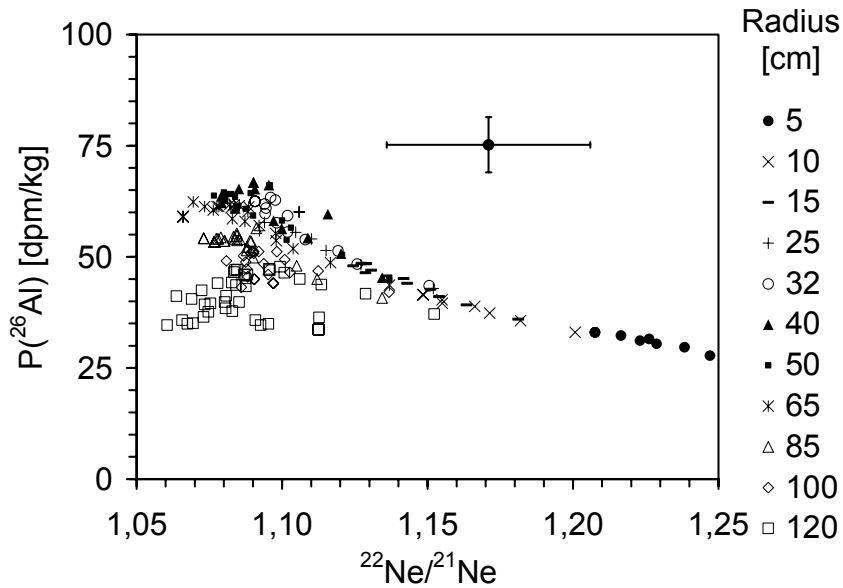


Abbildung 4.64: ^{26}Al -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die berechneten Werte sind durch Punkte wiedergegeben. Die gemessene ^{26}Al -Konzentration ist mit dem anhand des Bernplots korrigierten $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis mit Fehlerbalken eingetragen. Die beobachtete ^{26}Al -Aktivität ist wie die ^{10}Be -Aktivität (Abbildung 4.63) wesentlich höher als berechnete Werte.

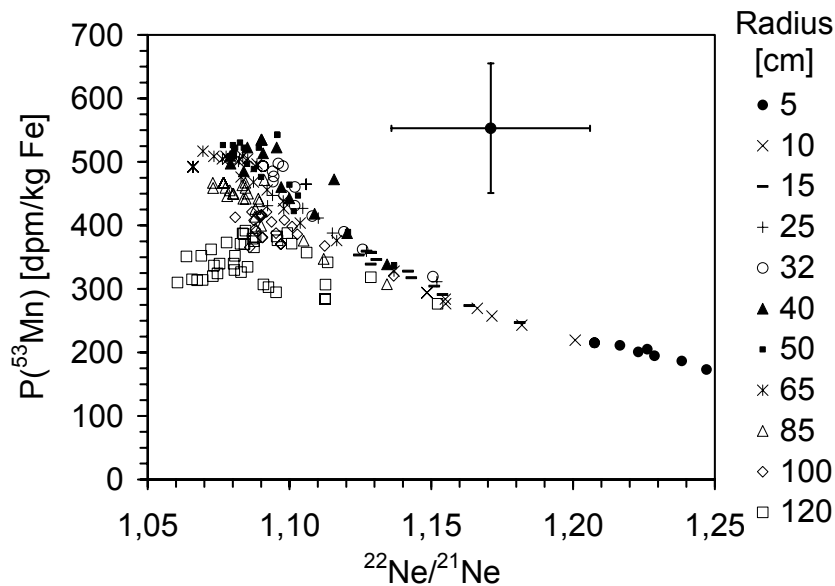


Abbildung 4.65: ^{53}Mn -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die berechneten Werte sind durch Punkte wiedergegeben. Die auf Sättigungsaktivität korrigierte ^{53}Mn -Konzentration ist mit dem anhand des Bernplots korrigierten $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis mit Fehlerbalken eingetragen. Auch die beobachtete ^{53}Mn -Aktivität ist wesentlich höher als berechnete Werte.

Für Grüneberg kann aus diesen Erkenntnissen abgeleitet werden, dass es sich um einen kleineren Meteoroiden mit einem Radius von etwa 10 cm gehandelt haben muss ($^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis). Es wurden ^{10}Be -, ^{26}Al - und ^{53}Mn -Überproduktionen entdeckt. Die Überproduktion aller Nuklide lässt sich durch SCR-Effekte erklären. Die Radionuklid-Überproduktionen wurden im Meteoriten Grüneberg erstmalig entdeckt.

Morávka

Zunächst wird in Tabelle 4.16 eine Übersicht über die gemessenen Konzentrationen kosmogener Nuklide gegeben, die Radionuklide wurden im Rahmen dieser Arbeit gemessen, die Edelgase stammen von L. Schultz [SCH03c]. Zur Berechnung der theoretischen Produktionsraten wurden die Analysenergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten PGAA-Analyse verwendet. Für C, Rb, Sr, Y und Zr lagen keine Daten vor, weswegen hierfür der Mittelwert für H-Chondrite aus [LOD98a] eingesetzt wurde.

Tabelle 4.16: Konzentrationen kosmogener Nuklide in Morávka. Die Radionuklide wurden im Rahmen dieser Arbeit gemessen, die Edelgasdaten werden [SCH03c] entnommen.

Morávka 1	Morávka 2
^{10}Be (20,3 ± 1,6) dpm/kg	^{10}Be (19,7 ± 1,6) dpm/kg
^{26}Al (63,5 ± 5,0) dpm/kg	^{26}Al (57,5 ± 4,8) dpm/kg
^{53}Mn (390 ± 44) dpm/kg Fe	^{53}Mn (395 ± 45) dpm/kg Fe
^3He (5,23 ± 0,26) · 10 ⁻⁸ cm ³ · g ⁻¹ STP	^3He (3,67 ± 0,18) · 10 ⁻⁸ cm ³ · g ⁻¹ STP
^{21}Ne (2,04 ± 0,10) · 10 ⁻⁸ cm ³ · g ⁻¹ STP	^{21}Ne (1,75 ± 0,09) · 10 ⁻⁸ cm ³ · g ⁻¹ STP
^{22}Ne (2,19 ± 0,11) · 10 ⁻⁸ cm ³ · g ⁻¹ STP	^{22}Ne (1,91 ± 0,10) · 10 ⁻⁸ cm ³ · g ⁻¹ STP
^{36}Ar (1,295 ± 0,065) · 10 ⁻⁸ cm ³ · g ⁻¹ STP	^{36}Ar (1,160 ± 0,058) · 10 ⁻⁸ cm ³ · g ⁻¹ STP
^{38}Ar (0,502 ± 0,025) · 10 ⁻⁸ cm ³ · g ⁻¹ STP	^{38}Ar (0,410 ± 0,021) · 10 ⁻⁸ cm ³ · g ⁻¹ STP
^{40}Ar (3173 ± 159) · 10 ⁻⁸ cm ³ · g ⁻¹ STP	^{40}Ar (1243 ± 62) · 10 ⁻⁸ cm ³ · g ⁻¹ STP

Zusätzlich wurde noch in einem Stück Morávka mit der Masse 96,6 g (zur Verfügung gestellt von Ch. Anger, Österreich) per γ - γ -Koinzidenz folgende Aktivitäten bestimmt:

^{22}Na : (90 ± 21) dpm/kg (korrigiert auf Fallzeitpunkt 06.05.2000)

^{26}Al : (62 ± 12) dpm/kg

Diese Werte stimmen im Rahmen der Fehler mit [NED01] überein, ansonsten beinhaltet Tabelle 4.15 die ersten Messungen der Radionuklide in Morávka.

Zunächst fällt auf, dass im Bern-Plot beide Proben deutlich unterhalb der Bern-Linie liegen (Abbildung 4.66). Dies kann ein Indiz für eine komplexe Bestrahlungsgeschichte sein [WEL01], [MAS01]. Dafür konnte aber kein weiterer Anhaltspunkt gefunden werden, so dass eher von einem ^3He -Verlust auszugehen ist.

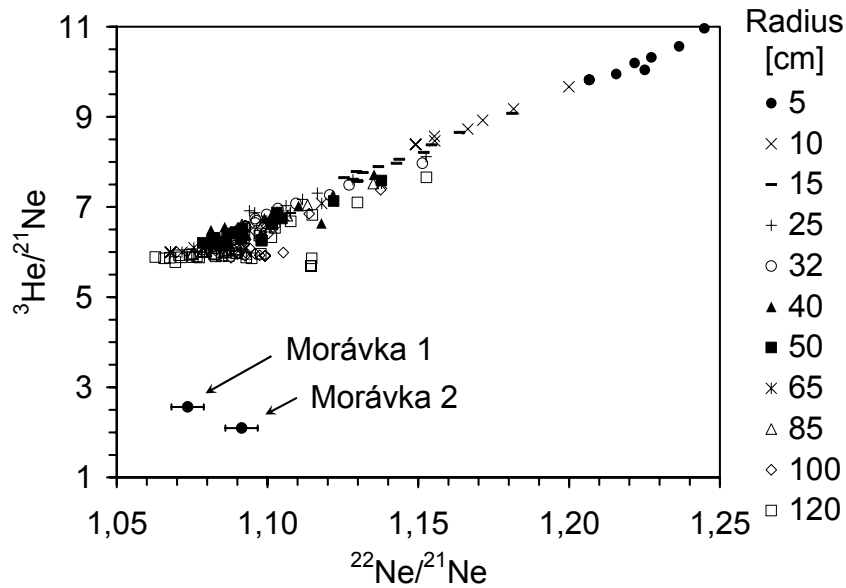


Abbildung 4.66: Bernplot für Morávka. Die Punkte sind berechnete Werte, die gemessenen Edelgaskonzentrationen sind für Morávka 1 und 2 mit Fehlern eingezeichnet.

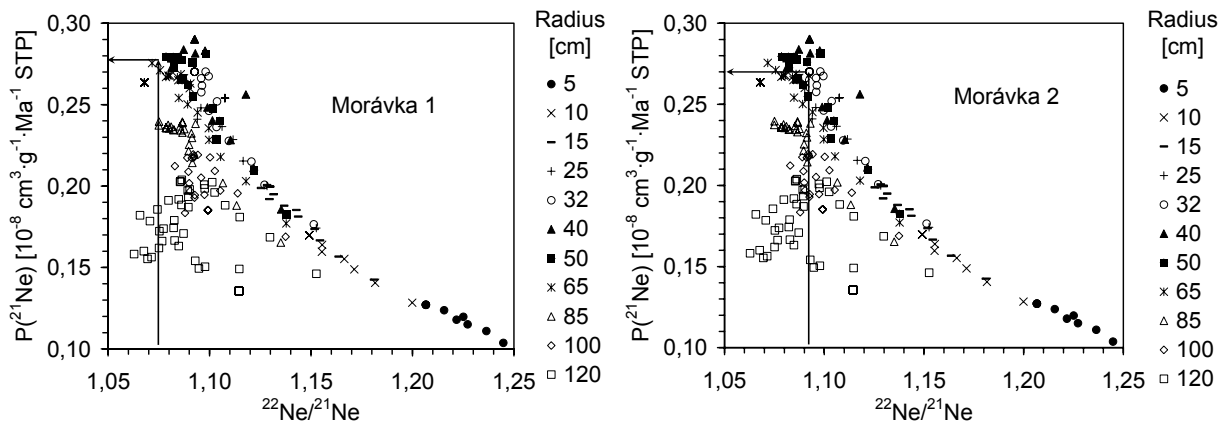


Abbildung 4.67: ^{21}Ne -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die berechneten Werte sind als Punkte eingetragen, entlang der Pfeile kann man die ^{21}Ne -Produktionsrate entnehmen. Links ist das Diagramm für Morávka 1, rechts für Morávka 2.

Die ^{21}Ne -Produktionsrate der Probe Morávka 1 ergibt sich zu $(0,278 \pm 0,026) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$, die ^{21}Ne -Produktionsrate der Probe Morávka 2 ist $(0,270 \pm 0,026) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$. Mit den gemessenen ^{21}Ne -Konzentrationen (Tabelle 4.15) ergeben sich damit konkordante ^{21}Ne -Bestrahlungsalter von $(7,3 \pm 0,8) \text{ Ma}$ für Morávka 1 bzw. $(6,5 \pm 0,7) \text{ Ma}$ für Morávka 2.

Die Größe des ^3He -Bestrahlungsalters fällt erwartungsgemäß deutlich niedriger aus (Abbildung 4.68):

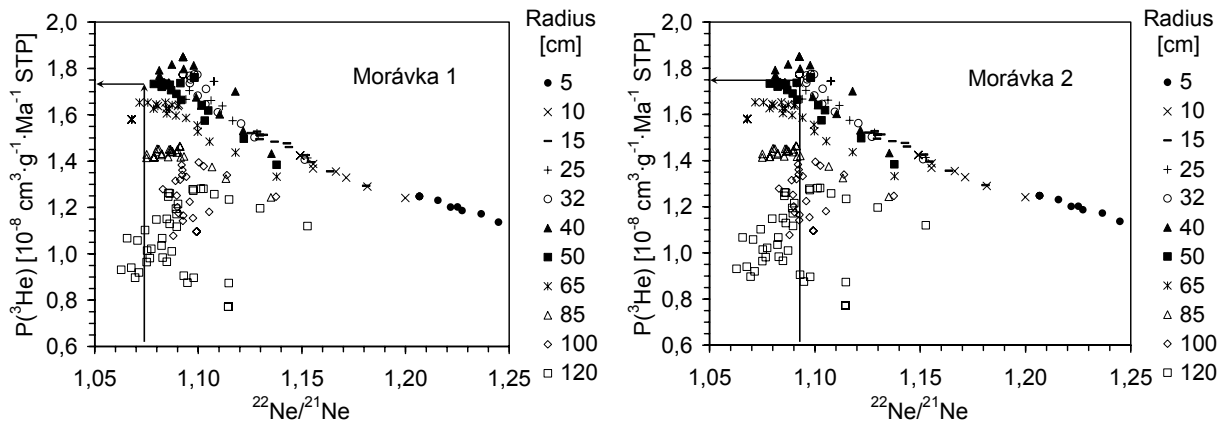


Abbildung 4.68: ^3He -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die berechneten Werte sind als Punkteschar eingetragen, entlang der Pfeile lässt sich die ^3He -Produktionsrate entnehmen. Links: Diagramm für Morávka 1, rechts für Morávka 2.

Aus Abbildung 4.68 entnimmt man ^3He -Produktionsraten von $P_3 = (1,69 \pm 0,16) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$ für Morávka 1 und $P_3 = (1,75 \pm 0,17) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$ für Morávka 2. Daraus errechnen sich zu den ^{21}Ne -Bestrahlungsaltern diskordante Alter von $(3,1 \pm 0,3) \text{ Ma}$ für Morávka 1 und $(2,1 \pm 0,2) \text{ Ma}$ für Morávka 2. Die geringen Alter haben ihre Ursache vermutlich in einem ^3He -Verlust in den untersuchten Morávka-Proben. Beide Alter liegen jedoch in einem Bereich, in dem ^{53}Mn seine Sättigungsaktivität noch nicht erreicht hat. Daher kann auch ein ^{53}Mn -Alter nach Gleichung (1.12) berechnet werden. Die dafür notwendigen Produktionsraten ergeben sich aus Abbildung 4.69.

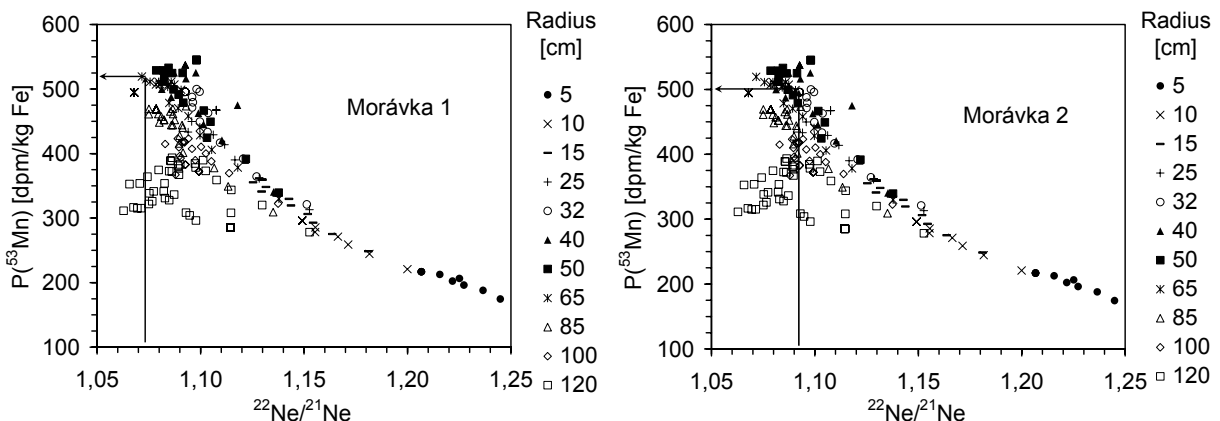


Abbildung 4.69: ^{53}Mn -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die Punkte sind die berechneten Werte, entlang der Pfeile werden die ^{53}Mn -Produktionsraten abgelesen. Links: Diagramm für Morávka 1, rechts für Morávka 2.

Die ^{53}Mn -Produktionsraten für Morávka ergeben sich zu $(520 \pm 50) \text{ dpm/kg Fe}$ für Morávka 1 und zu $(500 \pm 48) \text{ dpm/kg Fe}$ für Morávka 2 (Abbildung 4.69). Damit errechnen sich nach Gleichung 1.12 Bestrahlungsalter von $(7,5 \pm 2,5) \text{ Ma}$ für Morávka 1 und $(8,4 \pm 2,8) \text{ Ma}$ für Morávka 2. Diese Bestrahlungsalter entsprechen den ^{21}Ne -Bestrahlungsaltern. Damit ergibt sich das Bestrahlungsalter für den Meteoroid von Morávka aus dem Mittelwert aller ^{21}Ne und ^{53}Mn -Bestrahlungsalter zu $T_{\text{exp}} = (7,4 \pm 0,7) \text{ Ma}$.

Zur Abschätzung der Größe des Meteoroids und der Abschirmtiefe werden die bei diesen Bestrahlungsalter in Sättigung befindlichen Aktivitäten der Radionuklide ^{10}Be und ^{26}Al herangezogen. Die Modellrechnungen für die tiefenabhängigen Produktionsraten für ^{10}Be und ^{26}Al für verschiedene Meteoroiden-Radien sind in Abbildungen 4.70 und 4.71 enthalten.

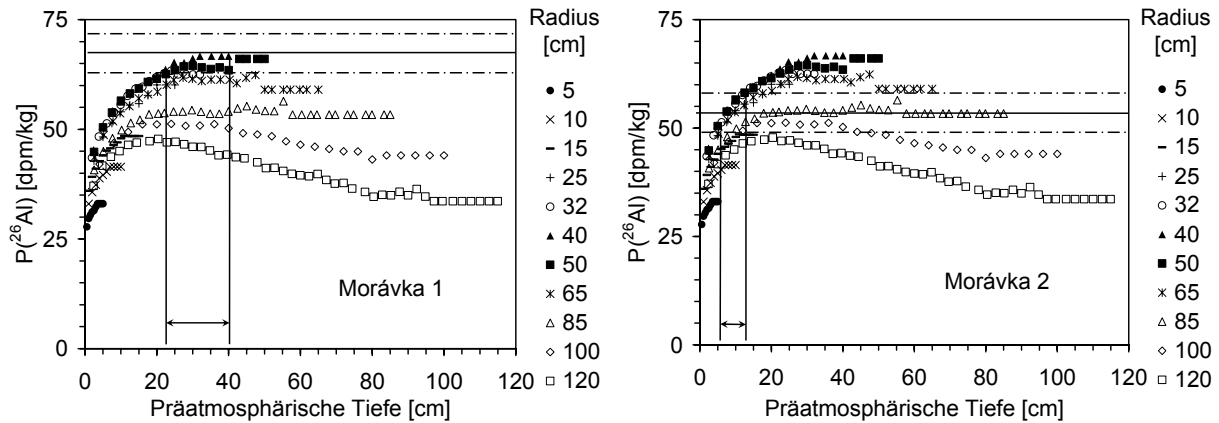


Abbildung 4.70: ^{26}Al -Produktionsrate gegen die präatmosphärische Tiefe. Die Punkte sind die berechneten Werte. Die Messwerte sind als waagerechte Linien eingezeichnet, deren Fehler strichliert. Links: Abbildung für Morávka 1, rechts für Morávka 2.

Die in Morávka 1 gemessene ^{26}Al -Aktivität legt einen präatmosphärischen Radius von 40 cm nahe (Abbildung 4.70 links). Nimmt man diesen Radius als Grundlage, dann folgt daraus, dass sich die Probe von Morávka 1 in einer präatmosphärischen Tiefe zwischen 23 cm und 40 cm befunden hat. Die Probe von Morávka 2 sollte näher unter der präatmosphärischen Oberfläche gelegen haben. Die Abschirmtiefe der Probe von Morávka 2 beträgt 5 cm bis 13 cm.

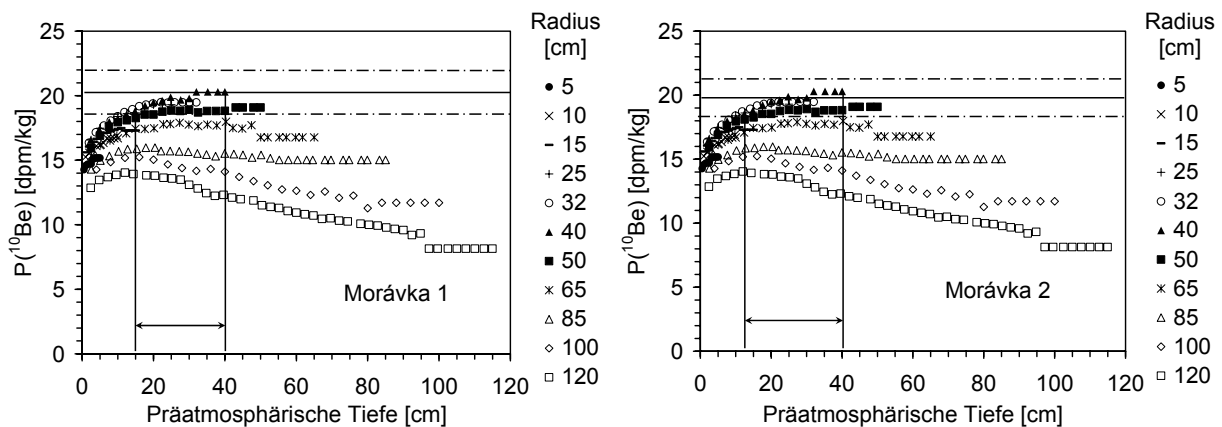


Abbildung 4.71: ^{10}Be -Produktionsrate gegen die präatmosphärische Tiefe. Die Punkte sind die berechneten Werte. Die Messwerte sind als waagerechte Linien eingezeichnet, deren Fehler strichliert. Links: Abbildung für Morávka 1, rechts für Morávka 2.

Die in Morávka 1 und 2 gemessenen ^{10}Be -Aktivitäten sind mit einem Meteoroiden-Radius von 40 cm und den Abschirmtiefen, die aus der ^{26}Al -Aktivität folgen vereinbar. Auch in Abbildung 4.71 ist der Trend einer geringeren Abschirmtiefe der Probe von Morávka 2 erkennbar, die minimalen Abschirmtiefen aus den ^{10}Be -Aktivitäten betragen 15 cm bis 40 cm für die Morávka 1-Probe und 12 cm bis 40 cm für die Morávka 2-Probe.

Damit ergibt sich ein konsistentes Bild aller kosmogenen Nuklide, wenn man einen deutlichen ^3He -Verlust annimmt. Das Bestrahlungsalter aus den ^{21}Ne -Konzentrationen sollte demnach am zuverlässigsten sein, mit diesem stimmt auch das ^{53}Mn -Alter im Rahmen der Fehler überein. Das aus dem Mittelwert der ^{21}Ne - und ^{53}Mn -Alter von Morávka 1 und Morávka 2 berechnete Bestrahlungsalter beträgt: $T_{\text{exp}} = (7,4 \pm 0,7) \text{ Ma}$.

Die per γ - γ -Koinzidenzspektrometrie bestimmte Aktivität ist in guter Übereinstimmung mit der per AMS bestimmten Aktivität. Die γ - γ -spektrometrisch gemessene Probe hat eine ^{26}Al -Aktivität, die zwischen der der Morávka 1 und der Morávka 2 Probe liegt. Tabellen 4.17 und 4.18 fassen die berechneten Parameter von Morávka zusammen.

Tabelle 4.17: Zusammenstellung der berechneten Produktionsraten und Bestrahlungs-Alter von Morávka.

Meteorit	P_{21} [$10^{-8}\text{cm}^3/(\text{g}\cdot\text{Ma})$]	T_{21} [Ma]	P_3 [$10^{-8}\text{cm}^3/(\text{g}\cdot\text{Ma})$]	T_3 [Ma]
Morávka 1	$0,278 \pm 0,026$	$7,3 \pm 0,8$	$1,69 \pm 0,16$	$3,1 \pm 0,3$
Morávka 2	$0,270 \pm 0,026$	$6,5 \pm 0,7$	$1,75 \pm 0,17$	$2,1 \pm 0,2$

Meteorit	P_{53} [dpm/kg Fe]	T_{53} [Ma]
Morávka 1	520 ± 50	$7,5 \pm 2,5$
Morávka 2	500 ± 48	$8,4 \pm 2,8$

Tabelle 4.18: Präatmosphärischen Radien R und Abschirmtiefen D von Morávka 1 und Morávka 2.

Meteorit	R [cm]	D [cm]
Morávka 1	40	22-40
Morávka 2	40	5-13

Somit ergibt sich – bis auf die zu kleinen ^3He -Konzentrationen – ein konsistentes Bild der Bestrahlungsgeschichte von Morávka, was eine komplexe Bestrahlungsgeschichte ausschließt.

Naragh

Eingangsparameter für die Berechnung ist die Bulkanalyse von Naragh aus [BUR75]. Tabelle 4.19 gibt zunächst einen Überblick über die gemessenen Nuklid-Daten. Die Edalgaskonzentrationen zu Bestimmung des Bestrahlungsalters wurden [WIE89], zitiert in [MET03] entnommen.

Tabelle 4.19: Konzentrationen kosmogener Nuklide. Edelgaskonzentrationen aus [WIE89], zitiert nach [MET03].

Naragh	
^{10}Be	$(19,0 \pm 1,5)$ dpm/kg
^{26}Al	$(49,8 \pm 4,6)$ dpm/kg
^{53}Mn	(316 ± 36) dpm/kg Fe
^3He	$(17,46 \pm 0,87) \cdot 10^{-8}$ cm $^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{21}Ne	$(2,930 \pm 0,147) \cdot 10^{-8}$ cm $^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{22}Ne	$(3,430 \pm 0,172) \cdot 10^{-8}$ cm $^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP

In [VOG88a] finden sich an der gleichen Probe [HER02] gemessene Konzentrationen für ^{10}Be und ^{26}Al . Während die dort gemessene ^{26}Al -Konzentration mit $(47,6 \pm 2,9)$ dpm/kg mit der hier gemessenen übereinstimmt, weicht die ^{10}Be -Konzentration aus [VOG88a] mit $(8,3 \pm 0,5)$ dpm/kg um etwa den Faktor 2 ab. Daher wurde die Naragh-Probe im Rahmen dieser Arbeit viermal gemessen. Zweimal im selben Probenet am selben Messtermin und zusätzlich noch je einmal in zwei getrennten Aufarbeitungen und Messterminen, um systematische Fehler möglichst auszuschließen. Da die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Daten im Rahmen der Fehler übereinstimmen, wurden diese Werte allein zur Auswertung herangezogen. Der Wert von Vogt wurde verworfen, obwohl er an derselben Probe gemessen wurde; ^{53}Mn ist für Naragh erstmalig gemessen worden.

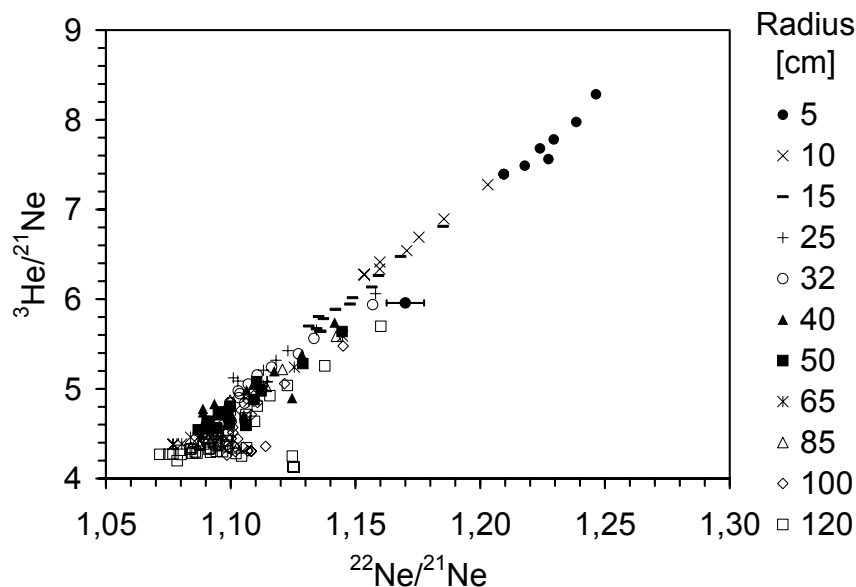


Abbildung 4.72: Bernplot für Naragh. Der Messpunkt liegt im Rahmen der Fehler auf der berechneten Linie. ^3He und ^{21}Ne sollten konkordante Alter liefern.

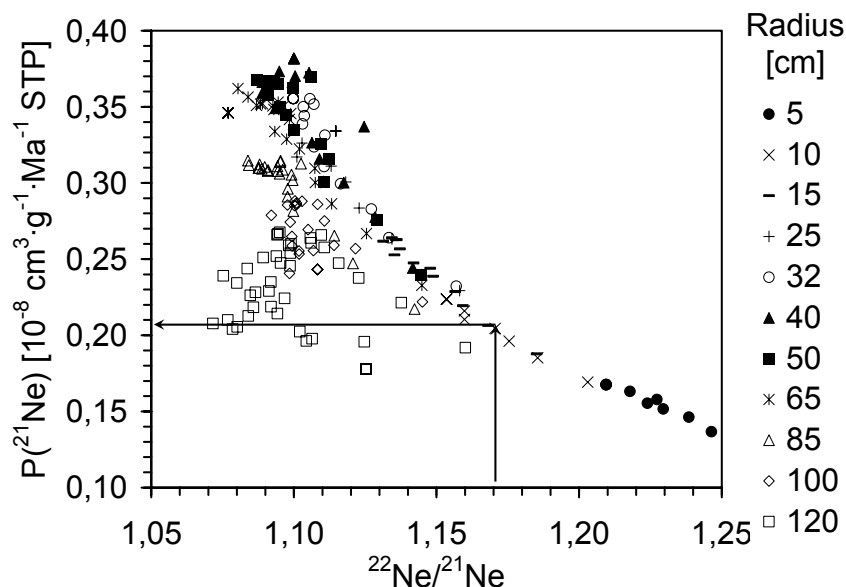


Abbildung 4.73: ^{21}Ne -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die berechneten Werte sind als Punkte eingetragen, die ^{21}Ne -Produktionsrate ergibt sich graphisch entlang der Pfeile.

Nach Abbildung 4.73 ergibt sich die Produktionsrate für ^{21}Ne zu $P_{21} = (0,205 \pm 0,018) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$. Daraus errechnet sich mit der gemessenen ^{21}Ne -Konzentration ein ^{21}Ne -Bestrahlungsalter von $(14,3 \pm 1,8) \text{ Ma}$.

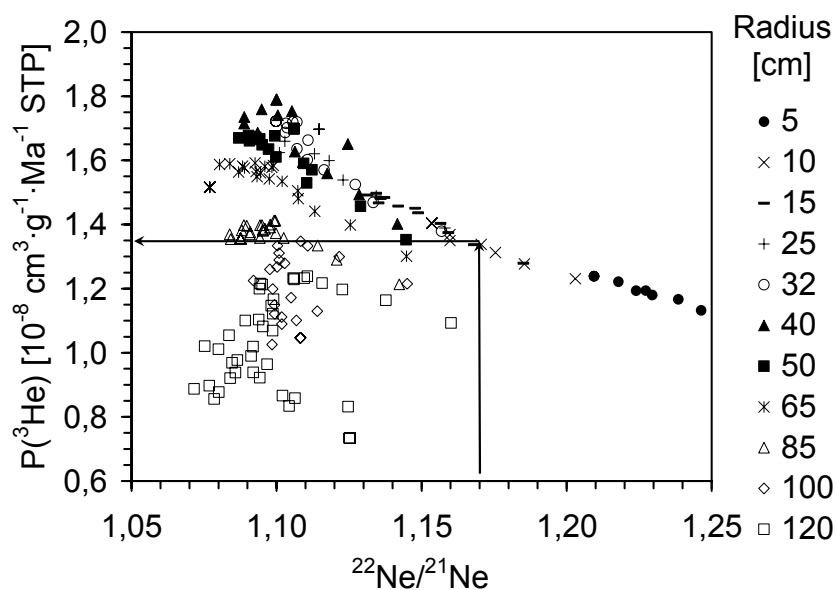


Abbildung 4.74: ^3He -Produktionsrate gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die berechneten Werte sind als Punkte eingetragen, die ^{21}Ne -Produktionsrate ergibt sich graphisch entlang der Pfeile.

Die ^3He -Produktionsrate ergibt sich anhand von Abbildung 4.74 zu $P_3 = (1,34 \pm 0,12) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$. Mit der gemessenen ^3He -Konzentration (Tabelle 4.18) berechnet sich damit das ^3He -Bestrahlungsalter zu $T_3 = (13,0 \pm 1,6) \text{ Ma}$, womit dieses Alter mit dem ^{21}Ne -Bestrahlungsalter konkordant ist. Das Bestrahlungsalter von Naragh ist demnach $T_{\text{exp}} = (13,7 \pm 1,5) \text{ Ma}$. Damit sind die Nuklide ^{10}Be und ^{26}Al in Sättigung, ^{53}Mn hat erst 92 % seiner Sättigungsaktivität

aufgebaut. Mit diesen Informationen werden der präatmosphärische Radius und die Abschirmtiefe der Probe ermittelt (Abbildungen 4.75 bis 4.77).

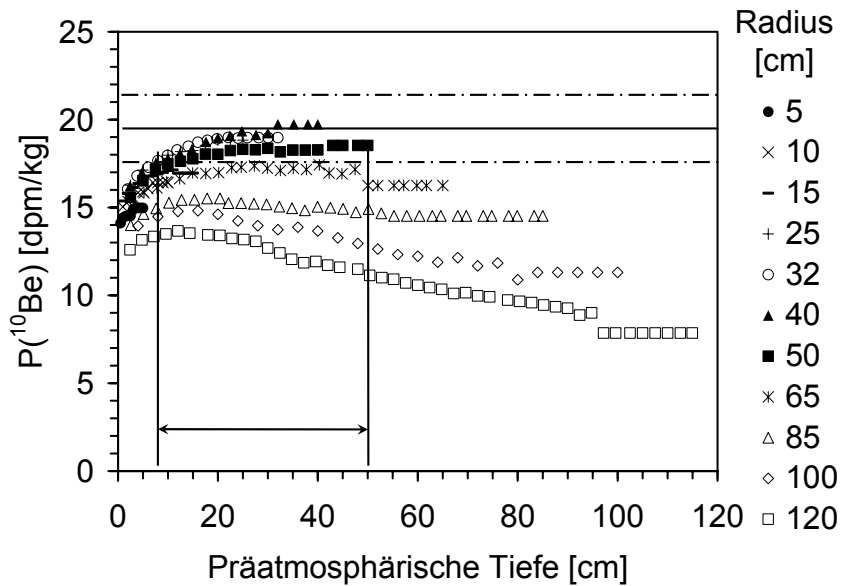


Abbildung 4.75: ^{10}Be -Produktionsrate gegen die präatmosphärische Tiefe. Die berechneten Werte sind durch Punkte, der gemessene Wert als waagerechte Linie mit Fehlern (strichliert) eingetragen.

Die gemessene ^{10}Be -Aktivität der Probe wird in einem Meteoroiden mit 25-50 cm Radius in einer präatmosphärischen Tiefe von 7 cm bis 50 cm erzeugt.

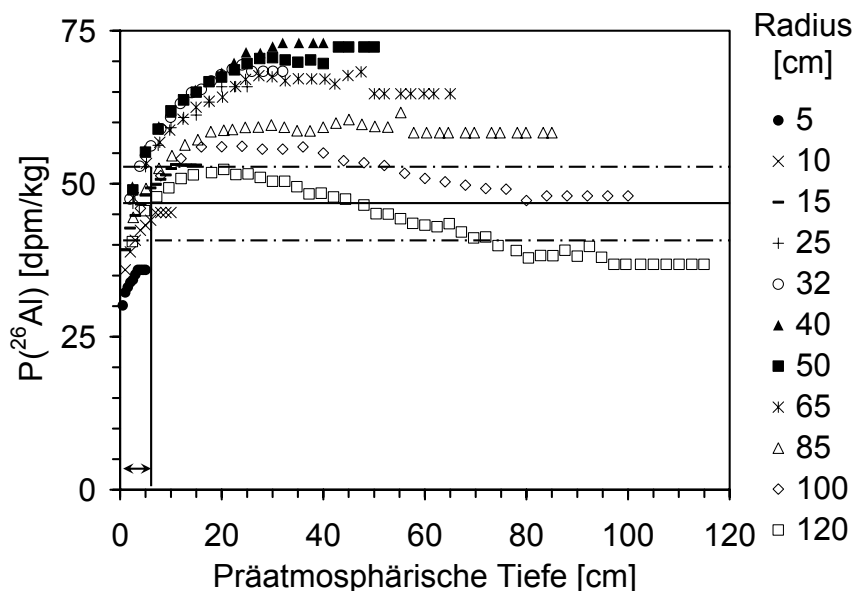


Abbildung 4.76: ^{26}Al -Produktionsrate gegen die präatmosphärische Tiefe. Die berechneten Werte sind durch Punkte, der gemessene Wert als waagerechte Linie mit Fehlern (strichliert) eingetragen.

Die ^{26}Al -Aktivität vermag den Meteoroiden-Radius nicht weiter einzuschränken. Die präatmosphärische Tiefe beträgt zwischen 0 und 7 cm.

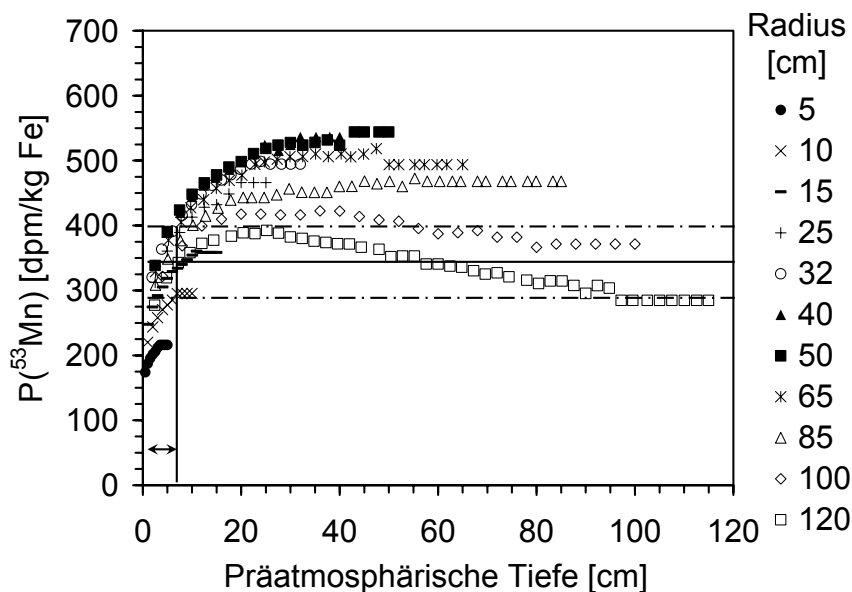


Abbildung 4.77: ^{53}Mn -Produktionsrate gegen die präatmosphärische Tiefe. Die berechneten Werte sind durch Punkte, der gemessene Wert als waagerechte Linie mit Fehlern (strichliert) eingetragen.

Die gemessene ^{53}Mn -Aktivität ist ebenfalls mit einem präatmosphärischen Radius von 25 cm bis 50 cm zu erklären. Die Abschirmtiefe beträgt dann 0 cm bis 7 cm.

Zusammenfassend kann ein Meteoriten-Radius zwischen 25 und 50 cm angegeben werden, wobei die Probe in einer Abschirmtiefe zwischen 0 und 7 cm unter der präatmosphärischen Oberfläche lag. Das Bestrahlungsalter von Naragh beträgt $(13,7 \pm 1,5)$ Ma. Diese Daten sind hier erstmals bestimmt worden.

Neuschwanstein

Die Radionuklid- und Edelgaskonzentrationen des am 06.04.2002 in Bayern gefallenen EL-Chondriten Neuschwanstein sind in Tabelle 4.20 zusammengestellt. Für die Modellrechnungen wurde die Bulkanalyse aus [ZIP03] herangezogen, für die C-Konzentration wurde der mittlere Wert für EL-Chondrite verwendet [LOD98a]. Die Auswertung geht wiederum vom Bernplot aus (Abbildung 4.78).

Tabelle 4.19: Konzentrationen kosmogener Nuklide, Edelgase aus [SCH03c].

Neuschwanstein	
^{10}Be	$(19,5 \pm 1,6)$ dpm/kg
^{26}Al	$(59,9 \pm 5,0)$ dpm/kg
^{53}Mn	(563 ± 73) dpm/kg Fe
^3He	$(68,71 \pm 3,44) \cdot 10^{-8}$ cm $^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{21}Ne	$(14,337 \pm 0,717) \cdot 10^{-8}$ cm $^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{22}Ne	$(16,523 \pm 0,826) \cdot 10^{-8}$ cm $^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{36}Ar	$(256,9 \pm 13,3) \cdot 10^{-8}$ cm $^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP
^{38}Ar	$(49,7 \pm 2,5) \cdot 10^{-8}$ cm $^3 \cdot \text{g}^{-1}$ STP

Die hier angegebenen Radionukliddaten sind erstmalig gemessen worden.

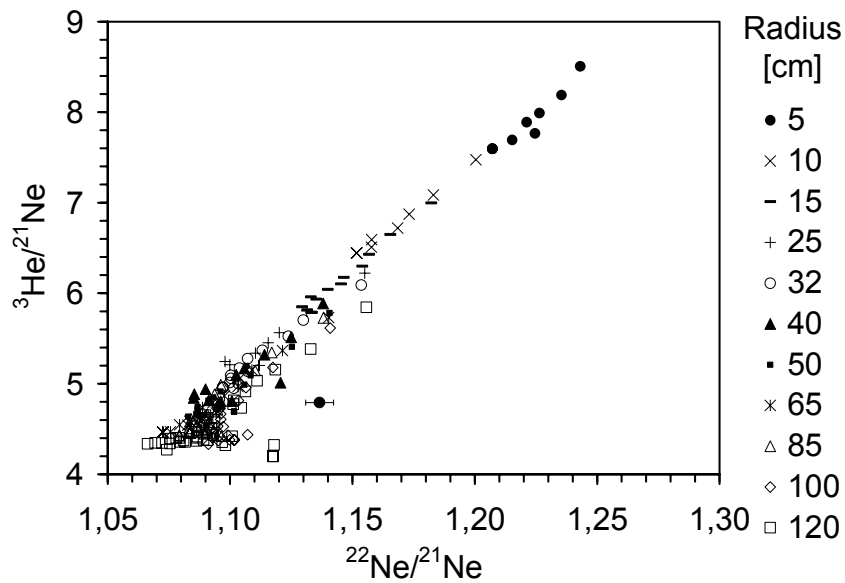


Abbildung 4.78: Bernplot für Neuschwanstein, das Messergebnis ist als Punkt mit Fehlern eingezeichnet, die Punkteschar sind die berechneten Werte.

Das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis ist etwas höher als die berechneten Werte (Abbildung 4.78). Wegen der größeren Streuung der Punkte der berechneten Bern-Linie im Bereich des Messpunktes und weil im Rahmen eines 3 %igen Fehlers der Messwert auf der Bernlinie zu liegen kommt, wird jedoch auf eine Korrektur verzichtet. Damit sollte das ^3He -Bestrahlungsalter etwas kleiner sein als das ^{21}Ne -Alter, im Rahmen der Fehler jedoch übereinstimmen.

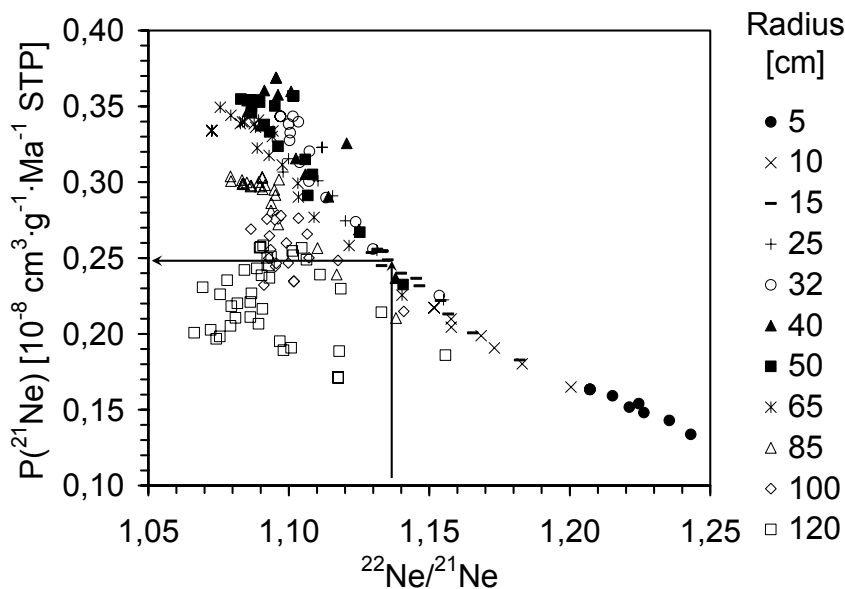


Abbildung 4.79: Produktionsrate von ^{21}Ne gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die Punkte sind berechnete Werte, entlang der Pfeile wurde die ^{21}Ne -Produktionsrate abgelesen.

Aus Abbildung 4.79 ergibt sich die Produktionsrate von ^{21}Ne zu $P_{21} = (0,248 \pm 0,022) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$, was bei der gemessenen ^{21}Ne -Konzentration (Tabelle 4.19) zu einem ^{21}Ne -Bestrahlungsalter von $(58 \pm 6) \text{ Ma}$ führt.

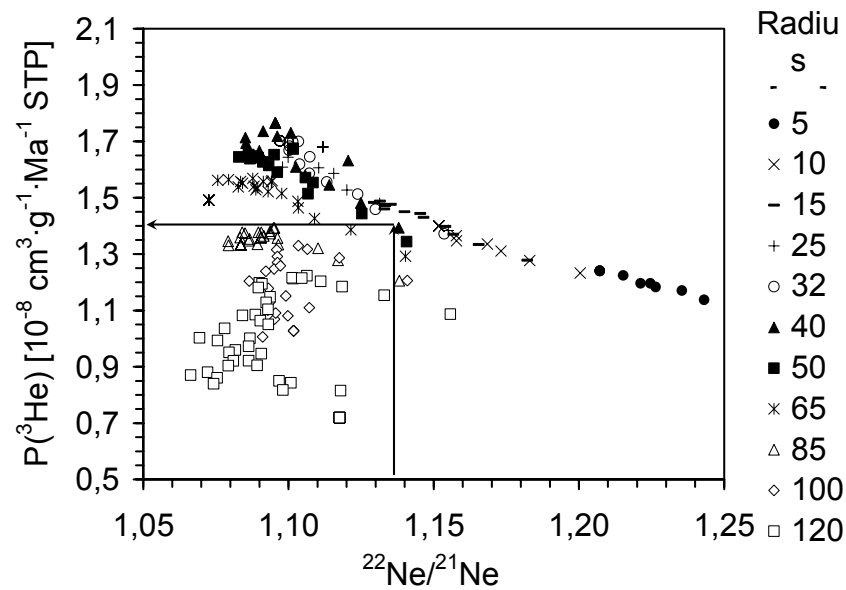


Abbildung 4.80: Produktionsrate von ^3He gegen das $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis. Die Punkte sind berechnete Werte, entlang der Pfeile wurde die ^3He -Produktionsrate abgelesen.

Die Produktionsrate von ^3He ist: $P_3 = (1,38 \pm 0,12) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{Ma}^{-1} \text{ STP}$ (Abbildung 4.80). Damit errechnet sich ein Bestrahlungsalter von $T_3 = (50 \pm 5) \text{ Ma}$, welches im Rahmen der Fehler mit dem ^{21}Ne -Alter übereinstimmt. Das Bestrahlungsalter des Meteoriten Neuschwanstein kann somit aus dem Mittelwert beider Alter zu $(54 \pm 4) \text{ Ma}$ berechnet werden.

Mit diesem Bestrahlungsalter sind die ebenfalls analysierten Radionuklide ^{10}Be , ^{26}Al und ^{53}Mn in Sättigung. Mit den Radionukliden kann also eine Radiusabschätzung vorgenommen werden.

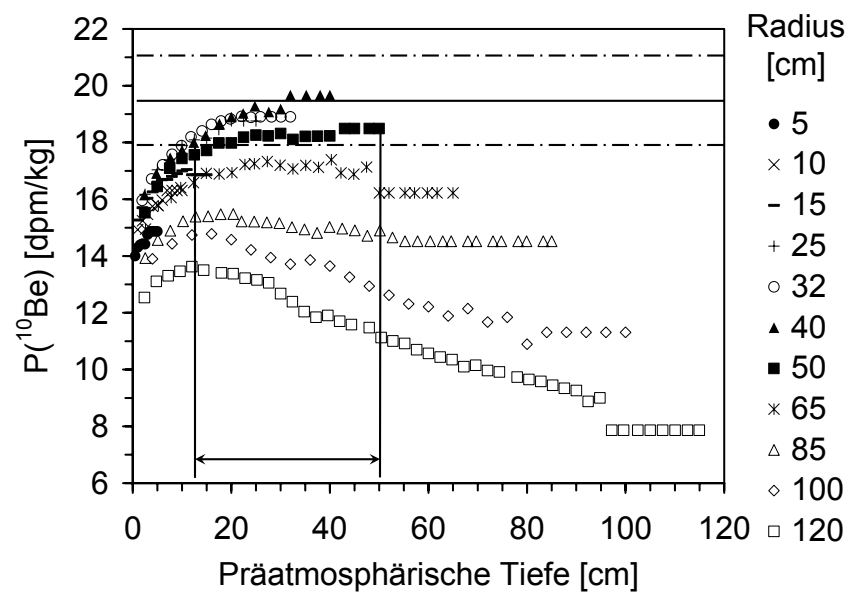


Abbildung 4.81: ^{10}Be -Produktionsrate gegen die präatmosphärische Tiefe der Probe, berechnet für verschiedene Meteoroiden-Radien (Punkte).

Die gemessene ^{10}Be -Aktivität kann im Rahmen der Fehler nur in einem Meteoroiden mit einem Radius von 25-50 cm in einer präatmosphärischen Tiefe von mehr als 13 cm produziert werden.

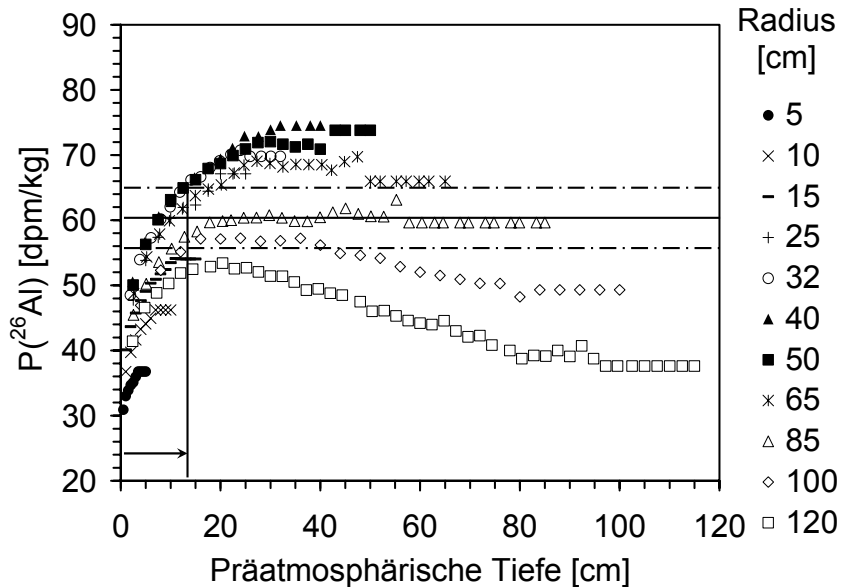


Abbildung 4.82: ^{26}Al -Produktionsrate gegen die präatmosphärische Tiefe der Probe, berechnet für verschiedene Meteoroiden-Radien (Punkte). Die schwarze Linie repräsentiert den Messwert, Fehler strichliert.

Die gemessene ^{26}Al -Aktivität ist in einem Meteoroid von 25-50 cm Radius (Abbildung 4.82) nur mit einer maximalen präatmosphärischen Tiefe von 13 cm verträglich (Abbildung 4.82).

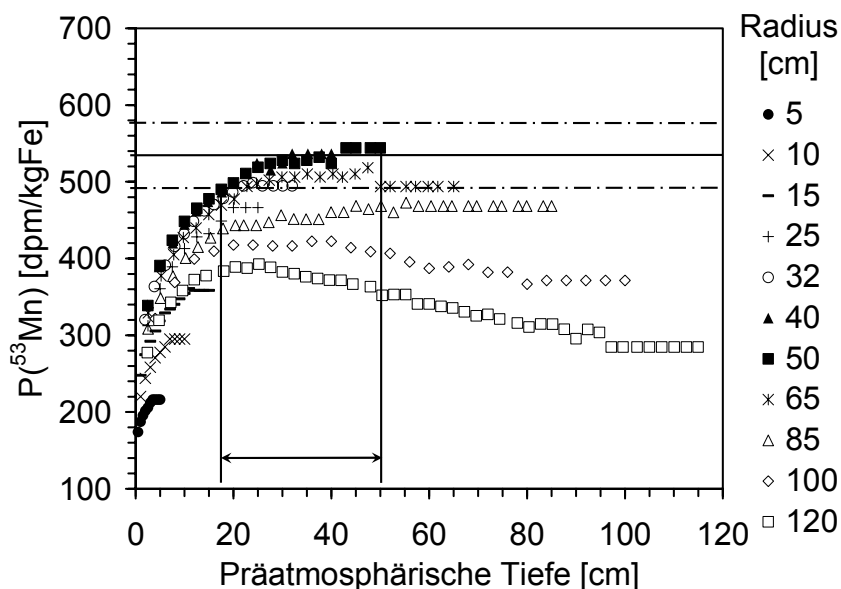


Abbildung 4.83: Dieselbe Auftragung wie in Abbildung 4.81 und 4.82, hier für ^{53}Mn .

Die ^{53}Mn -Aktivität schließt für Körper mit einem Radius zwischen 25 cm und 50 cm präatmosphärische Tiefen aus, die kleiner als 17 cm sind (Abbildung 4.83). Andererseits schließt die ^{26}Al -Aktivität im Rahmen eines relativen Fehlers im Modell

von 9 % Tiefen aus, die größer als 15 cm sind (Abbildung 4.82). Damit begrenzt sich die Tiefe, mit der alle gemessenen Aktivitäten konsistent diskutierbar sind, auf etwa 15 cm, der Radius des Meteoroids kann auf 25-50 cm eingegrenzt werden.

Damit kann zusammenfassend gesagt werden, dass das Bestrahlungsalter von Neuschwanstein (54 ± 4) Ma beträgt, der Meteoroid eine Größe von 25-50 cm hatte und dass sich die analysierte Probe in einer präatmosphärischen Tiefe von etwa 15 cm befunden hat.

4.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse für Chondrite

Im Rahmen dieser Arbeit wurden vier Chondrite untersucht: drei H-Chondrite (Morávka, Naragh und Neuschwanstein) und ein EL-Chondrit (Neuschwanstein). Der Meteorit Neuschwanstein hat mit (54 ± 4) Ma das höchste Bestrahlungsalter und damit ein für Enstatit-Chondrite ungewöhnlich hohes Alter: In der Verteilung der Bestrahlungsalter von Enstatit-Chondriten gibt es Häufungen bei 3,5, 8 und 25 Ma, Bestrahlungsalter mit mehr als 60 Ma fehlen bisher völlig [PAT02].

Die H-Chondrite haben deutlich geringere Bestrahlungsalter von ($7,4 \pm 0,7$) Ma (Morávka) und ($13,7 \pm 1,5$) Ma (Naragh). Morávka liegt damit in der für H-Chondrite beobachteten Häufung von Bestrahlungsaltern (4 Ma - 10 Ma [MAR92]), Naragh liegt etwas darüber in einem Minimum bisher beobachteter Bestrahlungsalter.

Das ermittelte Bestrahlungsalter $T_{\text{exp}} = (9,9 \pm 1,3)$ Ma des Meteoriten Grüneberg ist, verglichen mit dem ^{36}Cl - ^{36}Ar -Alter ($(7,54 \pm 0,24)$ Ma [GRA01]), etwas zu hoch, was auf SCR-Effekte zurückzuführen ist. Die Überproduktion von ^{10}Be , ^{26}Al und ^{53}Mn in Grüneberg konnte im Rahmen dieser Arbeit erstmals gezeigt werden.

Die detaillierte Analyse der kosmogenen Nuklide in Morávka ergab ein sehr kleines $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis, was bei komplexen Bestrahlungsgeschichten häufig beobachtet wird (vergleiche [WEL01], [MAS01]). Da jedoch auf eine komplexe Bestrahlungsgeschichte keinerlei Hinweise bei den übrigen kosmogenen Nukliden, insbesondere den Radionukliden zu finden war, wird eher von einem ^3He -Verlust ausgegangen, was auf eine Erwärmung durch Annäherung an die Sonne hindeuten könnte.

Eine Übersicht über die wichtigsten Daten liefert Tabelle 4.21.

Tabelle 4.21: Messergebnisse der untersuchten Chondrite

Meteorit	Klasse	$T_{\text{exp}} = T_{\text{ej}}^*$ [Ma]	Radius [cm]	Abschirmtiefe [cm]
Grüneberg	H4	$10 \pm 1,3$	- (10 cm)**	-
Morávka	H5	$7,4 \pm 0,5$	40	Morávka 1: 20-40 Morávka 2: 5-13
Naragh	H6	$13,7 \pm 1,5$	15	> 8
Neuschwanstein	EL	54 ± 4	25-50	15-20

* Das terrestrische Alter ist vernachlässigbar, da es sich um einen Fall (Grüneberg) bzw. Wüstenmeteorite handelt [FOL00].

** Aus Edelgasdaten, die Radionuklide zeigen Überproduktion durch SCR

4.2 Experimentell bestimmte Produktionsraten

Es wurden experimentelle Produktionsraten für die Radionuklide ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca und ^{60}Fe aus $^{\text{nat}}\text{Ni}$ und $^{\text{nat}}\text{Fe}$ -Targets bestimmt. Die gewonnenen Daten sind wesentliche Bestandteile für die Erweiterung eines physikalischen Modells in Bezug auf Eisen-Meteorite. Außerdem ist es möglich durch eine Entfaltung der experimentell bestimmten Produktionsraten Wirkungsquerschnitte für Neutronen zu berechnen, da die Produktion von Radionukliden in dicken Targets gut durch eine Produktion durch primäre Protonen, sekundäre Protonen und sekundäre Neutronen beschreibbar ist.

Eine eingehende Beschreibung der Prozedur zur Entfaltung der Neutronen-Anregungsfunktionen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Details dieses Verfahrens sind in der Dissertation von Leya [LEY97] und in Leya et al. [LEY98] zu finden. Hier soll lediglich kurz auf das Prinzip eingegangen werden. Sind Wirkungsquerschnitte für Protonen-Induzierte Reaktionen bekannt, so lässt sich die Summe der Produktion durch primäre Protonen und sekundäre Protonen berechnen. Die dazu erforderliche Kenntnis des Protonen-Spektrums in jeder Tiefe des dicken Targets lässt sich zuverlässig durch Monte-Carlo-Codes erhalten (z.B. implementiert im HERMES-Programmsystem [CLO88], [FIL92]). Durch die Kenntnis der Protonen-Anregungsfunktionen ist damit der durch primäre und sekundäre Protonen produzierte Anteil eines Radionuklids direkt zugänglich.

Bei der Analyse von Targetfolien findet man nach Protonenbestrahlung höhere Konzentrationen, als durch Protonen-Induzierte Reaktionen zustande kommen können. Dieser zusätzlich produzierte Anteil eines Radionuklids kann Reaktionen mit sekundären Neutronen zugeschrieben werden. Sind durch die Anwendung von Transportcodes das Neutronenspektrum in einer bestimmten Tiefe des dicken Targets und die Produktionsrate durch sekundäre Neutronen bekannt, so lässt sich eine Neutronen-Anregungsfunktion entfalten. Dazu geht man zunächst von Neutronen-Anregungsfunktionen aus, die sich z.B. mit dem Programmcode AREL (in einer erweiterten Form von Gloris [GLO98]) berechnen lassen. Diese a-priori Neutronen-Anregungsfunktionen werden dann unter Berücksichtigung aller gemessenen Produktionsraten in verschiedenen Tiefen mit Hilfe des Codes STAY'SL [PER77], [LEY97] nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate angepasst. Dadurch erhält man dann an experimentelle Daten angepasste a posteriori Neutronen-Anregungsfunktionen.

Um die Aufteilung der Gesamt-Nuklidproduktion nach dem Anteil einzelner Teilchenarten (primäre und sekundäre Protonen sowie sekundäre Neutronen) und eine Entfaltung der zugrunde liegenden Neutronen-Anregungsfunktionen durchführen zu können, sind demnach folgende Schritte notwendig:

1. Messung eines Tiefenprofils der Produktionsrate eines Nuklids im Modellmeteoroiden (bestrahlt mit 1,6 GeV-Protonen).
2. Berechnung der Teilchenspektren von 0 bis 1,6 GeV (Energie der primären Protonen) der primären Protonen, sekundären Protonen und sekundären Neutronen für alle Tiefen mit Hilfe von Hochenergie-Transfer-Codes (z.B. LAHET [PRA89], HETC [ARM72] oder HERMES [CLO88]).
3. Berechnung des Anteils der primären und sekundären Protonen an der Nuklidproduktion mit Hilfe experimentell bestimmter Protonen-Anregungsfunktionen.
4. Berechnung des Anteils der sekundären Neutronen an der Produktionsrate (das ist die Differenz zwischen experimentell bestimmter Produktionsrate und dem durch primäre und sekundäre Protonen produzierten Anteil).
5. Berechnung einer a priori Neutronen-Anregungsfunktion mittels des Rechencodes AREL [GLO98].
6. Berechnung einer an alle verfügbaren Neutronen-Produktionsraten angepassten Neutronen-Anregungsfunktion (a posteriori Neutronen-Anregungsfunktion) mittels des Codes STAY'SL unter Verwendung der a priori Neutronen-Anregungsfunktionen als Eingabeparameter.

Durch die realistischen Bestrahlungsbedingungen des Modellmeteoroiden lassen sich die Ergebnisse sehr einfach auf reale Meteoroiden übertragen: es muss lediglich die Flusssdichte der Projektilteilchen angepasst werden [LEY00b]. Verschiedene Meteoroidenradien gehen bei bekannten Anregungsfunktionen lediglich als Parameter in die Rechnungen ein [LEY97].

Zudem sind Anregungsfunktionen im untersuchten Energiebereich wichtig für viele nukleare Anwendungen. In Beschleunigergestützten Systemen (ADS: **A**ccelerator **D**riven **S**ystems) zur Vernichtung nuklearen Abfalls (Nuclear Waste Transmutation) und zur Energieerzeugung (Energy-Amplifier), sowie in Spallations-Neutronenquellen stellen Nickel und Eisen wichtige Konstruktionsmaterialien dar. Deren Aktivierung beim Betrieb der Anlagen ist zu berücksichtigen und zu quantifizieren. Die auf oben angesprochenem Wege erhaltenen Neutronen-Anregungsfunktionen erlauben den zurzeit einzigen experimentellen Zugang zu Anregungsfunktionen von Neutronen-Induzierten Kernreaktionen mit Energien bis zu einigen GeV. Ansonsten muss bei hohen n-Energien ($E_n > 180$ MeV) auf Modellrechnungen zurückgegriffen werden (vergleiche zu der Problematik z.B. [GLA02], [MIC99]).

Somit stellen die folgenden Daten einen Beitrag zur experimentellen Bestimmung von Neutronen-Anregungsfunktionen dar. Die im Rahmen dieser Arbeit experimentell bestimmten Produktionsraten, der Anteil primärer und sekundärer Protonen sowie sekundärer Neutronen, die dazu verwendeten Protonen-Anregungsfunktionen, sowie die entfalteten Neutronen-Anregungsfunktionen werden im folgenden Kapitel zusammengestellt. Eine tabellarische Zusammenfassung der gemessenen Daten findet sich in Anhang B.

4.2.1 Eisen-Targets

^{10}Be aus Eisen

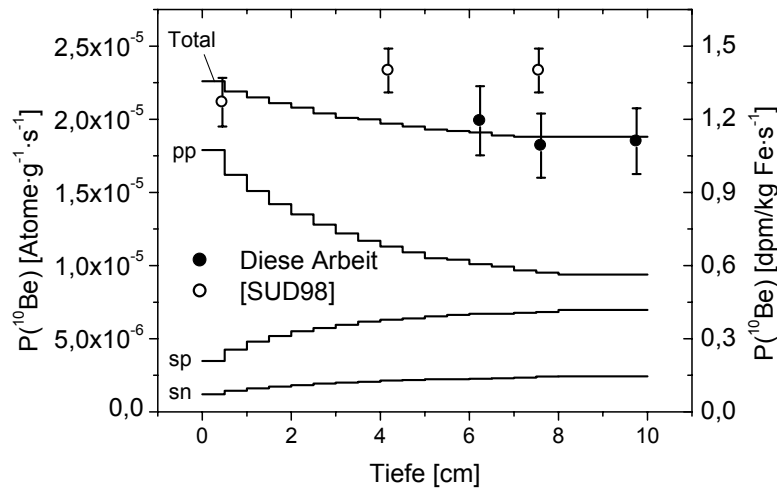


Abbildung 4.84: ^{10}Be -Produktionsrate aus $^{\text{nat}}\text{Fe}$ -Targetfolien gegen die Tiefe der Targetfolien. Die Punkte stellen dabei die gemessenen Produktionsraten dar. Alle Daten sind auf $1 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ normiert. Die mit pp, sp und sn markierten Linien sind die Anteile der Erzeugung durch primäre Protonen (pp), sekundäre Protonen (sp) und sekundäre Neutronen (sn). Die mit Total markierte Linie ist die Summe der Erzeugung durch pp, sp und sn. Berechnungen durch I. Leya [LEY03].

Abbildung 4.84 zeigt eine für ein Hochenergieprodukt typische Verteilung der Produktion: an der Oberfläche haben die Primärteilchen (pp) eine hohe Energie und tragen überwiegend zur Produktion von ^{10}Be bei, mit der Abnahme der Energie der primären Protonen sinkt die Produktion durch sie. Sekundäre Protonen und Neutronen werden im Modellmeteoroid gebildet. Sie tragen mit der Tiefe immer mehr, insgesamt aber nur maximal 15 % zur Produktion bei, wobei der Verlauf des Anteils der Sekundärteilchen an der Gesamtproduktion eine ähnliche Tiefenabhängigkeit zeigt.

Aus den hier gemessenen ^{10}Be -Produktionsraten konnte erstmalig die Anregungsfunktion der Kernreaktion $^{\text{nat}}\text{Fe}(n,x)^{10}\text{Be}$ bis zu einer Neutronen-Energie von 1,6 GeV entfaltet werden (Entfaltung durch I. Leya [LEY03]), wobei die dazu notwendigen Protonen-Anregungsfunktionen in früheren Arbeiten gemessen wurden (Abbildung 4.85).

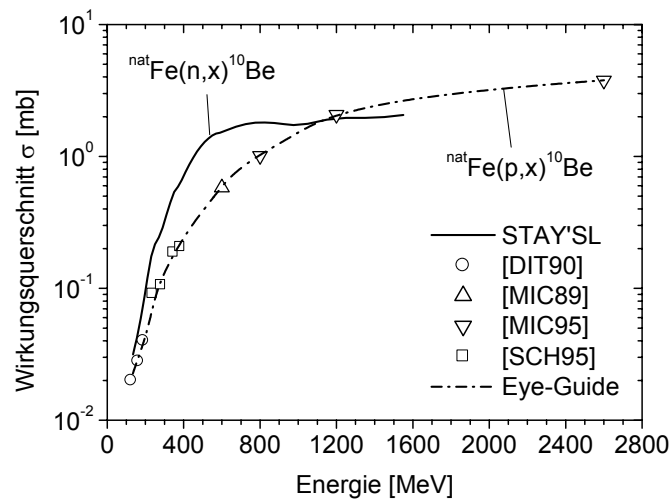


Abbildung 4.85: Wirkungsquerschnitte gegen die Teilchenenergie. Eingezeichnet ist die für die Produktionsraten-Berechnungen zugrunde gelegte, experimentell bestimmte Protonen-Anregungsfunktion der Reaktion ${}^{\text{nat}}\text{Fe}(p,x){}^{10}\text{Be}$ sowie die von I. Leya [LEY03] aus den experimentellen Gesamtproduktionsraten mit Hilfe des Codes STAY'SL entfaltete Anregungsfunktion der Reaktion ${}^{\text{nat}}\text{Fe}(n,x){}^{10}\text{Be}$.

${}^{26}\text{Al}$ aus Eisen

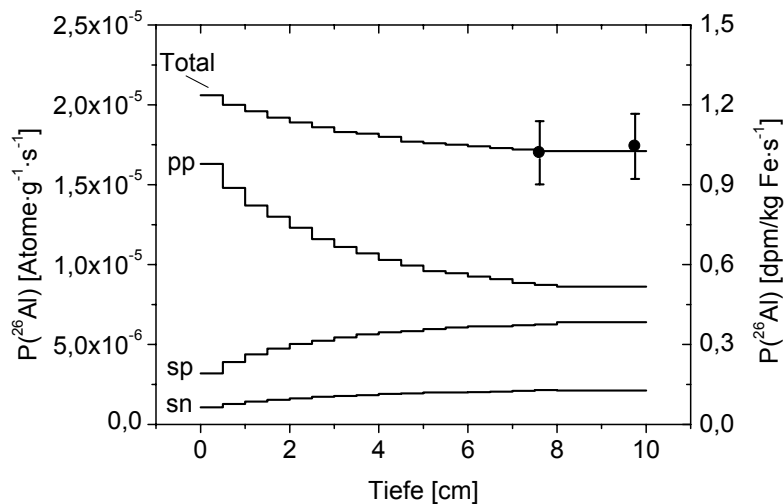


Abbildung 4.86: Darstellung der einzelnen Beiträge der primären (pp) und sekundären Protonen (sp) und sekundären Neutronen (sn) zur gesamt- ${}^{26}\text{Al}$ -Produktion (Total) aus Fe als Funktion der Tiefe. Berechnung von I. Leya [LEY03]. Die beiden Messpunkte wurden im Rahmen dieser Arbeit ermittelt, an diese wurden die Produktionsraten angepasst.

Der Hauptanteil der Produktion wird durch hochenergetische primäre Protonen verursacht (Hochenergieprodukt). Der Anteil der Neutronen an der ${}^{26}\text{Al}$ -Produktion ist gering ($\approx 15\%$). Der Verlauf und die Höhe der Gesamt-Produktionsrate und der Anteile primärer und sekundärer Teilchen sind insgesamt vergleichbar mit dem Verlauf der ${}^{10}\text{Be}$ -Produktion aus ${}^{\text{nat}}\text{Fe}$. Der in dieser Arbeit gefundene Tiefenverlauf gleicht

dem aus [RÖS94], der tiefenabhängige Produktionsraten von ^{26}Al aus $^{\text{nat}}\text{Fe}$ in einer Gabbro-Kugel bestimmt hat.

Aus den experimentell bestimmten Produktionsraten konnte unter Berücksichtigung früher gemessener Protonen-Anregungsfunktionen erstmalig eine Anregungsfunktion der Reaktion $^{\text{nat}}\text{Fe}(n,x)^{26}\text{Al}$ bis zu Neutronenenergien von 1,6 GeV entfaltet werden (Durchführung der Entfaltung durch I. Leya [LEY03], Abbildung 4.87).

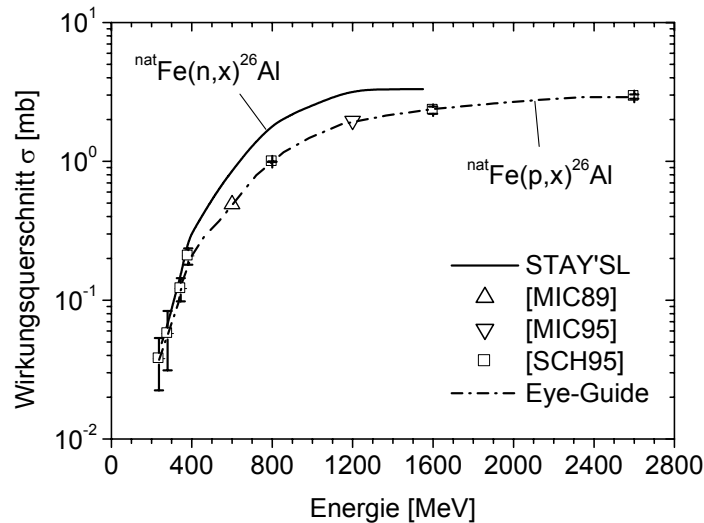


Abbildung 4.87: Anregungsfunktionen der Kernreaktionen $^{\text{nat}}\text{Fe}(n,x)^{26}\text{Al}$ und $^{\text{nat}}\text{Fe}(p,x)^{26}\text{Al}$. Letztere wurde zur Berechnung der Anteile primärer und sekundärer Protonen der Produktionsrate herangezogen. Die Neutronen-Anregungsfunktion wurde mit Hilfe des Codes STAY'SL aus den gemessenen Gesamtproduktionsraten entfaltet [LEY03].

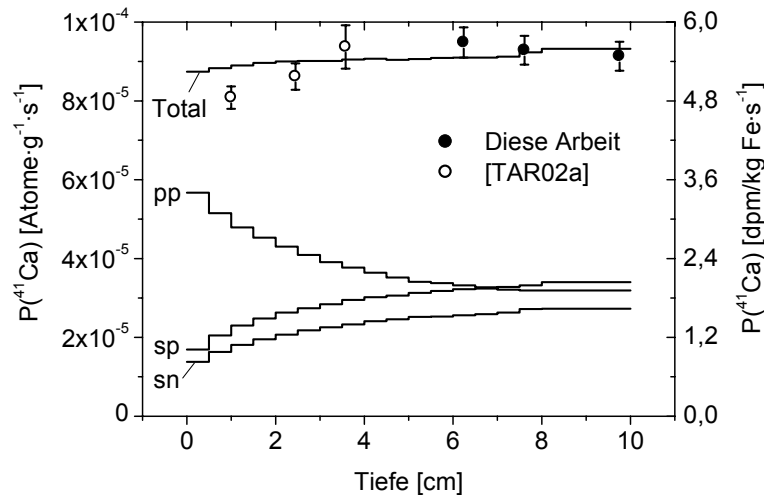
^{41}Ca aus Eisen

Abbildung 4.88: Produktionsrate von ^{41}Ca aus $^{\text{nat}}\text{Fe}$ in Abhängigkeit von der Tiefe der Probe. Die experimentelle Bestimmung der Produktionsraten erfolgte im Rahmen dieser Arbeit sowie von Tarabishi und Schnabel [TAR02]. Die Berechnung der einzelnen Anteile primärer und sekundärer Protonen sowie sekundärer Neutronen an den Produktionsraten erfolgte durch I. Leya [LEY03].

Die Produktionsrate von ^{41}Ca aus $^{\text{nat}}\text{Fe}$ (Abbildung 4.88) liegt insgesamt um etwa den Faktor 5 höher als die der Bildung von ^{10}Be und ^{26}Al aus $^{\text{nat}}\text{Fe}$. Sie ist in der gesamten Kugel in etwa gleich hoch, da ^{41}Ca ein Mittelenergieprodukt ist. Der Anteil der Neutronen an der Gesamtproduktion ist nahe dem Zentrum der Kugel etwa halb so hoch wie der Anteil aller Protonen. Der Verlauf des Anteils sekundärer Protonen und Neutronen verläuft über die gesamte Tiefe etwa parallel.

Aus den experimentellen Daten wurde durch I. Leya [LEY03] die Anregungsfunktion der Reaktion $^{\text{nat}}\text{Fe}(n,x)^{41}\text{Ca}$ unter Berücksichtigung der früher gemessenen Anregungsfunktion $^{\text{nat}}\text{Fe}(p,x)^{41}\text{Ca}$ entfaltet. Beide Anregungsfunktionen sind in Abbildung 4.89 zusammengestellt. Sie zeigen einen ähnlichen Verlauf und liegen insgesamt etwa um den Faktor 10 höher als die Anregungsfunktionen zur ^{10}Be und ^{26}Al -Produktion (vergleiche Abbildungen 4.87 und 4.85). Das lässt sich dadurch erklären, dass insgesamt weniger Komplexeilchen emittiert werden als dies für die ^{10}Be und ^{26}Al -Bildung erforderlich ist.

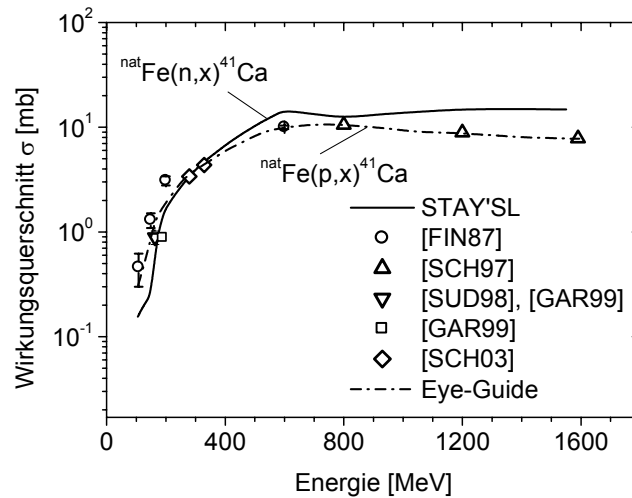


Abbildung 4.89 Aus den Gesamtproduktionsraten entfaltete Anregungsfunktion der ${}^{\text{nat}}\text{Fe}(n,x){}^{41}\text{Ca}$ -Reaktion, sowie die der Berechnung des Protonenanteils zugrunde liegende Anregungsfunktion der Reaktion ${}^{\text{nat}}\text{Fe}(p,x){}^{41}\text{Ca}$. Entfaltung durch I. Leya [LEY03] unter Verwendung des Codes STAY'SL.

4.2.2 Nickel-Targets

${}^{10}\text{Be}$ aus Nickel

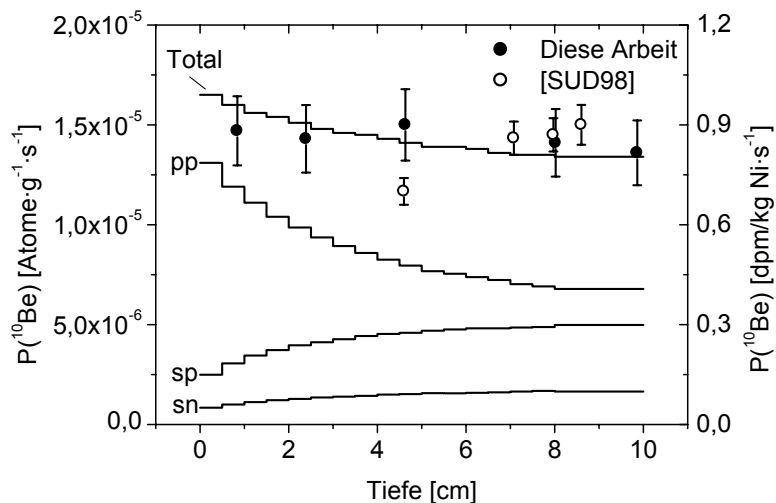


Abbildung 4.90: ${}^{10}\text{Be}$ -Produktionsrate aus Ni gegen die Tiefe der Probe. Die Punkte sind im Rahmen dieser Arbeit bzw. von Sudbrock [SUD98] gemessene Daten. Berechnungen der Anteile der primären und sekundären Protonen sowie sekundärer Neutronen durch I. Leya [LEY03].

Bis auf die Produktionsrate von Sudbrock [SUD98] bei 4,5 cm Tiefe stimmen alle experimentellen Daten im Rahmen der Fehler überein (Abbildung 4.90). Der in dieser Arbeit gefundene Tiefenverlauf gleicht dem aus [RÖS94], der Produktionsraten von ${}^{10}\text{Be}$ aus ${}^{\text{nat}}\text{Ni}$ in einer Gabbro-Kugel bestimmt hat. Der Hauptanteil der ${}^{10}\text{Be}$ -

Produktion in ^{nat}Ni kommt wie beim ^{nat}Fe -Target (Abbildung 4.84), von hochenergetischen Protonen (Hochenergieprodukt). Der Verlauf und die Höhe der Produktionsrate entsprechen dem Verlauf der Produktion aus ^{nat}Fe . Der Anteil der Neutronen an der Produktion ist gering. Insgesamt liegt die Produktion von ^{10}Be aus ^{nat}Ni um etwa 25 % niedriger als die Produktion aus ^{nat}Fe .

Unter Verwendung aller hier zusammengestellten experimentellen Produktionsraten und der zuvor von verschiedenen Autoren gemessenen Protonenanregungsfunktion war eine Entfaltung der Anregungsfunktion für die Reaktion $^{nat}\text{Ni}(n,x)^{10}\text{Be}$ möglich (Abbildung 4.91). Diese Anregungsfunktion ist hier erstmalig dargestellt.

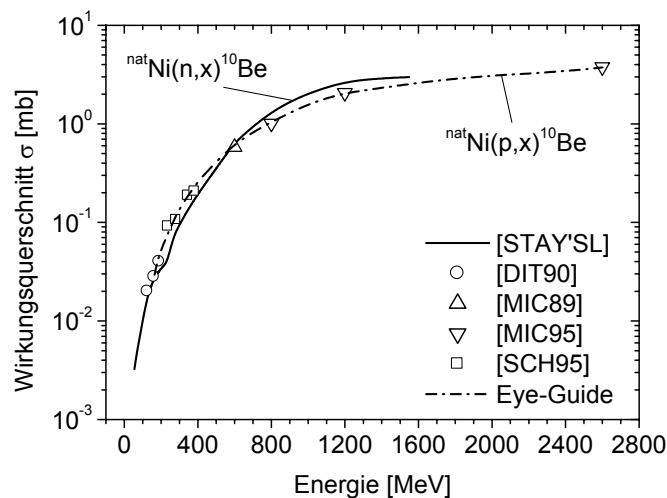


Abbildung 4.91: Aus den gemessenen Produktionsraten von Abbildung 4.90 entfaltete Anregungsfunktion der Reaktion $^{nat}\text{Ni}(n,x)^{10}\text{Be}$ und die zur Bestimmung des Protonenanteils experimentell bestimmte Anregungsfunktion der Reaktion $^{nat}\text{Ni}(p,x)^{10}\text{Be}$. Entfaltung der Neutronen-Anregungsfunktion durch I. Leya [LEY03] unter Verwendung des Codes STAY'SL.

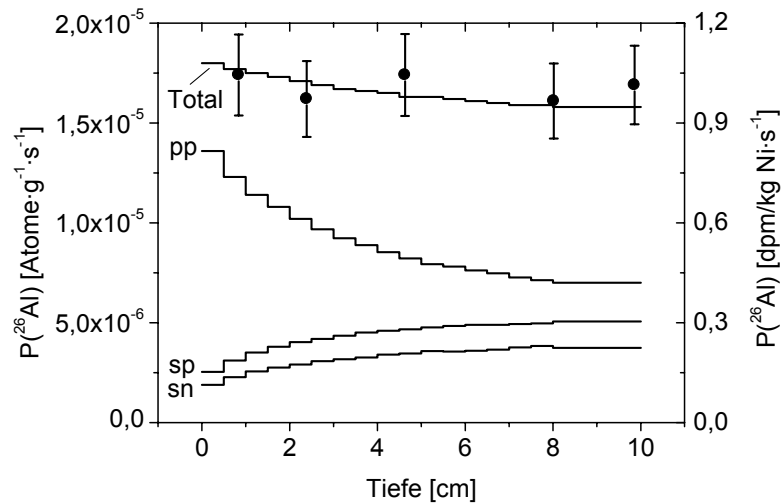
^{26}Al aus Nickel

Abbildung 4.92: Produktionsrate von ^{26}Al aus $^{\text{nat}}\text{Ni}$ in Abhängigkeit von der Tiefe der Probe. Messung der Punkte im Rahmen dieser Arbeit, Berechnung des pp-, sp- und sn-Anteils durch I. Leya [LEY03].

Der Hauptanteil der Produktion von ^{26}Al , liegt ähnlich wie die von ^{10}Be überwiegend bei Reaktionen mit hochenergetischen Protonen. Insgesamt zeigt die Produktionsrate von ^{26}Al aus $^{\text{nat}}\text{Ni}$ einen ähnlichen Verlauf wie die aus $^{\text{nat}}\text{Fe}$, liegt jedoch um ca. 15 % niedriger. Gegenüber der ^{10}Be -Produktionsrate aus $^{\text{nat}}\text{Ni}$ aber ist die ^{26}Al -Produktionsrate aus $^{\text{nat}}\text{Ni}$ etwa 5 % höher. Der in dieser Arbeit gefundene Tiefenverlauf gleicht dem aus [RÖS94], der Produktionsraten von ^{26}Al aus $^{\text{nat}}\text{Ni}$ in einer Gabbro-Kugel bestimmt hat.

Abbildung 4.93 stellt die entfaltete Anregungsfunktion der Reaktion $^{\text{nat}}\text{Ni}(n,x)^{26}\text{Al}$ dar. Darüber hinaus ist die zur Entfaltung zugrunde gelegte Anregungsfunktion der Reaktion $^{\text{nat}}\text{Ni}(p,x)^{26}\text{Al}$ dargestellt. Für diese Reaktion waren nur wenige experimentell bestimmte Daten vorhanden [LEY03]. Daher wurde von Leya eine Anpassung an diese Daten nach dem Verfahren von Silberberg et al. [SIL89] zugrunde gelegt [LEY03]. Ab einer Energie von 800 MeV liegt die Neutronenanregungsfunktion um etwa den Faktor 8 höher als die der Protonen-Anregungsfunktion. Die Ursache dafür ist der höhere Anteil sekundärer Neutronen an der Gesamt-Produktionsrate im Vergleich zur ^{10}Be -Produktion.

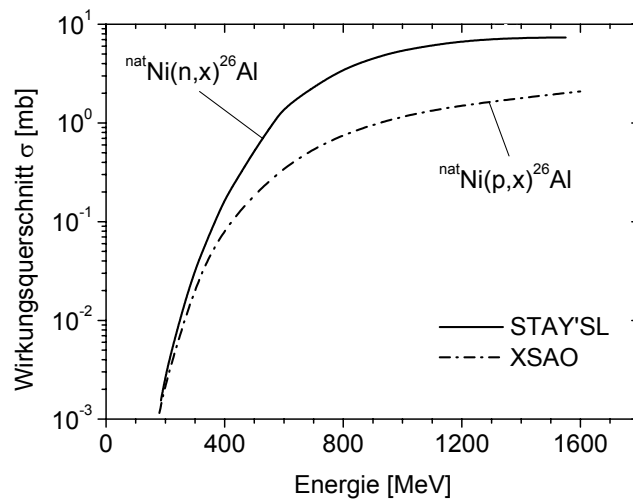


Abbildung 4.93: Anregungsfunktionen der Reaktion $^{nat}\text{Ni}(n,x)^{26}\text{Al}$ und der Reaktion $^{nat}\text{Ni}(p,x)^{26}\text{Al}$. Mit Hilfe der hier abgebildeten Protonen-Anregungsfunktion wurde der Anteil der Protonen an der Gesamtproduktionsrate bestimmt. Die Entfaltung der Neutronen-Anregungsfunktion erfolgte durch I. Leya unter Verwendung des Codes STAY'SL [LEY03]. Für die Protonen-Anregungsfunktion lagen nur wenige experimentelle Daten für Wirkungsquerschnitte der Reaktion $^{nat}\text{Ni}(p,x)^{26}\text{Al}$ vor. Daher wurde eine Anpassung an diese nach Silberberg et al. [SIL89] zur Berechnung des Protonenanteils der ^{26}Al -Produktionsrate zugrunde gelegt. Anpassung durch I. Leya [LEY03].

^{41}Ca aus Nickel

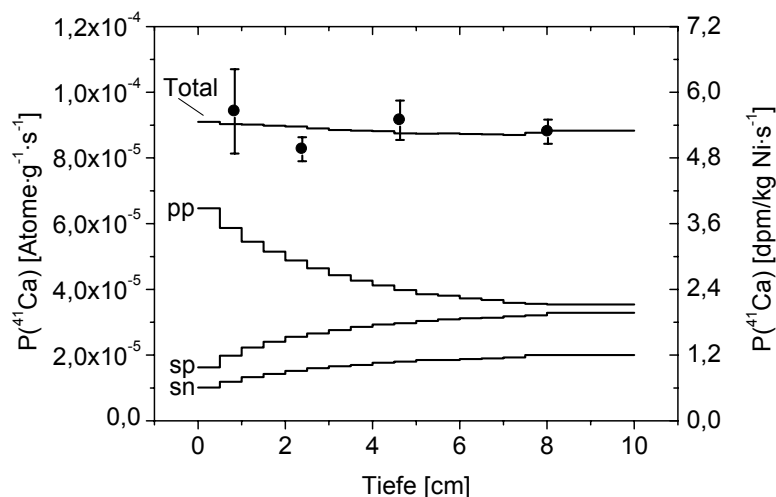


Abbildung 4.94: Produktionsrate von ^{41}Ca aus ^{nat}Ni in Abhängigkeit von der Tiefe der Probe. Die experimentelle Bestimmung der Produktionsraten erfolgte im Rahmen dieser Arbeit. Die Berechnung der einzelnen Anteile primärer und sekundärer Protonen sowie sekundärer Neutronen an den Produktionsraten erfolgte durch I. Leya [LEY03].

Die Produktionsrate von ^{41}Ca aus $^{\text{nat}}\text{Ni}$ liegt insgesamt um etwa den Faktor 5 höher als die der Bildung von ^{10}Be und ^{26}Al aus $^{\text{nat}}\text{Ni}$ (vergleiche Abbildungen 4.90 und 4.92 mit Abbildung 4.94). Außerdem ist sie in der gesamten Kugel in etwa gleich hoch (Mittelenergieprodukt).

Die aus den experimentellen Daten entfaltete Anregungsfunktion der Reaktion $^{\text{nat}}\text{Ni}(n,x)^{41}\text{Ca}$ (Abbildung 4.95) ist daher etwa um eine Größenordnung höher als die Anregungsfunktion der Neutronen-Induzierten Bildung von ^{10}Be und ^{26}Al . Die zur Entfaltung erforderliche Anregungsfunktion der Reaktion $^{\text{nat}}\text{Ni}(p,x)^{41}\text{Ca}$ ist früheren bzw. aktuellen Arbeiten entnommen [FIN87], [SCH03a].

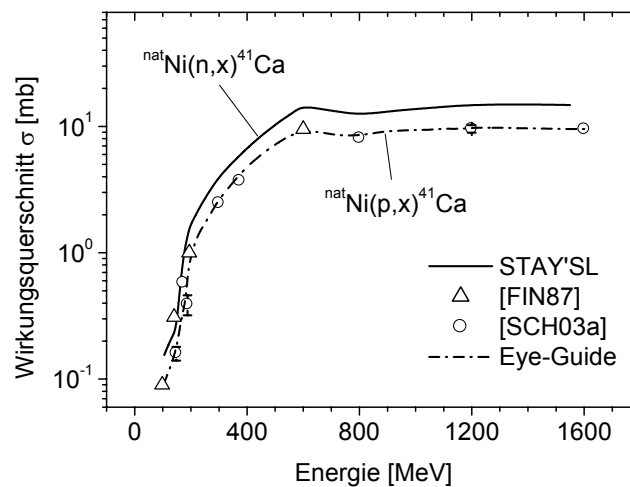


Abbildung 4.95: Aus den Gesamtproduktionsraten entfaltete Anregungsfunktion der $^{\text{nat}}\text{Ni}(n,x)^{41}\text{Ca}$ -Reaktion sowie die der Berechnung des Protonenanteils zugrunde liegende Anregungsfunktion der Reaktion $^{\text{nat}}\text{Ni}(p,x)^{41}\text{Ca}$. Entfaltung durch I. Leya [LEY03] unter Verwendung des Codes STAY'SL.

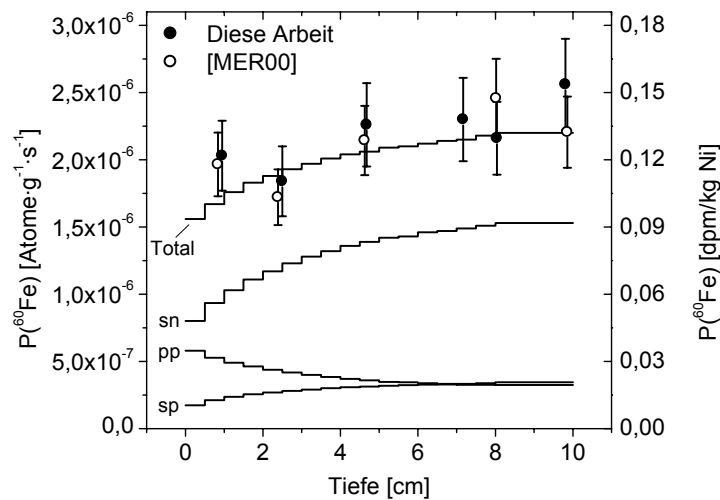
^{60}Fe aus Nickel

Abbildung 4.96: Produktionsrate von ^{60}Fe gegen die Tiefe der Probe in der homogen bestrahlten Fe-Kugel. Die Messpunkte wurden im Rahmen dieser Arbeit bzw. von Merchel et al. [MER00] bestimmt, die Berechnung der einzelnen Anteile erfolgte durch I. Leya [LEY03].

Die Übereinstimmung der experimentell bestimmten ^{60}Fe -Produktionsraten aus $^{\text{nat}}\text{Ni}$ ist gut (Abbildung 4.96). Man erkennt hier einen hohen Anteil sekundärer Neutronen an der Gesamtproduktion, die mit größerer Tiefe zunimmt. Weil es sich bei ^{60}Fe , was aus $^{\text{nat}}\text{Ni}$ produziert wird, um ein Niederenergie-Produkt handelt. Die Gesamtproduktionsrate beträgt nur etwa 10 % der Produktionsraten der Bildung von ^{10}Be und ^{26}Al aus $^{\text{nat}}\text{Ni}$, weil ^{60}Fe nur aus den schweren Ni-Isotopen ^{61}Ni , ^{62}Ni und ^{64}Ni produziert werden kann. Diese drei haben einen Anteil von 5,63 % am natürlichen Isotopengemisch.

Der hohe Anteil sekundärer Neutronen spiegelt sich auch in der entfalteten Anregungsfunktion wieder (Abbildung 4.97). Diese wurde unter Verwendung der von Merchel et al. [MER00] experimentell bestimmten Anregungsfunktion aus allen hier zusammengestellten experimentellen Produktionsraten durch I. Leya entfaltet [LEY03]. Die Neutronen-Anregungsfunktion zeigt gegenüber der Protonen-Anregungsfunktion einen um etwa den Faktor 5 höheren Verlauf.

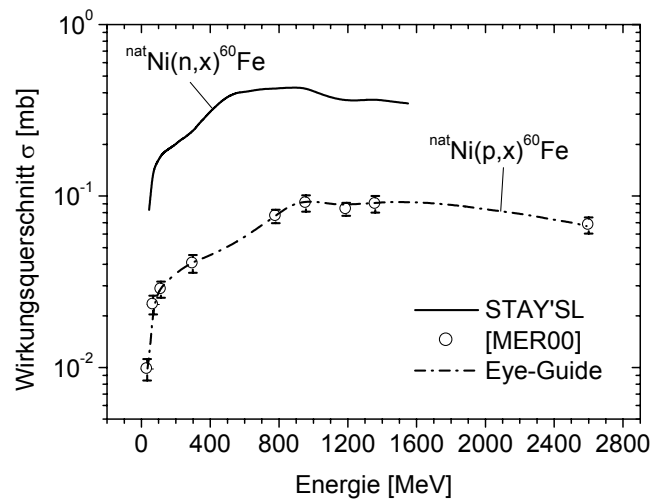


Abbildung 4.97: Entfaltete Neutronen-Anregungsfunktion für die Produktion von ^{60}Fe (I. Leya [LEY03]), sowie die experimentell bestimmte Protonen-Anregungsfunktion, die der Berechnung des Protonen-Anteils der ^{60}Fe -Produktionsrate aus ^{nat}Ni dient.

5. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden für zehn Marsmeteorite die Konzentrationen der kosmogenen Radionuklide ^{10}Be , ^{26}Al und ^{53}Mn durch AMS-Messungen bestimmt. Dabei wurden folgende kosmogenen Radionuklide erstmalig bestimmt:

- Chassigny: ^{53}Mn
- Governador Valadares: ^{26}Al und ^{53}Mn
- Lafayette: ^{53}Mn
- Nakhla: ^{53}Mn
- Sayh al Uhaymir 005: ^{10}Be , ^{53}Mn
- Shergotty: ^{53}Mn

Darüber hinaus wurden same-sample-Daten der kosmogenen Edelgase ^{21}Ne , ^{22}Ne , ^{38}Ar , ^{80}Kr und ^{83}Kr von [SCH03b] zusammengestellt, womit für die untersuchten Marsmeteorite der größte bisher verfügbare same-sample-Datensatz kosmogener Nuklide erstellt werden konnte.

Alle gemessenen Radionuklide konnten zusammen mit den ^3He , ^{21}Ne und ^{22}Ne -Konzentrationen von [SCH03b], die vom selben Probenmaterial gewonnen wurden, im Rahmen des verwendeten physikalischen Modells von Leya et al. [LEY00a] [LEY00b] konsistent diskutiert werden. Dabei wurden Daten zum Bestrahlungsalter sowie zu präatmosphärischen Radien der Meteoroiden gewonnen. Erstmals wurde ein physikalisches Modell zur Diskussion von same-sample-Analysen von Marsmeteoriten angewendet.

Die gefundenen Bestrahlungsalter entsprechen den von Eugster et al. [EUG97] [EUG00] angegebenen Bestrahlungsaltern. Die Bestrahlungsalter, die Nishiizumi et al. [NIS94] und Rösler [RÖS94] für ALHA 84001 bestimmt haben, mussten verworfen werden.

Im Falle von EETA 79001A muss das von Sarafin et al. [SAR85a] angegebene terrestrische Alter nach unten korrigiert werden. Es konnte eine Obergrenze von 250 ka angegeben werden, wobei das von Jull et al. angegebene terrestrische Alter von (12 ± 2) ka [JUL88] am ehesten mit den im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Daten vereinbar ist.

Die gefundenen präatmosphärischen Radien der Marsmeteorite decken sich mit den von Eugster et al. [EUG97] [EUG00] vorgenommenen Minimalabschätzungen. Die präatmosphärischen Radien, die von Nishiizumi et al. [NIS86b] für Shergotty und EETA 79001A bestimmt wurden, sind kleiner als die im Rahmen dieser Arbeit gefundenen Radien. Der präatmosphärische Radius von ALHA 77005 aus [NIS86b] deckt sich mit dem in dieser Arbeit angegebenen Radius.

Wegen SCR-Effekten war es mit dem verwendeten Modell nicht in jedem Falle möglich, sichere Bestrahlungsalter anzugeben. Die bei ALHA77005, Lafayette und Zagami entdeckte Überproduktion kosmogener Nuklide durch SCR bedeutet, dass ein recht hoher Anteil der Marsmeteorite (besonders der Shergottite) SCR-Effekte zeigt.

SCR-Effekte in EETA 79001A, die Nishiizumi et al. [NIS86b] und Garrison et al. [GAR95] beobachteten, konnten in der hier untersuchten Probe nicht gefunden werden. SCR-Effekte in der ^{10}Be , ^{26}Al und ^{53}Mn -Produktion wurden bei Lafayette und Zagami erstmalig entdeckt.

Die Nachweisbarkeit von SCR-produzierten kosmogenen Nukliden in Marsmeteoriten zeigt, dass diese häufig einer geringen Ablation unterliegen. Dieses Ergebnis passt auch zu den Untersuchungen von Wetherill [WET84], der mit Hilfe von Monte-Carlo Simulationen geringe Eintrittsgeschwindigkeiten für Objekte, die vom Mars stammen, gefunden hat. Weiterhin lässt sich mit dem hohen Anteil an Marsmeteoriten, die SCR-Effekte aufweisen, ein früher häufig diskutiertes Modell ausschließen, nach dem mehrere Meter große Objekte vom Mars in den interplanetaren Raum ejaktiert wurden, die dann im interplanetaren Raum durch Kollisionen erst zu meteoritgroßen Körpern erodierten [BOG84]. SCR-Effekte wären bei einem solchen Modell unwahrscheinlich. Auch sollten sich häufiger Spuren einer komplexen Bestrahlungsgeschichte zeigen.

Hinweise einer schwachen Vorbestrahlung auf dem Mutterkörper können die hohen $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnisse in Shergotty und EETA 79001A sein, wenn man von einer Lage der Meteoriten in einer Tiefe von 3 m unter Marsoberfläche ausgeht. Eine Radionuklidproduktion, die in einer solchen Tiefe stattgefunden hätte, wäre von der anschließenden 4π -Bestrahlung überdeckt worden.

Da das zur Interpretation der Messergebnisse verwendete Modell [LEY00b] lediglich die GCR-Produktion kosmogener Nuklide berücksichtigt, was das Bestimmen eines zuverlässigen Bestrahlungsalters in Meteoriten, in denen auch Nuklidproduktion durch SCR stattgefunden hat, unmöglich macht, wäre die Berücksichtigung von SCR wünschenswert. Prinzipiell lässt sich dies durch eine Anpassung des energieabhängigen Primärteilchenflusses erreichen. Diese Flexibilität ist ein wesentlicher Vorteil physikalischer Modelle.

Zur endgültigen Entscheidung, ob die gefundene Ne-Überproduktion in Shergotty und EETA 79001A auf eine Vorbestrahlung auf dem Mars oder aber durch SCR hervorgerufen wurde, wäre die Messung von Tiefenprofilen erforderlich. Liegt, wie in dieser Arbeit, nur eine Probe vor, lassen sich kaum Informationen über die Tiefenabhängigkeit der Nuklid-Produktion gewinnen und eine „schwach“ komplexe Bestrahlungsgeschichte bleibt verborgen. Ebenso ist eine Quantifizierung von SCR-Effekten am zuverlässigsten durch Messung der Tiefenprofile von Nuklidkonzentrationen möglich.

Eine Verbesserung der Genauigkeit der Ergebnisse ist durch die Diskussion der ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit gewonnen Ar- und Kr-Daten zu erwarten [SCH03b]. Das erfordert allerdings eine vollständige Implementierung der Produktionsraten in das Berechnungsprogramm, was bis jetzt noch nicht erfolgt ist.

Weiterhin wurden 4 Chondrite untersucht: Grüneberg, Morávka, Naragh und Neuschwanstein. Bei Morávka und Neuschwanstein handelt es sich um kürzlich beobachtete Fälle (2001 bei Morávka und 2002 bei Neuschwanstein). Die im Rahmen dieser Arbeit experimentell bestimmten Radionuklidkonzentrationen sind daher die ersten Messungen für diese Meteorite. Zusammen mit Literaturdaten für die Edelgase

war es auch bei diesen beiden Meteoriten möglich, die Bestrahlungsgeschichte zu entschlüsseln.

Dabei ergaben sich für den Meteoriten Morávka sehr kleine $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ - und $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Edelgasverhältnisse. Dies könnte auf eine komplexe Bestrahlungsgeschichte hindeuten. Um das aber sicher nachweisen zu können, wäre die Untersuchung eines Tiefenprofils erforderlich. In den Radionuklidkonzentrationen wurden keine Hinweise für eine komplexe Bestrahlungsgeschichte gefunden. Die ^{26}Al -Konzentration wurde mit Hilfe zweier Techniken durchgeführt: per AMS und via γ - γ -Koinzidenzspektroskopie. Beide Messwerte stimmten überein. Sowohl die Bestimmung eines präatmosphärischen Radius als auch einer Abschirmtiefe der untersuchten Probe war konsistent möglich, was gegen eine komplexe Bestrahlungsgeschichte spricht.

Leya et al. fanden im Meteorit Grüneberg mit dem auch im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Modell eine SCR-Überproduktion von Ne-Isotopen. Im Vergleich mit dem ^{36}Cl - ^{36}Ar -Bestrahlungsalter wurde auch in dieser Arbeit ein um 30 % zu hohes ^{21}Ne -Alter gefunden. Darüber hinaus konnten Überproduktionen der Radionuklide ^{10}Be , ^{26}Al und ^{53}Mn nachgewiesen werden. Dies zeigt, dass SCR-Effekte bei der Diskussion kosmogener Nuklide zuverlässig erkennbar sind.

Für den Meteoriten Naragh konnten im Rahmen dieser Arbeit erstmalig ^{26}Al und ^{53}Mn -Daten angegeben werden. Die Bestimmung des Bestrahlungsalters, des präatmosphärischen Radius und der Abschirmtiefe der untersuchten Probe waren problemlos möglich.

Der Meteorit Neuschwanstein zeigte ein recht hohes Bestrahlungsalter, welches an der oberen Grenze der bisher für EL-Chondrite gefundenen Bestrahlungsalter liegt. Für Neuschwanstein war die Angabe eines mit allen Daten konsistenten präatmosphärischen Radius und einer Abschirmtiefe möglich, was eine komplexe Bestrahlungsgeschichte ausschließt.

Die Elementkonzentrationen der wichtigsten Targetelemente wurden via PGAA bestimmt, um zuverlässige Modellrechnungen für Morávka und Neuschwanstein zur Diskussion der kosmogener Nuklide durchführen zu können. Dies erfolgte im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Jolie vom Institut für Kernphysik der Universität zu Köln. Die dabei gemessenen Elementkonzentrationen sind die ersten Bulkanalysenwerte für Morávka.

Schließlich wurden im Rahmen dieser Arbeit experimentelle Produktionsraten von ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca und ^{60}Fe aus $^{\text{nat}}\text{Fe}$ und $^{\text{nat}}\text{Ni}$ -Targets bestimmt, die in einem Modellmeteoroid mit 10 cm Radius mit 1,6 GeV-Protonen bestrahlt wurden. Diese Daten ermöglichen eine erstmalige Veröffentlichung von Neutronen-Anregungsfunktionen für die Reaktionen $^{\text{nat}}\text{Fe}(n,x)^{10}\text{Be}$ und $^{\text{nat}}\text{Fe}(n,x)^{10}\text{Be}$ sowie $^{\text{nat}}\text{Ni}(n,x)^{10}\text{Be}$, $^{\text{nat}}\text{Ni}(n,x)^{26}\text{Al}$, $^{\text{nat}}\text{Ni}(n,x)^{41}\text{Ca}$ und $^{\text{nat}}\text{Ni}(n,x)^{60}\text{Fe}$ von 50 MeV bis 1600 MeV.

Ein weiteres Ergebnis dieser Arbeit ist ein vereinfachtes Trennschema zur Separation der kosmochemisch relevanten Radionuklide ^{41}Ca und ^{59}Ni . Es konnte gezeigt werden, dass ein Ionenaustausch-Schritt ersatzlos entfallen kann. Neben der Zeit- und

Materialersparnis bedeutet dies auch eine Ausbeutesteigerung. Die so gewonnenen Calciumoxid-Präparate lassen sich ohne Ausbeute- oder Reinheitsminderung für die AMS-Messung zum Calciumhydrid umsetzen.

6. Literatur

- [ALT00] **M. Altmaier**
Analyse der langlebigen kosmogenen Radionuklide ^{10}Be und ^{26}Al in terrestrischer und extraterrestrischer Materie: Freilegungsalter von Gesteinsoberflächen in Queen-Maud-Land (Antarctica) und ^{26}Al -Produktionsraten in Meteoriten
Dissertation Universität Köln (2000).
- [ALV39] **L. W. Alvarez und R. Cronog**
 ^3He in Helium
Phys. Rev. 56, 379 (1939).
- [ARM72] **T. W. Armstrong und K. C. Chandler**
HETC-A high energy transport code
Nucl. Sci. Eng. 49, 110 (1972).
- [ARN61] **J. R. Arnold, M. Honda und D. Lal**
Record of Cosmic-Ray Intensity in Meteorites
J. Geophys. Res. 66, 3519 (1961).
- [AYL88] **D. Aylmer, G. F. Herzog, J. Klein und R. Middleton**
 ^{10}Be and ^{26}Al contents of eucrites: Implications for production rates and exposure ages
Geochim. Cosmochim. Acta 52, 1691 (1988).
- [BAE02] **S. Baechler, P. Kudejova, J. Jolie, J.-L. Schenker und N. Stritt**
Prompt gamma-ray activation analysis for determination of boron in aqueous solutions
Nucl. Instr. and Meth. in Phys Res. A488, 410 (2002).
- [BAE03] **S. Baechler, P. Kudejova, J. Jolie und J.-L. Schenker**
The k_0 -method in cold-neutron prompt gamma-ray activation analysis
J. Radioanal. Nucl. Chem. 256, 239 (2003).
- [BAL95] **U. Baltensperger und R. Lorentzen (eds.)**
Solid State Research at Large Facilities
Paul Scherrer Institut, Villingen, Schweiz Annual Report Annex III A (1995).
- [BAL99] **U. Baltensperger, D. Herlach, P.-R. Kettle, R. Lorenzen (eds.)**
Scientific Report 1998. Particles and Matter
Paul Scherrer Institut Villigen, Schweiz, Annual Report Annex III A, (1995).
- [BAU48] **C. A. Bauer**
The Absorption of Cosmic Radiation in Meteorites
Phys. Rev. 74, 225 (1948).

- [BEC84] **R. H. Becker und R. O. Pepin**
The Case for a Martian Origin of the Shergottites: Nitrogen and Noble Gases in EETA79001
Earth Planet. Sci. Lett. 69, 225 (1984).
- [BEG88] **F. Begemann und L. Schultz**
The influence of bulk chemical compositions on the production rate of cosmogenic nuclides in meteorites
Lunar. Planet. Sci. 24, 77 (1988).
- [BIS03] **A. Bischoff**
Von der Webseite
<http://ifp.uni-muenster.de/ap/classification.phtml>
am 17.06.2003 heruntergeladen.
- [BOG73] **D. D. Bogard und P. J. Cressy**
Spallation products of ^3He , ^{21}Ne and ^{38}Ar from target elements in the Bruderheim chondrite
Geochim. Cosmochim. Acta 37, 527 (1973).
- [BOG84] **D. D. Bogard, L. E. Nyquist und P. Johnson**
Noble Gas Contents of Shergottites and Implications for the Martian Origin of SNC Meteorites
Geochim. Cosmochim. Acta 48, 1723 (1984).
- [BUR75] **F. Burrigato, G. Cavarretta, R. Funicello, L. Tolomeo**
The meteorite of Naragh (Iran)
Meteoritics 10, 374, (1975).
- [CAF88] **M. W. Caffee, J. N. Goswami, C. M. Hohenberg, K. Marti und R. C. Reedy**
Irradiation Records in Meteorites
In: J. F. Kerridge and M. S. Matthews (edts.) - Meteorites and the early solar system
The University of Arizona Press, Tucson, 205 (1988).
- [CLO88] **P. Cloth, D. Filges, R. D. Neef, G. Sterzenbach, Ch. Reul, T.W. Armstrong, B. L. Colborn, B. Anders und H. Brueckmann**
HERMES, a Monte Carlo program system for beam-materials interaction studies
Report KFA/Jül-2203 (1988).
- [DAR82] **S. Daróczy und P. Raics**
IAEA Training Course on Utilization of Neutron Generators
Laboratory Manual, Debrecen (1982).

- [DIT90] **B. Dittrich, U. Herpers, H. J. Hofmann, W. Wölfli, R. Bodemann, M. Lüpke, R. Michel, P. Dragovitsch und D. Filges**
AMS Measurements of Thin-Target Cross Sections for the Production of ^{10}Be and ^{26}Al by High-Energy Protons.
Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B52, 588 (1990).
- [DIT96] **B. Dittrich-Hannen, F. Ames, M. Suter, M. J. M. Wagner, Ch. Schnabel, R. Michel, U. Herpers und E. Günther**
 ^{41}Ca measurements at the Zurich AMS facility
Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B113, 453 (1996).
- [DRE92] **G. Dreibus, K. H. Jochum, H. Palme, B. Spettel, F. Wlotzka und H. Wänke**
LEW88516: A meteorite compositionally close to the "Martian mantle".
(abs) Meteoritics 27, 216 (1992).
- [DUN98] **C. L. Dunford und R. R. Kinsey**
NuDat System for Access to Nuclear Data
IAEA-NDS-205 (BNL-NCS-65687), IAEA, Vienna, Austria, July 1998.
Informationen aus der NuDat Datenbank, Version 06.09.2002, unter Verwendung der DOS-Version 2.7 des Programms NuDat entnommen.
- [EBE66] **P. Eberhardt, O. Eugster, J. Geiss und K. Marti**
Rare gas measurements in 30 stone meteorites
Z. Naturforschg. 21a, 414 (1966).
- [EUG02] **O. Eugster, H. Busemann, S. Lorenzetti und D. Terribilini**
Ejection ages from krypton-81-krypton-83 dating and pre-atmospheric sizes of martian meteorites
Meteor. Planet. Sci. 37, 1345 (2002)
- [EUG67] **O. Eugster, P. Eberhardt und J. Geiss**
 ^{81}Kr in meteorites and ^{81}Kr radiation ages
Earth Planet. Sci. Lett. 2, 77 (1967).
- [EUG88] **O. Eugster**
Cosmic-ray production rates for He-3, Ne-21, Ar-38, Kr-83, and Xe-126 in chondrites based on Kr-81/Kr exposure ages
Geochim. Cosmochim. Acta 52, 1649 (1988).
- [EUG97] **O. Eugster, A. Weigel und E. Polnau**
Ejection times of Martian meteorites
Geochim. Cosmochim. Acta 61, 2749 (1997).
- [EVA87] **J. C. Evans, J. H. Reeves und R. C. Reedy**
Solar Cosmic Ray Produced Radionuclides in the Salem Meteorite
Lun. Planet. Sci. XVII, 271 (1987).

- [FIL92] **D. Filges**
Habilitationsschrift
IKP/KFA-Jülich (1992).
- [FIN87] **D. Fink, M. Paul, G. Hollos, S. Theis, S. Vogt, R. Stück, P. Englert und R. Michel**
Measurements of ^{41}Ca spallation cross sections and ^{41}Ca concentrations in the Grant meteorite by accelerator mass spectrometry.
Nucl. Instr. and Meth. **B 29**, 275 (1987).
- [FIN90] **D. Fink, R. Middleton, J. Klein und P. Sharma**
 ^{41}Ca : Measurement by Accelerator Mass Spectrometry and Applications
Nucl. Instr. and Meth. **B 47**, 79 (1990).
- [FIN93] **R. C. Finkel und M. Suter**
AMS in the earth sciences: technique and applications
Advances in Earth sciences 1 (1993).
- [FIF94] **L. K. Fifield, D. Fink, S. H. Sie und C. Tunitz (eds.)**
Accelerator Mass Spectrometry
Proc. 6th Conf. on Accelerator Mass Spectrometry, Canberra, Sydney, Australia, Sept. 27th-Oct. 1st, 1993, North-Holland (1994).
- [FIR96] **R. B. Firestone, V. S. Shirley, S. Y. Frank Chu, C. M. Baglin und J. Zipkin,**
Table of Isotopes
8th Ed., Wiley Interscience, New York, (1996).
- [FOL00] **L. Folco, I. A. Franchi, M. D’Orazio, S. Rocchi und L. Schultz**
A new martian meteorite from the Sahara: The shergottite Dar al Gani 489
Meteor. Planet. Sci. **35**, 827 (2000).
- [FUS69] **K. Fuse und E. Anders**
 ^{26}Al in meteorites – VI. Achondrites
Geochim. Cosmochim. Acta **33**, 653 (1969).
- [GAR95] **D. H. Garrison, M. N Rao und D. D. Bogard**
Solar-proton-produced neon in shergottite meteorites and implications for their origin
Meteoritics **35**, 738 (1995).
- [GAR99] **P. Gartenmann**
Untersuchung von anthropogenem ^{60}Fe und anderen mittelschweren Radionukliden mit Beschleunigermassenspektrometrie
Dissertation Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (1999).

- [GIL98] **E. Gilabert, B. Lavielle, S. Neumann, M. Gloris, R. Michel, Th. Schiekel, F. Sudbrock und U. Herpers**
Cross sections for the proton-induced production of Krypton isotopes from Rb, Sr, Y, and Zr for Energies up to 1600 MeV
Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B145, 293 (1998).
- [GLA02] **W. Glasser, R. Michel, S. Neumann, H. Schuhmacher, V. Dangendorf, R. Nolte, U. Herpers, A. N. Smirnov, I. Ryzhov, A. V. Prokofiev, P. Malmborg, D. Kollar und J.-P. Meulders**
Cross Sections for the Production of Residual Nuclides at Medium Energies Relevant for Accelerator Driven Systems
In: Progress Report on Nuclear Data Research in the federal Republic of Germany for the Period April 1, 2001 to March 31, 2002 (ed. S. M. Qaim) NEA/NSC/DOC(2002)8, INDC(Ger)-048, Jül-3996, 26 (2002).
- [GLO98] **M. Gloris**
Protonen-induzierte Restkernproduktion in schweren Elementen bei mittleren Energien
Dissertataion Universität Hannover (1998).
- [GIL02] **E. Gilabert, B. Lavielle, R. Michel, I. Leya, S. Neumann und U. Herpers**
Production of krypton and xenon isotopes in thick stony and iron targets isotropically irradiated with 1600 MeV protons
Meteorit. Planet. Sci. 37, 951 (2002).
- [GOS88] **J. N. Goswami, R. E. McGuire, R. C. Reedy, D. Lal und R. Jha**
Solar flare protons and alpha particles during the last three solar cycles
J. Geophys. Res. A93, 7195 (1988).
- [GOS97] **J. N. Goswami, N. Sinha, S. V. S. Murty, R. K. Mohapatra und C. J. Clement**
Nuclear tracks and light noble Gases in Alan Hills 84001: Preatmospheric size, fall characteristics, cosmic ray exposure duration and formation age
Meteor. Planet. Sci. 32, 91 (1997).
- [GRA85] **A. L. Graham, A. W. R. Bevan und R. Hutchison**
Catalogue of Meteorites: with special reference to those represented in the collection of the British Museum (Natural History)
4th Ed., British Museum, London (1985).
- [GRA90] **T. Graf, H. Baur und P. Signer**
A model for the production of cosmogenic nuclides in chondrites
Geochim. Cosmochim. Acta 54, 2521 (1990).
- [GRA01] **Th. Graf, M. W. Caffee, K. Marti K. Nishiizumi und K. V. Ponganis**
Dating collisional events: ^{36}Cl - ^{36}Ar exposure ages of chondritic material
Icarus 150, 181 (2001).

- [HEI88] **F. Heide**
Kleine Meteoritenkunde
3. Aufl., Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo (1988).
- [HER67] **U. Herpers, W. Herr und R. Wölfle**
Determination of cosmic-ray-produced nuclides ^{53}Mn , ^{42}Sc and ^{26}Al in meteorites neutron activation and gamma coincidence counting
Radioactive dating and methods of low-level counting, IAEA, Vienna (1967).
- [HER69] **U. Herpers, W. Herr und R. Wölfle**
Evaluation of ^{53}Mn by (n, γ) activation, ^{26}Al and special trace elements in meteorites by γ -coincidence techniques
Meteorite research, (P. M. Millman, ed.), Reidel, Dordrecht, 387 (1969).
- [HER71] **G. F. Herzog und E. Anders**
Absolute scale for radiation ages of stony meteorites
Geochim. Cosmochim. Acta 35, 605 (1971).
- [HER02] **U. Herpers**
Persönliche Mitteilung
(2002).
- [HEY67] **D. Heymann und E. Anders**
Meteorites with short cosmic-ray exposure ages, as determined from their Al^{26} content
Geochim. Cosmochim. Acta 31, 1793 (1967).
- [HOL85] **A. F. Holleman, E. Wiberg**
Lehrbuch der Anorganischen Chemie
91.-100. Auflage, W. de Gruyter, Berlin, New York (1985).
- [HOF87] **H. J. Hofmann, J. Beer, G. Bonani, H. R. von Gunten, S. Raman, M. Suter, R. L. Walker, W. Wölfli und D. Zimmermann**
 ^{10}Be : Half-Life and AMS-Standards
Nucl. Instr. and Meth. B29, 32 (1987).
- [HON88] **M. Honda**
Statistical estimation of the production of cosmic-ray-induced nuclides in Meteorites
Meteoritics 23, 3 (1988).
- [HON02] **M. Honda, M. W. Caffee, Y. N. Miura, H. Nagai, K. Nagao und K. Nishiizumi**
Cosmogenic Nuclides in the Brenham pallasite
Meteor. Planet. Sci. 37, 1711 (2002).

- [JOC01] **K. P. Jochum, B. Stoll, M. Amini und H. Palme**
Limited trace element fractionation in SNC meteorites. (abs)
Meteoritics & Planet. Sci. 36, A90 (2001).
- [JOC02] **K. P. Jochum**
Pers. Mitteilung
(2003).
- [JUL88] **A. J. T. Jull und D. J. Donahue**
Terrestrial ^{14}C age of the Antarctic shergottite, EETA79001.
Geochim. Cosmochim. Acta 52, 1309 (1988).
- [JUL94] **A. J. T. Jull, E. Cielaszyk, S. T. Brown und D. J. Donahue**
 ^{14}C terrestrial ages of achondrites from Victoria Land, Antarctica.
Lunar Planet. Sci. 25, 647 (1994).
- [JUL97] **A. J. T. Jull, J. W. Beck und G. S. Burr (eds.)**
Accelerator Mass Spectrometry
Proc. 7th Conf. on Accelerator Mass Spectrometry, Tucson, AZ, USA,
May 20th-24th, 1996, North-Holland (1997).
- [JUL98] **A. J. T. Jull, S. Cloudt und E. Cielaszyk**
 *^{14}C terrestrial ages of meteorites from Victoria Land, Antarctica and the
infall rates of meteorites.*
Meteorites: Flux with Time and Impact Effects (M. M. Grady, R.
Hutchison, G. J. H. McCall und D. A. Rothery, eds.), 75. Geological
Society Spec. Publ. No. 140. (1998).
- [KAS00] **Zs. Kasztovszky, Zs. Révay, T. Belgya und G. L. Molnár**
*Nondestructive analysis of metals by PGAA at the Budapest Research
Reactor*
J. Radioanal. Nucl. Chem. 244, 379 (2000).
- [KNI97] **K. Knie**
*Beschleunigermassenspektrometrie mit Isobarenspeparation in einem
dedizierten gasgefüllten Magneten*
Dissertation Technische Universität München (1997).
- [KNI03] **K. Knie**
Pers Mitteilung
(2003).
- [KOS00] **H. Kosuch**
Produktion kosmogener Nuklide in Marsmeteoriten
Examensarbeit, Universität Hannover (2000).

- [KUB96] **P. W. Kubik, M. Döbli und M. Suter (eds.)**
Accelerators in applied research and technology
Proc. 4th Conf. on Accelerators in Applied Research and Technology
(ECAART-4), Zürich, Schweiz, Aug. 29th-Sept. 2nd, 1995, North-Holland
(1996).
- [KUB01] **P. W. Kubik**
Pers. Mitteilung
(2001).
- [KUH01] **J. Kuhnhehn**
*Protonen-induzierte Erzeugung radioaktiver Restkerne in Blei und Bismut
bei Energien bis 71 MeV*
Dissertation Universität Köln (2001).
- [KUT84] **W. Kutschera, P. J. Billquist, B. Frekers, W. Henning, K. J. Jensen,
X. Ma, R. Pardo, M. Paul, K. E. Rehm, R. K. Smithers, J. L. Yntema
und L. F. Mausner**
Half-life of ^{60}Fe
Nucl. Instr. and Meth. **B5**, 430 (1984).
- [LAV97] **B. Lavielle, S. Toe und E. Gilabert**
Noble Gas Measurements In the L/LL5 Chondrite Knyahiya
Meteor. Planet. Sci. **32**, 97 (1997).
- [LAV99] **B. Lavielle, K. Marti, J.-P. Jeannot, K. Nishiizumi und M. Caffee**
*The ^{36}Cl - ^{36}Ar - ^{40}K - ^{41}K records and cosmic ray production rates in iron
meteorites*
Earth Planet. Sci. Lett. **170**, 93 (1999).
- [LEY97] **I. Leya**
*Modellrechnungen zur Beschreibung der Wechselwirkungen galaktischer
kosmischer Strahlung mit Stein und Eisen-Meteoroiden.
Dünntargetbestrahlungen und Dicktargetexperimente*
Dissertation Universität Hannover (1997).
- [LEY98] **I. Leya und R. Michel**
*Determination of neutron cross sections for nuclide production at
intermediate energies by deconvolution of thick-target production rates.*
Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology (ed. G. Reffo),
Trieste, Italy, 1463 (1998).
- [LEY00a] **I. Leya, H.-J. Lange, So. Neumann, R. Wieler und R. Michel**
*The production of cosmogenic nuclides in stony meteoroids by galactic
cosmic ray particles*
Meteor. Planet. Sci. **35**, 259 (2000).

- [LEY00b] **I. Leya, H.-J. Lange, M. Lüpke, U. Neupert, R. Daunke, O. Fahnenbruck, R. Michel, R. Rösel, B. Meltzow, T. Schiekkel, F. Sudbrock, U. Herpers, D. Filges, G. Bonani, B. Dittrich-Hannen, M. Suter, P. W. Kubik und H.-A. Synal**
Simulation of the interaction of galactic cosmic-ray protons with meteoroids: On the production of radionuclides in thick gabbro and iron targets irradiated isotropically with 1.6 GeV protons
Meteor. Planet. Sci. 35, 287 (2000).
- [LEY01] **I. Leya, Th. Graf, K. Nishiizumi und R. Wieler**
Cosmic ray production rates of helium, neon and argon isotopes in H chondrites based on chlorine-36/argon-36 ages
Meteor. Planet. Sci. 36, 963 (2001).
- [LEY01a] **I. Leya, S. Neumann, R. Wieler und R. Michel**
The production of cosmogenic nuclides by galactic cosmic-ray particles for 2π exposure geometries
Meteor. Planet. Sci. 36, 1547 (2001).
- [LEY03] **I. Leya**
Pers. Mitteilung
(2003).
- [LIN95] **R. M. Lindstrom und C. Yonezawa**
In: *Prompt Gamma Neutron Activation Analysis*
Z. B. Alfassi und C. Chung (eds.) CRC Press, Boca Raton, Florida, 93 (1995).
- [LOD98] **K. Lodders**
A survey of shergottite, nakhlite and chassigny meteorites whole-rock compositions.
Meteoritics & Planet. Sci. 33, A183 (1998).
- [LOD98a] **K. Lodders und B. Fegley Jr.**
The Planetary Scientists Companion
Oxford University Press, New York, Oxford (1998).
- [MAS01] **J. Masarik, K. Nishiizumi und R. C. Reedy**
Production rates of cosmogenic helium-3, neon-21 and neon-22 in ordinary chondrites and the lunar surface
Meteor. Planet. Sci. 36, 643 (2001).
- [MAR67] **K. Marti**
Mass-spectrometric detection of cosmic-ray-produced Kr81 in meteorites and the possibility of Kr-Kr-Dating
Phys. Rev. Lett. 18, 264 (1967).

- [MAR92] **K. Marti und T. Graf**
Cosmic ray exposure history of ordinary chondrites
Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 20, 221 (1992).
- [MAS94] **J. Masarik und R. C. Reedy**
Effects of bulk composition on nuclide production processes in meteorites
Geochim. Cosmochim. Acta 58, 5307 (1994).
- [MCS87] **H. McSween**
Meteorites and their parent planets
Cambridge University Press, New York (1987).
- [MER98] **S. Merchel**
Über die Wechselwirkung kosmischer Strahlung mit extraterrestrischer Materie: Radiochemische Bestimmung der Produktionsraten von kosmogenen langlebigen Radionukliden in Meteoriten.
Dissertation Universität Köln (1998).
- [MER99] **S. Merchel und U. Herpers**
An Update on Radiochemical Separation Techniques for the Determination of Long-Lived Radionuclides via Accelerator Mass Spectrometry
Radiochim. Acta 84, 215 (1999).
- [MER00] **S. Merchel, T. Faestermann, U. Herpers, K. Knie, G. Korschinek, I. Leya, R. Michel, G. Rugel und C. Wallner**
Thin- and thick-target cross sections for the production of ^{53}Mn and ^{60}Fe
Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B172, 806 (2000).
- [MET03] **J. Koblitz**
MetBase
Version 6.0 for Windows (2003).
- [MIC89] **R. Michel, B. Dittrich, U. Herpers, F. Peiffer, T. Schiffmann, P. Cloth, P. Dragovitsch und D. Filges**
Proton-Induced Spallation at 600 MeV
Proc. 2nd Int. Conf. on Nuclear and Radiochemistry, July 1988, Brighton, Analyst 114, 295 (1989).
- [MIC91] **R. Michel, P. Dragovitsch, P. Cloth, G. Dage und D. Filges**
On the production of cosmogenic nuclides in meteoroids by galactic protons
Meteoritics 26, 221 (1991).

- [MIC95] **R. Michel, M. Gloris, H.-J. Lange, I. Leya, M. Lüpke, U. Herpers, B. Dittrich-Hannen, R. Rösel, Th. Schiek, D. Filges, P. Dragovitsch, M Suter, P. W. Kubik, H.-J. Hofmann, H. Baur, W. Wölfli und R. Wieler**
Nuclide production by proton-induced reactions on elements (Z = 6-29) in the energy range from 800 to 2699 MeV
Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B103, 183 (1995).
- [MIC96] **R. Michel, I. Leya und L. Borges**
Production of cosmogenic nuclides in meteoroids: accelerator experiments and model calculations to decipher the cosmic ray record in extraterrestrial matter
Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B113, 434 (1996).
- [MIC97] **R. Michel, R. Bodemann, H. Busemann, R. Daunke, M. Gloris, H.-J. Lange, B. Klug, A. Krins, I. Leya, M. Lüpke, S. Neumann, H. Reinhardt, M. Schnatz-Büttgen, U. Herpers, Th. Schiek, F. Sudbrock, B. Holmqvist, H. Condé, P. Malmborg, M. Suter, B. Dittrich-Hannen, P. W. Kubik, H.-A. Synal und D. Filges**
Cross sections for the production of residual nuclides by low- and medium-energy protons from the Target elements C, N, O, Mg, Al, Si, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Sr, Y, Zr, Nb, Ba and Au
Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. B 129, 153 (1997).
- [MIC98] **R. Michel und S. Neumann**
Interpretation of cosmogenic nuclides in meteorites on the basis of accelerator experiments and physical model calculations
Proc. Indian Acad. Sci. (Earth. Planet. Sci.) 107, 441 (1998).
- [MIC99] **R. Michel**
Long-Lived Radionuclides as Tracers in Terrestrial and Extraterrestrial Matter
Radiochim. Acta 87, 47 (1999).
- [MIC03] **R. Michel**
Pers. Mitteilung
(2003).
- [MIU94] **Y. N. Miura, N. Sugiura und K. Nagao**
New SNC meteorite ALH84001: Evidence for SNC meteorite from noble gases
Lunar Planet. Sci. XXV, 919 (1994).
- [MON83] **R. K. Moniot, T. H. Kruse, C. Tuniz, W. Savin, G. S. Hall, T. Milazzo, D. Pal und G. F. Herzog**
The ²¹Ne production rate in stony meteorites estimated from ¹⁰Be and other radionuclides
Geochim. Cosmochim. Acta 47, 1887 (1983).

- [MON98] **G. L. Molnár und R. M. Lindstrom**
Nuclear reaction prompt gamma-ray analysis, in: Vértes et al. (eds.), Nuclear Methods in Mineralogy and Geology: Techniques and Applications
Plenum Press, New York, 145 (1998).
- [MUL77] **R. A. Muller**
Radioisotope dating with a Cyclotron
Science 196, 489 (1977).
- [NED00] **H. Neder, G. Heuser und M. Laubestein**
Low level γ -ray germanium-spectrometer to measure very low primordial radionuclide concentrations
Appl. Radiat. Isot. 53, 191 (2000)
- [NED01] **H. Neder, M. Laubenstein und G. Heuser**
Radionuclide concentrations in the freshly fallen meteorite Morávka
Meteorit. Planet. Sci. 36, Suppl., A25 (2001).
- [NIS80] **K. Nishiizumi, S. Regnier und K. Marti**
Cosmic ray exposure ages of chondrites, pre-irradiation and contncy of cosmic ray flux in the past
Earth. Planet. Sci. Lett. 50, 156 (1980).
- [NIS78] **K. Nishiizumi und D. Ries**
Exposure and terrestrial ages for Antarctic meteorites
Meteoritics 13, 519 (1978).
- [NIS85] **K. Nishiizumi, J. Klein, R. Middleton, D. Elmore, P. W. Kubik, und J. R. Arnold**
Exposure history of Shergottites
Geochim. Cosmochim. Acta 50, 1017 (1985).
- [NIS86] **K. Nishiizumi, J. R. Arnold, N. Goswani, J. Klein and R. Middleton**
Solar Cosmic Ray effects in Alan Hills 77005
Meteoritics 21, 472 (1986).
- [NIS86b] **K. Nishiizumi, J. Klein, R. Middleton, D. Elmore, P. W. Kubik und J. R. Arnold**
Exposure history of shergottites
Geochim. Cosmochim. Acta 50, 1017 (1986).
- [NIS87] **K. Nishiizumi**
 ^{53}Mn , ^{26}Al , ^{10}Be and ^{36}Cl in meteorites: Data compilation
Nucl. Tracks Radiat. Meas. 13, 209 (1987).
- [NIS89] **K. Nishiizumi, D. Elmore und P. W. Kubik**
Update on terrestrial ages of Antarctic meteorites.
Earth Planet. Sci. Lett. 93, 299 (1989).

- [NIS94] **K. Nishiizumi, M. W. Caffee und R. C. Finkel**
Exposure histories of ALH 84001 und ALHA 77005
Meteoritics 29, 511 (1994).
- [OTT88] **U. Ott**
Noble Gases in SNC meteorites: Shergotty, Nakhla, Chassigny
Geochim. Cosmochim. Acta 52, 1937 (1988).
- [PAR01] **J. Park, R. Okazaki und K. Nagao**
Noble Gases in the SNC Meteorites: Dar Al Gani 489, Sayh Al Uhaymir 005 and Dhofar 019
Meteor. Planet. Sci. 36, A157 (2001).
- [PÄT00] **M. Pätzsch, M. Altmaier, U. Herpers, H. Kosuch, R. Michel und L. Schultz**
Exposure Age of the New SNC Meteorite Sayh Al Uhaymir 005
Meteor. Planet. Sci. 35, A124 (2000).
- [PAT02] **A. Patzer und L. Schultz**
Noble Gases in enstatite chondrites I: exposure ages, pairing and weathering effects
Meteor. Planet. Sci. 36, 947 (2002).
- [PEP85] **R. O. Pepin**
Evidence of Martian origins
Nature 317, 473 (1985).
- [PER77] **F. G. Perey**
Least-Squares dosimetry unfolding: The program STAY'SL
ORNL/TM-6062, ENDF-254, NEA Data Bank, Gif-sur-Yvette Cedex, Frankreich (1977).
- [PRA89] **R. Prael und H. Lichtenstein**
User guide to LCS: The LAHET code system
Los Alamos Rep. UR-89-3014 (1989).
- [RED83] **R. C. Reedy, J. R. Arnold und D. Lal**
Cosmic-ray record in solar system matter
Science 219, 127 (1983).
- [RED91] **R. C. Reedy und K. Marti**
Solar-Cosmic-Ray Fluxes During the Last Ten Million Years
in: *The Sun in Time*, C. Sonett, M. S. Giampapa und M. S. Matthews (ed.), University of Arizona Press, Tucson Arizona, 260 (1991).

- [RED93] **R. C. Reedy, J. Masarik, K. Nishiizumi, J. R. Arnold, R. C. Finkel, M. W. Caffee, J. Southon, A. J. T. Jull und D. J. Donahue**
Cosmogenic-radionuclide profiles in Knyahinya: new measurements and models
Lunar. Planet. Sci. XXIV, Lunar Planetary Institute, Houston, 1195 (1993).
- [RÖS94] **R. Rösel**
Langlebige kosmogene Radionuklide in Meteoriten: Produktion, Simulation und radiochemische Bestimmung
Dissertation Universität Köln (1994).
- [SAR85] **R. Sarafin**
Anwendung radiochemischer Methoden und der Beschleuniger-Massenspektrometrie zur Bestimmung der tiefenabhängigen, langlebigen Spallations-Radionuklide ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl und ^{53}Mn in Steinmeteoriten und Gedanken zum noch ungeklärten Ursprung der Shergottite
Dissertation Universität Köln (1985).
- [SAR85a] **R. Sarafin, U. Herpers, P. Signer, R. Wieler, G. Bonani, H. J. Hoffmann, E. Morenzoni, M. Nessi, M. Suter und W. Woelfli**
 ^{10}Be , ^{26}Al , ^{53}Mn and light Noble Gases in the Antarctic Shergottite 79001A
Earth Planet. Sci. Lett. 75, 72 (1985).
- [SCH65] **O. A. Schaeffer und D. Heymann**
Comparison of ^{36}Cl - ^{36}Ar cosmic-ray exposure ages of dated fall iron meteorites
J. Geophys. Res. 70, 215 (1965).
- [SCH93] **P. Scherer**
Einfluss der terrestrischen Verwitterung auf den Edelgasgehalt und die Petrographie von Meteoriten; vergleichende Analysen von Chondriten aus polaren und subtropischen Trockenregionen
Dissertation Universität Mainz (1993)
- [SCH95] **Th. Schiekel**
Radiochemische Untersuchungen zur Produktion kosmogener Nuklide: Wirkungsquerschnitte, Modelle und Modellrechnungen
Dissertation Universität Köln (1995).
- [SCH96] **Ch. Schmidt**
Beschleunigermassenspektrometrie mit ^{60}Fe
Diplomarbeit TU-München (1996).

- [SCH97] **Ch. Schnabel, P. Gartenmann, J.M. Lopez-Gutierrez, B. Dittrich-Hannen, M. Suter, H.-A. Synal, I. Leya, M. Gloris, R. Michel, F. Sudbrock und U. Herpers**
Determination of proton-induced production cross sections and production rates of ^{129}I and ^{41}Ca
Proceedings of the Italian Physical Society 59, Nuclear Data for Science and Technology, G. Reffo et al. (eds.), SIF Bologna, 1559 (1997).
- [SCH01] **C. Schnabel, P. Ma, G. F. Herzog, T. Faestermann K. Knie und G. Korschinek**
 ^{10}Be , ^{26}Al und ^{53}Mn in Martian meteorites
Lunar Planet. Sci. XXXII, Abs. #1353. Lunar Planetary Institute, Houston (2001).
- [SCH02] **C. Schnabel**
Pers. Mitteilung
(2002).
- [SCH03a] **C. Schnabel, H.-A. Synal, P. Gartenmann, F. J. Santos-Arevalo, I. Gomez-Martinez, M. Suter, A. Tarabishi, T. Bastian, F. Sudbrock, U. Herpers, I. Leya, M. Gloris und R. Michel**
Proton – induced production cross sections and production rates of ^{41}Ca from Ni
Nucl. Instr. and Meth. B (2003) (accepted for publication).
- [SCH03b] **S. P. Schwenger**
Pers. Mitteilung
(2003).
- [SCH03c] **L. Schultz**
Pers. Mitteilung
(2003).
- [SIG60] **P. Signer und A. O. Nier**
The distribution of cosmic-ray-produced rare gases in iron meteorites
J. Geophys. Res. 65, 2947 (1960).
- [SIL89] **R. Silberberg, C. H. Tsao, J. H. Adams und J. R. Letaw**
High-energy radiation environment during manned space flights
In: High-energy radiation background in space (A90-25305 09-93). New York, American Institute of Physics, 146 (1989).
- [SUD98] **F. Sudbrock**
Experimentelle und theoretische Studien zur Restkernproduktion bei Spallations- und Fragmentationsreaktionen
Dissertation Universität zu Köln (1998).

- [SWI86] **T. D. Swindle, M. W. Caffee und C. M. Hohenberg**
Xenon and Other Noble Gases in Shergottites
Geochim. Cosmochim. Acta 50, 1001 (1986).
- [SYN92] **H.-A. Synal (ed.)**
10 Jahre Beschleunigermassenspektrometrie in der Schweiz
PSI Proceedings 92-04 (1992).
- [SYN95] **H.-A. Synal**
Accelerator Mass Spectrometry: New Applications
Appl. Radiat. Isot. 46, No. 6/7, 457 (1995).
- [SYN97] **H.-A. Synal, M. Döbeli, G. Bonani, R. M. Ender, P. Gartenmann, Ch. Schnabel, M. Suter und P. W. Kubik**
Status report of the PSI/ETH AMS facility
Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B123, 62 (1997).
- [TAR02] **A. Tarabishi**
Tarabishi in Zusammenarbeit mit ETH/PSI
Pers. Mitteilung durch Ch. Schnabel (2003).
- [TAR03] **A. Tarabishi**
Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit extraterrestrischer Materie: Radiochemische Bestimmung von Produktionsraten und Modellrechnungen
Dissertation Universität Köln (2003).
- [TER00] **D. Terribilini, H. Busemann und O. Eugster**
Krypton-81-Krypton CRE Ages of Martian Meteorites Including the New Shergottite Los Angeles
Meteor. Planet. Sci. 35, A155 (2000).
- [TER98] **D. Terribilini, O. Eugster, M. Burger, A. Jakob und U. Krähenbühl**
Noble gases and chemical composition of Shergotty mineral fractions, Chassigny, and Yamato 793605: The trapped argon-40/argon-36 ratio and ejection times of Martian meteorites
Meteor. Planet. Sci. 33, 677 (1998).
- [TIL88] **G. R. Tilton**
Age of the solar system
In: J. F. Kerridge and M. S. Matthews (eds.) - Meteorites and the early solar system
The University of Arizona Press, Tucson, 259 (1988).

- [VOG88a] **S. Vogt**
Untersuchungen zur tiefenabhängigen Produktion langlebiger kosmogener Radionuklide in Meteoriten. Nachweis der Radioisotope ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{53}Mn und ^{59}Ni mittels ultrasensitiver Analysemethoden
Dissertation Universität Köln (1988).
- [VOG88b] **S. Vogt und U. Herpers**
Radiochemical separation techniques for the determination of longlived radionuclides in meteorites by means of accelerator mass spectrometry
Fresenius Z. Anal. Chem. 331, 186 (1988).
- [VOG90] **S. Vogt, G. F. Herzog und R. C. Reedy**
Cosmogenic nuclides in extraterrestrial materials
Rev. Geophys. 28, 253 (1990).
- [VOS68] **H. Voshage**
Massenspektrometrische Element- und Isotopen-Häufigkeitsanalysen zur Erforschung der Geschichte der Meteorite und des Planetensystems
Intern. Journal of Mass Spectrometry a. Ion Physics 1, 133 (1968).
- [WEB92] **H. W. Weber**
Pers. Mitteilung an L. Schultz,
unveröffentlichte Daten (1992).
- [WEL01] **K. C. Welten, K. Nishiizumi und M. W. Caffee**
The search for meteorites with complex exposure histories among ordinary chondrites with low $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ ratios.
32nd Annual Lunar and Planetary Science Conference, March 12-16, 2001, Houston, Texas, abstract #2148 (2001).
- [WET84] **G. W. Wetherill**
Orbital Evolution of Impact Ejecta from Mars
Meteoritics 19, 1 (1984).
- [WIE89] **R. Wieler und P. Signer**
Unveröffentlichte Daten, persönliche Mitteilung an L. Schultz. (1989)
- [WIE02] **R. Wieler**
Cosmic-Ray-Produced Noble Gases in Meteorites
In: **D. Porcelli, C. J. Ballentine, R. Wieler (eds.)**
Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry
Reviews in Mineralogy and Geochemistry 47, 125, Mineralogical Society of America, Washington (2002).
- [WET75] **G. W. Wetherill**
Radiometric chronology of the early solar system
Ann. Rev. Nucl. Sci., 25, 283 (1975).

- [YIO90] **F. Yiou und G.M. Raisbeck (eds.)**
Accelerator Mass Spectrometry
Proc. 5th Int. Conf. on Accelerator Mass Spectrometry, Paris, France,
April 23-27, 1990, North-Holland (1990).
- [ZIP03] **J. Zipfel, B. Spettel, T. Schönbeck, H. Palme und A. Bischoff**
Bulk chemistry of the Neuschwanstein (EL6) chondrite - First results
Lun. Planet. Sci. XXXIV, Abstract #1640, Lunar Planetary Institute,
Houston (2003).

Anhang

A. Daten und Ergebnisse der Meteoritenanalysen

Tabelle A.1: Ergebnisse der ICP-OES-Analysen von Al. Die Spalte „Konz. Messlsg.“ gibt die Konzentration der gemessenen Lösung an. Diese Messlösung ist einem Aliquot der Probenlösung entnommen. Zur Messung wurde dieses Aliquot um den Faktor D verdünnt (Spalte „Verdünnung D der Messlsg.“). Die Trägermasse ist die vor Beginn der Trennungsgänge vorliegende Masse des Elements.

Al					
Probe Nr.	Meteorit	Klasse	Konz. Messlsg. [µg/ml]	Verdünnung D der Messlsg.	Trägermasse [mg]
001	Dhurmsala	LL6	69,40	1	3,47
002	Naragh	H6	14,73	1/5	3,68
003	Acfer 086	CV3	17,32	1/5	4,33
004	Acfer 186	CR2	7,19	1/10	3,60
005	Blank		2,68	1/10	1,34
006	Allende	CV3	7,06	1/10	3,53
007	Dhurmsala	LL6	5,95	1/10	2,98
008	Acfer 186	CR2	8,30	1/10	4,15
009	Naragh	H6	4,93	1/10	2,46
010	Morávka 1	H5-6	4,70	1/10	2,35
011	Blank		1,94	1/10	0,97
012	Dhurmsala	LL6	5,46	1/10	2,73
013	Murchison	CM2	5,78	1/10	2,89
014	Acfer 082	CV3	6,90	1/10	3,45
015	Acfer 086	CV3	6,45	1/10	3,23
016	Acfer 207	CH3	5,07	1/10	2,54
017	Blank		2,01	1/10	1,01
018	Dhurmsala	LL6	0,82	1/100	4,10
019	Naragh	H6	0,69	1/100	3,45
020	Naragh	H6	0,74	1/100	3,71
021	Dhurmsala	LL6	0,79	1/100	3,93
022	Dhurmsala	LL6	0,85	1/100	4,25
023	Morávka 2	H5-6	0,70	1/100	3,52
024	Morávka 2	H5-6	0,72	1/100	3,59
025	Blank		0,41	1/100	2,07
026	ALH 84001	OPX	0,55	1/100	2,76
027	EETA 79001	LhSh	0,98	1/100	4,89
028	Nakhla	Nak	0,75	1/100	3,75
029	Shergotty	BaSh	1,55	1/100	7,73
030	Chassigny	Ch	0,49	1/100	2,47
031	Blank		0,41	1/100	2,07
032	Dhurmsala	LL6	0,88	1/100	4,41
033	Lafayette	Nak	0,67	1/100	3,37
034	Dhurmsala	LL6	0,78	1/100	3,91
035	Grüneberg	H4	0,71	1/100	3,54
036	Zagami	BaSh	0,69	1/100	3,45
037	ALH 77005	LhSh	0,14	1/100	0,71
038	Gov. Valadares	Nak	0,67	1/100	3,33
039	SaU 005	BaSh	1,18	1/100	5,89
040	Blank		0,85	1/50	2,12
041	Dhurmsala	LL6	0,77	1/100	3,85
042	Dhurmsala	LL6	1,63	1/50	4,08
043	Dhurmsala 4	LL6	0,74	1/500	18,43
044	Sikhote Alin	IIB	0,41	1/500	10,28
045	Morávka 1	H5-6	1,83	1/50	4,58
046	Morávka 2	H5-6	2,17	1/50	5,43
047	Naragh	H6	1,48	1/50	3,70
048	Neuschwanstein	EL6	1,35	1/50	3,37
049	Blank		1,76	1/50	4,39

Tabelle A.2: Ergebnisse der ICP-OES-Analysen von Be.

Nr.	Meteorit	Klasse	Be		
			Konz. Messlsg [µg/ml]	Verdünnung D der Messlsg.	Trägermasse [mg]
001	Dhurmsala	LL6	27,60	1	1,38
002	Naragh	H6	6,71	1/5	1,68
003	Acfer 086	CV3	5,28	1/5	1,32
004	Acfer 186	CR2	3,84	1/10	1,92
005	Blank		2,72	1/10	1,36
006	Allende	CV3	2,13	1/10	1,06
007	Dhurmsala	LL6	2,05	1/10	1,03
008	Acfer 186	CR2	2,04	1/10	1,02
009	Naragh	H6	2,12	1/10	1,06
010	Morávka 1	H5-6	2,04	1/10	1,02
011	Blank		2,02	1/10	1,01
012	Dhurmsala	LL6	2,09	1/10	1,04
013	Murchison	CM2	2,17	1/10	1,08
014	Acfer 082	CV3	2,09	1/10	1,04
015	Acfer 086	CV3	2,09	1/10	1,04
016	Acfer 207	CH3	2,06	1/10	1,03
017	Blank		2,11	1/10	1,06
018	Dhurmsala	LL6	0,22	1/100	1,09
019	Naragh	H6	0,23	1/100	1,17
020	Naragh	H6	0,24	1/100	1,20
021	Dhurmsala	LL6	0,46	1/100	2,29
022	Dhurmsala	LL6	0,22	1/100	1,12
023	Morávka 2	H5-6	0,23	1/100	1,14
024	Morávka 2	H5-6	0,22	1/100	1,12
025	Blank		0,22	1/100	1,12
026	ALH 84001	OPX	0,45	1/100	2,24
027	EETA 79001	LhSh	0,45	1/100	2,24
028	Nakhla	Nak	0,45	1/100	2,23
029	Shergotty	BaSh	0,45	1/100	2,26
030	Chassigny	Ch	0,44	1/100	2,19
031	Blank		0,44	1/100	2,22
032	Dhurmsala	LL6	0,45	1/100	2,24
033	Lafayette	Nak	0,44	1/100	2,22
034	Dhurmsala	LL6	0,45	1/100	2,27
035	Grüneberg	H4	0,45	1/100	2,23
036	Zagami	BaSh	0,45	1/100	2,23
037	ALH 77005	LhSh	0,47	1/100	2,34
038	Gov. Valadares	Nak	0,44	1/100	2,22
039	SaU 005	BaSh	0,44	1/100	2,21
040	Blank		0,88	1/50	2,21
041	Dhurmsala	LL6	0,43	1/100	2,16
042	Dhurmsala	LL6	0,87	1/50	2,17
043	Dhurmsala 4	LL6	0,45	1/500	11,20
044	Sikhote Alin	IIB	0,44	1/500	10,99
045	Morávka 1	H5-6	0,89	1/50	2,23
046	Morávka 2	H5-6	0,85	1/50	2,13
047	Naragh	H6	0,88	1/50	2,20
048	Neuschwanstein	EL6	0,86	1/50	2,16
049	Blank		0,90	1/50	2,24

Tabelle A.3: Ergebnisse der ICP-OES-Analysen von Ca.

Probe Nr.	Meteorit	Klasse	Ca		
			Konz. Messlsg [µg/ml]	Verdünnung D der Messlsg.	Trägermasse [mg]
001	Dhurmsala	LL6	54,65	1	2,73
002	Naragh	H6	10,10	1/5	2,53
003	Acfer 086	CV3	36,19	1/5	9,05
004	Acfer 186	CR2	5,33	1/10	2,67
005	Blank		0,12	1/10	0,06
006	Allende	CV3	25,54	1/10	12,77
007	Dhurmsala	LL6	24,27	1/10	12,14
008	Acfer 186	CR2	26,77	1/10	13,39
009	Naragh	H6	23,37	1/10	11,69
010	Morávka 1	H5-6	22,63	1/10	11,32
011	Blank		19,02	1/10	9,51
012	Dhurmsala	LL6	23,71	1/10	11,86
013	Murchison	CM2	24,33	1/10	12,17
014	Acfer 082	CV3	25,08	1/10	12,54
015	Acfer 086	CV3	36,67	1/10	18,34
016	Acfer 207	CH3	25,19	1/10	12,60
017	Blank		20,06	1/10	10,03
018	Dhurmsala	LL6	32,86	1/100	164,30
019	Naragh	H6	3,74	1/100	18,71
020	Naragh	H6	22,55	1/100	112,75
021	Dhurmsala	LL6	3,75	1/100	18,77
022	Dhurmsala	LL6	22,38	1/100	111,90
023	Morávka 2	H5-6	3,64	1/100	18,22
024	Morávka 2	H5-6	13,69	1/100	68,45
025	Blank		3,24	1/100	16,22
026	ALH 84001	OPX	3,56	1/100	17,80
027	EETA 79001	LhSh	4,31	1/100	21,53
028	Nakhla	Nak	7,27	1/100	36,35
029	Shergotty	BaSh	5,68	1/100	28,40
030	Chassigny	Ch	3,37	1/100	16,83
031	Blank		3,26	1/100	16,28
032	Dhurmsala	LL6	3,81	1/100	19,03
033	Lafayette	Nak	6,32	1/100	31,60
034	Dhurmsala	LL6	3,71	1/100	18,55
035	Grüneberg	H4	3,62	1/100	18,10
036	Zagami	BaSh	3,90	1/100	19,48
037	ALH 77005	LhSh	6,67	1/100	33,35
038	Gov. Valadares	Nak	6,09	1/100	30,45
039	SaU 005	BaSh	4,68	1/100	23,38
040	Blank		6,55	1/50	16,38
041	Dhurmsala	LL6	3,58	1/100	17,88
042	Dhurmsala	LL6	5,13	1/50	12,83
043	Dhurmsala 4	LL6	2,51	1/500	62,75
044	Sikhote Alin	IIB	2,20	1/500	54,88
045	Morávka 1	H5-6	5,64	1/50	14,10
046	Morávka 2	H5-6	5,82	1/50	14,55
047	Naragh	H6	5,19	1/50	12,98
048	Neuschwanstein	EL6	4,49	1/50	11,22
049	Blank		4,75	1/50	11,87

Tabelle A.4: Ergebnisse der ICP-OES-Analysen von Fe.

Probe Nr.	Meteorit	Klasse	Fe		
			Konz. Messlsg [µg/ml]	Verdünnung D der Messlsg.	Trägermasse [mg]
001	Dhurmsala	LL6	8496,00	1	424,80
002	Naragh	H6	190,90	1/5	47,73
003	Acfer 086	CV3	139,90	1/5	34,98
004	Acfer 186	CR2	93,60	1/10	46,80
005	Blank		0,00	1/10	0,00
006	Allende	CV3	73,90	1/10	36,95
007	Dhurmsala	LL6	61,50	1/10	30,75
008	Acfer 186	CR2	119,70	1/10	59,85
009	Naragh	H6	78,50	1/10	39,25
010	Morávka 1	H5-6	85,60	1/10	42,80
011	Blank		2,02	1/10	1,01
012	Dhurmsala	LL6	54,10	1/10	27,05
013	Murchison	CM2	70,80	1/10	35,40
014	Acfer 082	CV3	74,10	1/10	37,05
015	Acfer 086	CV3	66,90	1/10	33,45
016	Acfer 207	CH3	108,90	1/10	54,45
017	Blank		2,19	1/10	1,09
018	Dhurmsala	LL6	7,20	1/100	36,00
019	Naragh	H6	6,26	1/100	31,30
020	Naragh	H6	9,22	1/100	46,10
021	Dhurmsala	LL6	6,17	1/100	30,85
022	Dhurmsala	LL6	7,29	1/100	36,45
023	Morávka 2	H5-6	9,48	1/100	47,40
024	Morávka 2	H5-6	12,23	1/100	61,15
025	Blank		0,25	1/100	1,25
026	ALH 84001	OPX	3,67	1/100	18,35
027	EETA 79001	LhSh	3,64	1/100	18,20
028	Nakhla	Nak	6,11	1/100	30,55
029	Shergotty	BaSh	5,85	1/100	29,25
030	Chassigny	Ch	8,05	1/100	40,25
031	Blank		0,26	1/100	1,28
032	Dhurmsala	LL6	7,65	1/100	38,25
033	Lafayette	Nak	6,22	1/100	31,10
034	Dhurmsala	LL6	6,05	1/100	30,25
035	Grüneberg	H4	6,71	1/100	33,55
036	Zagami	BaSh	4,65	1/100	23,23
037	ALH 77005	LhSh	7,38	1/100	36,90
038	Gov. Valadares	Nak	4,42	1/100	22,12
039	SaU 005	BaSh	4,81	1/100	24,06
040	Blank		0,49	1/50	1,22
041	Dhurmsala	LL6	6,02	1/100	30,10
042	Dhurmsala	LL6	12,75	1/50	31,88
043	Dhurmsala 4	LL6	4,28	1/500	107,10
044	Sikhote Alin	IIB	21,23	1/500	530,75
045	Morávka 1	H5-6	23,34	1/50	58,35
046	Morávka 2	H5-6	24,88	1/50	62,20
047	Naragh	H6	19,47	1/50	48,68
048	Neuschwanstein	EL6	23,22	1/50	58,05
049	Blank		0,48	1/50	1,19

Tabelle A.5: Ergebnisse der ICP-OES-Analysen von Mn.

Probe Nr.	Meteorit	Klasse	Mn		
			Konz. Messlsg [µg/ml]	Verdünnung D der Messlsg.	Trägermasse [mg]
001	Dhurmsala	LL6	10,76	1	0,54
002	Naragh	H6	2,11	1/5	0,53
003	Acfer 086	CV3	0,85	1/5	0,21
004	Acfer 186	CR2	0,64	1/10	0,32
005	Blank		0,00	1/10	0,00
006	Allende	CV3	2,53	1/10	1,27
007	Dhurmsala	LL6	3,05	1/10	1,53
008	Acfer 186	CR2	3,01	1/10	1,51
009	Naragh	H6	2,79	1/10	1,40
010	Morávka 1	H5-6	2,78	1/10	1,39
011	Blank		1,98	1/10	0,99
012	Dhurmsala	LL6	3,01	1/10	1,50
013	Murchison	CM2	2,82	1/10	1,41
014	Acfer 082	CV3	2,63	1/10	1,31
015	Acfer 086	CV3	2,60	1/10	1,30
016	Acfer 207	CH3	2,47	1/10	1,24
017	Blank		2,05	1/10	1,02
018	Dhurmsala	LL6	0,34	1/100	1,72
019	Naragh	H6	0,32	1/100	1,61
020	Naragh	H6	0,33	1/100	1,64
021	Dhurmsala	LL6	0,34	1/100	1,68
022	Dhurmsala	LL6	0,35	1/100	1,75
023	Morávka 2	H5-6	0,32	1/100	1,59
024	Morávka 2	H5-6	0,32	1/100	1,60
025	Blank		0,24	1/100	1,21
026	ALH 84001	OPX	1,31	1/100	6,53
027	EETA 79001	LhSh	1,31	1/100	6,53
028	Nakhla	Nak	1,35	1/100	6,77
029	Shergotty	BaSh	1,37	1/100	6,83
030	Chassigny	Ch	1,35	1/100	6,76
031	Blank		1,21	1/100	6,06
032	Dhurmsala	LL6	1,32	1/100	6,60
033	Lafayette	Nak	1,34	1/100	6,68
034	Dhurmsala	LL6	1,28	1/100	6,39
035	Grüneberg	H4	1,26	1/100	6,29
036	Zagami	BaSh	1,29	1/100	6,44
037	ALH 77005	LhSh	1,36	1/100	6,78
038	Gov. Valadares	Nak	1,28	1/100	6,40
039	SaU 005	BaSh	1,31	1/100	6,56
040	Blank		2,29	1/50	5,72
041	Dhurmsala	LL6	1,24	1/100	6,20
042	Dhurmsala	LL6	2,58	1/50	6,46
043	Dhurmsala 4	LL6	1,27	1/500	31,65
044	Sikhote Alin	IIB	1,17	1/500	29,18
045	Morávka 1	H5-6	2,59	1/50	6,48
046	Morávka 2	H5-6	2,56	1/50	6,40
047	Naragh	H6	2,46	1/50	6,14
048	Neuschwanstein	EL6	2,38	1/50	5,95
049	Blank		2,35	1/50	5,86

Tabelle A.6: Ergebnisse der ICP-OES-Analysen von Ni.

Probe Nr.	Meteorit	Klasse	Ni		
			Konz. Messlsg [µg/ml]	Verdünnung D der Messlsg.	Trägermasse [mg]
001	Dhurmsala	LL6	18,43	1	0,92
002	Naragh	H6	14,03	1/5	3,51
003	Acfer 086	CV3	2,51	1/5	0,63
004	Acfer 186	CR2	5,46	1/10	2,73
005	Blank		0,00	1/10	0,00
006	Allende	CV3	6,33	1/10	3,17
007	Dhurmsala	LL6	3,47	1/10	1,73
008	Acfer 186	CR2	8,95	1/10	4,48
009	Naragh	H6	6,79	1/10	3,40
010	Morávka 1	H5-6	7,70	1/10	3,85
011	Blank		2,00	1/10	1,00
012	Dhurmsala	LL6	3,49	1/10	1,75
013	Murchison	CM2	6,24	1/10	3,12
014	Acfer 082	CV3	5,82	1/10	2,91
015	Acfer 086	CV3	3,27	1/10	1,63
016	Acfer 207	CH3	9,18	1/10	4,59
017	Blank		2,06	1/10	1,03
018	Dhurmsala	LL6	0,39	1/100	1,93
019	Naragh	H6	0,59	1/100	2,93
020	Naragh	H6	0,81	1/100	4,03
021	Dhurmsala	LL6	0,36	1/100	1,80
022	Dhurmsala	LL6	0,40	1/100	2,02
023	Morávka 2	H5-6	0,81	1/100	4,06
024	Morávka 2	H5-6	0,99	1/100	4,95
025	Blank		0,23	1/100	1,14
026	ALH 84001	OPX	1,14	1/100	5,72
027	EETA 79001	LhSh	1,14	1/100	5,71
028	Nakhla	Nak	1,14	1/100	5,68
029	Shergotty	BaSh	1,15	1/100	5,76
030	Chassigny	Ch	1,15	1/100	5,76
031	Blank		1,14	1/100	5,69
032	Dhurmsala	LL6	1,31	1/100	6,56
033	Lafayette	Nak	1,14	1/100	5,69
034	Dhurmsala	LL6	0,93	1/100	4,64
035	Grüneberg	H4	1,18	1/100	5,91
036	Zagami	BaSh	0,79	1/100	3,93
037	ALH 77005	LhSh	0,79	1/100	3,97
038	Gov. Valadares	Nak	0,79	1/100	3,95
039	SaU 005	BaSh	0,81	1/100	5,69
040	Blank		1,60	1/50	3,99
041	Dhurmsala	LL6	0,92	1/100	4,58
042	Dhurmsala	LL6	2,52	1/50	6,30
043	Dhurmsala 4	LL6	1,30	1/500	32,48
044	Sikhote Alin	IIB	2,40	1/500	60,05
045	Morávka 1	H5-6	3,70	1/50	9,26
046	Morávka 2	H5-6	3,64	1/50	9,10
047	Naragh	H6	3,47	1/50	8,67
048	Neuschwanstein	EL6	3,70	1/50	9,26
049	Blank		2,27	1/50	5,68

Tabelle A.7: Gemessene ^{10}Be -Konzentrationen in Meteoriten. Die horizontale Gruppierung fasst jeweils Proben zusammen, die gemeinsam in einem Set parallel aufgearbeitet wurden.

Nr.	Proben-Name	Klasse	Be				
			Be-10/ Be-9 [1E-12]	relativer AMS-Fehler [%]	Proben- masse [g]	Träger- masse [mg]	A _{spez.} (Be-10) [dpm/kg]
001	Dhurmsala	LL6	53,35	1,2	0,20757	1,38	20,7 ± 1,6
002	Naragh	H6	37,07	1,5	0,20583	1,68	17,6 ± 1,4
003	Acfer 086	CV3	32,52	0,9	0,16647	1,32	15,0 ± 1,2
004	Acfer 186	CR2	31,75	1,0	0,17952	1,92	19,8 ± 1,5
005	Blank 005		0,28	3,4	-	1,36	-
006	Allende	CV3	40,19	1,0	0,1447	1,06	17,2 ± 1,3
007	Dhurmsala	LL6	60,5	0,9	0,1624	1,03	22,3 ± 1,7
008	Acfer 186	CR2	79,68	1,2	0,2267	1,02	20,9 ± 1,6
009	Naragh	H6	40,76	0,9	0,13445	1,06	18,7 ± 1,4
010	Morávka 1	H5-6	42,25	0,9	0,13393	1,02	18,8 ± 1,4
011	Blank 011		0,07	10,5	-	1,01	-
012	Dhurmsala	LL6	52,04	1,1	0,13898	1,04	22,8 ± 1,8
013	Murchison	CM2	26,55	1,6	0,15071	1,08	11,1 ± 0,9
014	Acfer 082	CV3	21,52	1,1	0,15022	1,04	8,7 ± 0,7
015	Acfer 086	CV3	37,73	2,0	0,14483	1,04	15,9 ± 1,3
016	Acfer 207	CH3	42,05	1,3	0,15072	1,03	16,8 ± 1,3
017	Blank 017		0,08	13,2	-	1,06	-
018	Dhurmsala	LL6	59,39	3,2	0,16851	1,09	22,3 ± 1,8
019	Naragh	H6	31,68	3,1	0,10442	1,17	20,7 ± 1,7
020	Naragh	H6	37,69	3,6	0,13514	1,20	19,5 ± 1,6
021	Dhurmsala	LL6	24,4	3,1	0,1379	2,29	23,6 ± 1,9
022	Dhurmsala	LL6	60,37	3,1	0,16705	1,12	23,5 ± 1,9
023	Morávka2	H5-6	35,28	3,2	0,12755	1,14	18,3 ± 1,5
024	Morávka2	H5-6	38,46	3,1	0,14493	1,12	17,4 ± 1,4
025	Blank 025		0,04	8,1	-	1,12	-
026	ALH84001	Opx	18,76	3,1	0,10619	2,24	23,1 ± 1,9
027	EETA79001	LhSh	3,91	3,5	0,09533	2,24	5,3 ± 0,4
028	Nakhla	Nak	31,97	3,1	0,16818	2,23	24,7 ± 2,0
029	Shergotty	BaSh	19,46	3,1	0,15415	2,26	16,6 ± 1,4
030	Chassigny	Ch	28,72	3,1	0,16187	2,19	22,7 ± 1,9
031	Blank 031		0,05	10,1	-	2,22	-
032	Dhurmsala	LL6	31,21	3,2	0,17554	2,24	23,3 ± 1,9
033	Lafayette	Nak	23,51	3,2	0,14485	2,22	21,0 ± 1,7
034	Dhurmsala	LL6	22,75	3,4	0,13758	2,27	21,9 ± 1,8
035	Grüneberg	H4	21,07	3,3	0,11849	2,23	23,1 ± 1,9
036	Zagami	BaSh	9,89	3,4	0,19144	2,23	6,7 ± 0,6
037	ALH77005	LhSh	25,43	3,3	0,12849	2,34	27,0 ± 2,2
038	Gov. Valadares	Nak	21,75	3,2	0,1179	2,22	23,9 ± 2,0
039	SaU 005	BaSh	15,02	3,2	0,14313	2,21	13,5 ± 1,1
040	Blank 040		0,04	34,2	-	2,21	-
041	Dhurmsala	LL6	24,22	3,1	0,1401	2,16	21,8 ± 1,8
042	Dhurmsala	LL6	27,79	3,0	0,15912	2,17	22,1 ± 1,8
043	Dhurmsala 4	LL6	18,81	3,4	0,51012	11,20	24,1 ± 2,0
044	Sikhote Alin	IIB	1,62	3,3	0,50434	10,99	2,1 ± 0,2
045	Morávka 1	H5-6	33,32	3,0	0,20025	2,23	21,7 ± 1,8
046	Morávka 2	H5-6	43,08	3,0	0,27119	2,13	19,7 ± 1,6
047	Naragh	H6	20,73	3,0	0,14299	2,20	18,6 ± 1,5
048	Neuschwanstein	E6	23,17	3,0	0,14998	2,16	19,5 ± 1,6
049	Blank 049		0,01	3,0	-	2,24	-

Tabelle A.8: Gemessene ^{26}Al -Konzentrationen in Meteoriten. Die horizontale Gruppierung fasst jeweils Proben zusammen, die gemeinsam in einem Set parallel aufgearbeitet wurden.

Nr.	Proben-Name	Klasse [MET03]	Al		Proben- Masse [g]	Träger- masse [mg]	$A_{\text{spez.}}$ (Al-26) [dpm/kg]
			Al-26/ Al-27 [1E-12]	Relativer AMS-Fehler [%]			
001	Dhurmsala	LL6	100,03	1,0	0,20757	3,47	68,7 ± 5,3
002	Naragh	H6	63,87	1,4	0,20583	3,68	46,9 ± 3,6
003	Acfer 086	CV3	39,13	2,0	0,16647	4,33	41,8 ± 3,3
004	Acfer 186	CR2	63,04	1,4	0,17952	3,60	51,9 ± 4,0
005	Blank 005		0,03	42,7	-	1,34	-
006	Allende	CV3	54,46	1,7	0,1447	3,53	54,6 ± 4,3
007	Dhurmsala	LL6	98,69	1,4	0,1624	2,98	74,3 ± 5,8
008	Acfer 186	CR2	71,11	2,5	0,2267	4,15	53,5 ± 4,3
009	Naragh	H6	63,99	1,7	0,13445	2,46	48,2 ± 3,8
010	Morávka 1	H5-6	88,07	2,2	0,13393	2,35	63,5 ± 5,0
011	Blank 011		0,02	44,3	-	0,97	-
012	Dhurmsala	LL6	93,49	1,4	0,13898	2,73	75,4 ± 5,8
013	Murchison	CM2	49,03	4,2	0,15071	2,89	38,6 ± 3,4
014	Acfer 082	CV3	35,1	2,9	0,15022	3,45	33,1 ± 2,7
015	Acfer 086	CV3	50,89	2,2	0,14483	3,23	46,6 ± 3,7
016	Acfer 207	CH3	57,43	3,2	0,15072	2,54	39,7 ± 3,3
017	Blank 017		0,03	49,8	-	1,01	-
018	Dhurmsala	LL6	74,08	3,3	0,16851	3,87	69,8 ± 5,8
019	Naragh	H6	39,84	3,2	0,10442	3,45	54,1 ± 4,5
020	Naragh	H6	46,88	3,8	0,13514	3,71	52,9 ± 4,5
021	Dhurmsala	LL6	66,76	3,2	0,1379	3,93	78,1 ± 6,5
022	Dhurmsala	LL6	73,82	3,4	0,16705	4,25	77,2 ± 6,4
023	Morávka2	H5-6	52,79	3,0	0,12755	3,52	59,8 ± 4,9
024	Morávka2	H5-6	54,27	3,7	0,14493	3,59	55,2 ± 4,7
025	Blank 025		0,03	40,8	-	1,03	-
026	ALH 84001	Opx	66,27	3,2	0,10619	2,76	70,6 ± 5,8
027	EETA 79001	LhSh	19,39	5,6	0,09533	4,89	40,9 ± 3,9
028	Nakhla	Nak	95,72	3,2	0,16818	3,75	87,6 ± 7,2
029	Shergotty	BaSh	38,81	3,3	0,15415	7,73	80,0 ± 6,6
030	Chassigny	Ch	78,4	3,2	0,16187	2,47	49,1 ± 4,1
031	Blank		0,08	34	-	2,07	-
032	Dhurmsala	LL6	75,84	3,2	0,17554	4,41	78,3 ± 6,5
033	Lafayette	Nak	84,48	3,0	0,14485	3,37	80,7 ± 6,6
034	Dhurmsala	LL6	66,44	3,0	0,13758	3,91	77,5 ± 6,3
035	Grüneberg	H4	61,36	3,2	0,11849	3,54	75,2 ± 6,2
036	Zagami	BaSh	46,48	3,4	0,19144	3,45	34,4 ± 2,9
037	ALH77005	LhSh	49,78	3,1	0,12849	0,71	11,3 ± 0,9
038	Gov. Valadares	ANAK	72,92	3,2	0,1179	3,33	84,5 ± 7,0
039	SaU 005	BaSh	27,92	3,6	0,14313	5,89	47,2 ± 4,0
040	Blank		0,55	>22	-	2,12	-
041	Dhurmsala	LL6	66,14	3,3	0,1401	3,63	70,3 ± 5,8
042	Dhurmsala	LL6	69,64	3,1	0,15912	3,84	69,1 ± 5,7
043	Dhurmsala 4	LL6	52,96	3,2	0,51012	18,43	78,6 ± 6,5
044	Sikhote Alin	IIB	1,99	6,1	0,50434	10,28	1,7 ± 0,2
045	Morávka 1	H5-6	79,28	3,2	0,20025	4,58	74,5 ± 6,2
047	Naragh	H6	46,06	3,6	0,14995	3,70	46,7 ± 3,9
048	Neuschwanstein	E6	64,95	3,4	0,14995	3,37	59,9 ± 5,0
049	Blank		0,05	18,9	-	4,39	-

Tabelle A.9: Gemessene ^{53}Mn -Konzentrationen in Meteoriten. Zusammengefasst sind die Proben, die innerhalb eines Probensets chemisch aufgearbeitet wurden.

Nr.	Probenname	Klasse [MET03]	Mn				$A_{\text{spez.}}$ [dpm/kg Fe]
			Mn-53/ Mn-55	relativer AMS-Fehler [%]	$C_{\text{Messlsg.}}$ (Mn) [$\mu\text{g/ml}$]	$C_{\text{Messlsg.}}$ (Fe) [$\mu\text{g/ml}$]	
026	ALH84001	Opx	1,84E-10	8,5	1,306	3,67	252,5 ± 30,3
027	EETA79001	LhSh	2,88E-11	7,3	1,305	3,639	39,9 ± 4,5
028	Nakhla	Nak	4,48E-10	6,8	1,354	6,11	383,5 ± 41,7
029	Shergotty	BaSh	1,77E-10	6,3	1,365	5,85	159,6 ± 16,9
030	Chassigny	Ch	3,96E-10	5,7	1,351	8,05	256,9 ± 26,3
033	Lafayette	Nak	3,83E-10	7,3	1,336	6,22	317,5 ± 35,5
035	Grüneberg	H4	6,07E-10	9,8	1,258	6,71	439,4 ± 57,0
036	Zagami	BaSh	2,81E-10	6,4	1,355	4,646	316,7 ± 33,7
037	ALHA77005	LhSh	1,88E-10	8,6	1,288	7,38	126,5 ± 14,8
038	Gov. Valadares	Nak	4,59E-10	8,3	1,28	4,424	513,4 ± 60,9
039	SaÜ 005	BaSh	7,08E-11	7,8	1,311	4,811	74,6 ± 8,6
045	Morávka 1	H5-6	9,08E-10	7,3	2,592	23,34	389,5 ± 43,6
046	Morávka 2	H5-6	9,93E-10	7,6	2,561	24,88	394,8 ± 45,0
047	Naragh	H6	6,49E-10	7,5	2,457	19,47	316,1 ± 35,8
048	Neuschwanstein	EL6	1,42E-09	9,9	2,378	23,22	563,0 ± 73,4

Tabelle A.10: Zählraten für die Messung der ^{26}Al und ^{22}Na -Aktivitäten von Morávka mittels γ - γ -Koinzidenzspektrometrie und γ -Spektroskopie. Angegeben sind Nettozählraten Z in min^{-1} , der Untergrund wurde also schon subtrahiert sowie die Peakflächen F der entsprechenden γ -Linien. Es wurden unabhängige Messungen dreier ^{22}Na -Aktivitäten und dreier daraus hergestellter Dummy-Meteoriten durchgeführt. Die aus den Zählraten abgeleiteten Geometrie-Faktoren stimmten im Rahmen der Fehler überein.

	Untergrund [min^{-1}]	Z_{Probe} [min^{-1}]	$Z_{\text{Al-26}}$ [min^{-1}]	F_{1274}	F_{1809}	$Z_{\text{Na-22}}$ [min^{-1}]	Z_{Dummy} [min^{-1}]
Messung 1	0,112 ± 0,004	0,417 ± 0,010	66,924 ± 0,180	1222 ± 185	1100 ± 133	201,3 ± 1,8	112,6 ± 0,9
Messung 2	-	-	-	-	-	213,3 ± 1,5	124,1 ± 0,8
Messung 3	-	-	-	-	-	258,5 ± 1,3	155,6 ± 0,6

Tabelle A.11: Zusammenstellung der PGAA-Ergebnisse von Dhurmsala. Dasselbe Material wurde auch als Intra-Laboratoriumsstandard für die AMS-Messungen verwendet.

Dhurmsala, Masse der Probe: 305,46 mg, Messzeit: 10284 s						
Element	rel. Zus. [%]	rel. Fehler [%]	abs. Fehler	Element/Silizium	rel. Fehler [%]	Abs. Fehler
H	6,70E-02	2,2	1,51E-03	3,98E-03	4,5	1,80E-04
B	<0.0001					
O	4,60E+01	11,0	5,07E+00	2,73E+00	11,7	3,19E-01
Na	6,87E-01	1,6	1,07E-02	4,08E-02	4,2	1,72E-03
Mg	1,40E+01	5,8	8,16E-01	8,32E-01	7,0	5,84E-02
Al	1,03E+00	3,4	3,51E-02	6,12E-02	5,2	3,18E-03
Si	1,69E+01	3,9	6,62E-01	1	5,6	5,56E-02
S	2,20E+00	2,3	5,12E-02	1,30E-01	4,6	5,95E-03
Cl	7,75E-03	5,5	4,26E-04	4,60E-04	6,8	3,11E-05
K	8,30E-02	7,5	6,25E-03	4,92E-03	8,5	4,18E-04
Ca	1,23E+00	3,9	4,83E-02	7,29E-02	5,6	4,05E-03
Ti	6,44E-02	10,0	6,44E-03	3,82E-03	10,7	4,10E-04
Cr	3,72E-01	2,9	1,10E-02	2,21E-02	4,9	1,08E-03
Mn	2,57E-01	1,9	4,89E-03	1,52E-02	4,4	6,64E-04
Fe	1,66E+01	3,6	5,90E-01	9,84E-01	5,3	5,21E-02
Co	1,98E-02	3,1	6,07E-04	1,17E-03	5,0	5,85E-05
Ni	4,31E-01	2,4	1,05E-02	2,56E-02	4,6	1,18E-03
Sm	1,36E-05	17,9	2,43E-06	8,05E-07	18,4	1,48E-07
Gd	2,98E-05	5,7	1,69E-06	1,77E-06	6,9	1,22E-07

Tabelle A.12: Zusammenstellung der PGAA-Ergebnisse von Dhurmsala 4. Dabei handelt es sich um dasselbe Probenmaterial wie auch das bei den ¹⁰Be- und ²⁶Al-AMS-Messungen als Nr. 043 (siehe Tabellen A.2 und A.3) analysierte.

Dhurmsala 4, Masse der Probe: 855,4 mg, Messzeit: 6553 s						
Element	Rel. Zus. [%]	rel. Fehler [%]	abs. Fehler	Element/Silizium	rel. Fehler [%]	abs. Fehler
H	8,52E-02	2,6	2,22E-03	4,01E-03	3,8	1,52E-04
B	1,10E-04	1,9	2,12E-06	5,16E-06	3,4	1,74E-07
O	3,10E+01	21,6	6,69E+00	1,46E+00	21,7	3,17E-01
Na	8,80E-01	1,7	1,52E-02	4,14E-02	3,3	1,35E-03
Mg	1,77E+01	5,3	9,42E-01	8,31E-01	6,0	4,99E-02
Al	1,13E+00	4,2	4,81E-02	5,33E-02	5,1	2,70E-03
Si	2,13E+01	2,8	5,87E-01	1	3,9	3,90E-02
S	2,20E+00	2,5	5,50E-02	1,04E-01	3,7	3,86E-03
Cl	4,28E-03	11,5	4,91E-04	2,01E-04	11,8	2,38E-05
K	1,09E-01	5,0	5,46E-03	5,13E-03	5,7	2,93E-04
Ca	1,54E+00	4,0	6,11E-02	7,22E-02	4,8	3,50E-03
Ti	7,90E-02	10,0	7,90E-03	3,72E-03	10,4	3,86E-04
Cr	5,25E-01	2,7	1,42E-02	2,47E-02	3,9	9,54E-04
Mn	3,19E-01	1,9	5,93E-03	1,50E-02	3,3	4,99E-04
Fe	2,19E+01	2,4	5,18E-01	1,03E+00	3,6	3,74E-02
Co	5,99E-02	2,2	1,30E-03	2,82E-03	3,5	9,90E-05
Ni	1,27E+00	1,8	2,23E-02	5,95E-02	3,3	1,95E-03
Sm	3,26E-05	9,7	3,16E-06	1,53E-06	10,1	1,55E-07
Gd	5,64E-05	5,6	3,15E-06	2,65E-06	6,2	1,65E-07

Tabelle A.13: Zusammenstellung der PGAA-Ergebnisse von Grüneberg. Dabei handelt es sich um dasselbe Probenmaterial wie auch das bei den ^{10}Be -, ^{26}Al - und ^{53}Mn -AMS-Messungen analysierte.

Grüneberg, Masse der Probe: 65,1 mg, Messzeit: 52406 s						
Element	rel. Zus. [%]	rel. Fehler [%]	abs. Fehler	Element/Silizium	rel. Fehler [%]	abs. Fehler
H	5,28E-02	4,4	2,34E-03	3,06E-03	5,1	1,57E-04
B	<0.0001					
O	3,70E+01	18,3	6,78E+00	2,14E+00	18,5	3,97E-01
Na	6,70E-01	3,8	2,54E-02	3,88E-02	4,6	1,79E-03
Mg	1,40E+01	5,4	7,56E-01	8,09E-01	6,0	4,87E-02
Al	9,54E-01	5,0	4,81E-02	5,52E-02	5,7	3,14E-03
Si	1,73E+01	2,6	4,53E-01	1	3,7	3,71E-02
S	2,32E+00	2,4	5,54E-02	1,34E-01	3,5	4,76E-03
Cl	8,04E-03	9,4	7,53E-04	4,66E-04	9,7	4,53E-05
K	9,91E-02	8,5	8,45E-03	5,74E-03	8,9	5,12E-04
Ca	1,25E+00	4,3	5,35E-02	7,21E-02	5,0	3,63E-03
Ti	5,94E-02	10,0	5,94E-03	3,44E-03	10,3	3,56E-04
Cr	3,45E-01	3,1	1,09E-02	2,00E-02	4,1	8,19E-04
Mn	2,68E-01	1,9	5,23E-03	1,55E-02	3,3	5,08E-04
Fe	2,41E+01	2,4	5,80E-01	1,40E+00	3,6	4,97E-02
Co	7,12E-02	2,1	1,51E-03	4,12E-03	3,4	1,39E-04
Ni	1,52E+00	1,9	2,91E-02	8,79E-02	3,2	2,86E-03
Sm	2,53E-05	47,4	1,20E-05	1,47E-06	47,4	6,95E-07
Gd	2,39E-05	8,1	1,95E-06	1,39E-06	8,5	1,18E-07

Tabelle A.14: Zusammenstellung der PGAA-Ergebnisse von Morávka. Dabei handelt es sich um dasselbe Probenmaterial wie auch das bei den ^{10}Be -, ^{26}Al - und ^{53}Mn -AMS-Messungen analysierte (vergleiche Tabellen A.2, A.3 und A.4).

Morávka, Masse der Probe: 124,8 mg, Messzeit: 40000 s						
Element	rel. Zus. [%]	rel. Fehler [%]	abs. Fehler	Element/Silizium	rel. Fehler [%]	abs. Fehler
H	2,04E-02	3,9	7,98E-04	1,61E-03	4,6	7,43E-05
B	<0.0001					
O	4,06E+01	13,4	5,45E+00	3,21E+00	13,7	4,38E-01
Na	5,11E-01	2,5	1,29E-02	4,04E-02	3,5	1,42E-03
Mg	1,12E+01	5,2	5,88E-01	8,85E-01	5,8	5,12E-02
Al	7,29E-01	3,5	2,54E-02	5,76E-02	4,3	2,45E-03
Si	1,27E+01	2,4	3,09E-01	1	3,5	3,46E-02
S	1,51E+00	2,4	3,57E-02	1,19E-01	3,4	4,05E-03
Cl	1,13E-02	5,9	6,60E-04	8,91E-04	6,3	5,65E-05
K	5,98E-02	7,8	4,64E-03	4,72E-03	8,1	3,84E-04
Ca	8,10E-01	4,4	3,54E-02	6,40E-02	5,0	3,20E-03
Ti	4,97E-02	10,0	4,97E-03	3,93E-03	10,3	4,04E-04
Cr	2,73E-01	3,1	8,49E-03	2,16E-02	4,0	8,53E-04
Mn	2,01E-01	1,9	3,83E-03	1,59E-02	3,1	4,92E-04
Fe	2,91E+01	2,3	6,81E-01	2,30E+00	3,4	7,79E-02
Co	1,02E-01	1,7	1,73E-03	8,09E-03	3,0	2,40E-04
Ni	2,15E+00	1,7	3,71E-02	1,70E-01	3,0	5,08E-03
Sm	1,36E-05	14,2	1,93E-06	1,08E-06	14,4	1,55E-07
Gd	1,91E-05	6,8	1,29E-06	1,51E-06	7,2	1,09E-07

B. Daten und Ergebnisse der Produktionsraten-Messungen

Die Strahlzeit betrug bei allen Experimenten 452600 s, die Produktionsraten sind auf einen Protonenfluss von $1 \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2}$ normiert.

Tabelle B.1: ^{10}Be -Produktionsraten der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Dicktarget-Analysen. Die Spalte „Tiefe“ ist die Tiefe des Targets unter der Kugeloberfläche. Die Spalte „Träger“ beinhaltet die zugesetzte Trägermasse, die Spalte „Flussdichte“ die Protonenflussdichte an den einzelnen Folien, die Spalte „Be-10/Be-9“ ist das per AMS gemessene Isotopenverhältnis. Die Spalte „P(Be-10)“ beinhaltet die Produktionsrate vom ^{10}Be .

Probe	Fe [mg]	Tiefe [cm]	Träger [mg Be]	Flussd. [$cm^{-2} \cdot s^{-1}$]	Be-10/Be-9	P (Be-10) [dpm/kg Ni]
FE048F	329,73	6,24	3,00	$5,75 \cdot 10^8$	$(8,50 \pm 0,34) \cdot 10^{-13}$	$1,19 \pm 0,14$
FE058F	329,69	7,61	3,00	$5,75 \cdot 10^8$	$(7,80 \pm 0,34) \cdot 10^{-13}$	$1,09 \pm 0,13$
FE078F	341,12	9,75	3,00	$5,75 \cdot 10^8$	$(8,20 \pm 0,39) \cdot 10^{-13}$	$1,11 \pm 0,13$

Probe	Ni [mg]	Tiefe [cm]	Träger [mg Be]	Flussd. [$cm^{-2} \cdot s^{-1}$]	Be-10/Be-9	P (Be-10) [dpm/kg Ni]
NI016F	381,42	0,84	3,00	$5,52 \cdot 10^8$	$(7,00 \pm 0,25) \cdot 10^{-13}$	$0,88 \pm 0,10$
NI026F	380,19	2,39	3,00	$5,67 \cdot 10^8$	$(6,96 \pm 0,26) \cdot 10^{-13}$	$0,86 \pm 0,10$
NI038F	377,77	4,63	3,00	$5,72 \cdot 10^8$	$(7,32 \pm 0,31) \cdot 10^{-13}$	$0,90 \pm 0,11$
NI059F	381,99	8,02	3,00	$5,75 \cdot 10^8$	$(7,00 \pm 0,30) \cdot 10^{-13}$	$0,85 \pm 0,10$
NI079F	382,15	9,86	3,00	$5,75 \cdot 10^8$	$(6,73 \pm 0,28) \cdot 10^{-13}$	$0,81 \pm 0,10$

Tabelle B.2: ^{26}Al -Produktionsraten der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Dicktarget-Analysen. Die Spalte „Al-26/Al-27“ ist das per AMS gemessene Isotopenverhältnis. Die Spalte „P(Al-26)“ beinhaltet die Produktionsrate vom ^{26}Al .

Probe	Fe [mg]	Tiefe [cm]	Träger [mg Al]	Flussd. [$cm^{-2} \cdot s^{-1}$]	Al-26/Al-27	P (Al-26) [dpm/kg Fe]
FE058F	329,69	7,61	3,00	$5,75 \cdot 10^8$	$(2,18 \pm 0,07) \cdot 10^{-11}$	$1,02 \pm 0,12$
FE078F	341,12	9,75	3,00	$5,75 \cdot 10^8$	$(2,30 \pm 0,09) \cdot 10^{-11}$	$1,04 \pm 0,12$

Probe	Ni [mg]	Tiefe [cm]	Träger [mg Al]	Flussd. [$cm^{-2} \cdot s^{-1}$]	Al-26/Al-27	P (Al-26) [dpm/kg Ni]
NI016F	381,42	0,84	3,00	$5,52 \cdot 10^8$	$(2,48 \pm 0,08) \cdot 10^{-11}$	$1,05 \pm 0,12$
NI026F	380,19	2,39	3,00	$5,67 \cdot 10^8$	$(2,36 \pm 0,08) \cdot 10^{-11}$	$0,97 \pm 0,11$
NI038F	377,77	4,63	3,00	$5,72 \cdot 10^8$	$(2,55 \pm 0,09) \cdot 10^{-11}$	$1,05 \pm 0,12$
NI059F	381,99	8,02	3,00	$5,75 \cdot 10^8$	$(2,39 \pm 0,08) \cdot 10^{-11}$	$0,97 \pm 0,11$
NI079F	382,15	9,86	3,00	$5,75 \cdot 10^8$	$(2,50 \pm 0,09) \cdot 10^{-11}$	$1,01 \pm 0,12$

Tabelle B.3: ^{41}Ca -Produktionsraten der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Dicktarget-Analysen. Die Spalte „Ca-41/Ca-40“ ist das per AMS gemessene Isotopenverhältnis. Die Spalte „P(Ca-41)“ beinhaltet die Produktionsrate vom ^{41}Ca .

Probe	Fe [mg]	Tiefe [cm]	Träger [mg Ca]	Flussd. [$\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	Ca-41/Ca-40	P(Ca-41) [dpm/kg Fe]
FE048F	329,73	6,24	20,00	$5,75 \cdot 10^8$	$(2,80 \pm 0,11) \cdot 10^{-11}$	$5,69 \pm 0,23$
FE058F	329,69	7,61	20,00	$5,75 \cdot 10^8$	$(2,73 \pm 0,11) \cdot 10^{-11}$	$5,57 \pm 0,22$
FE078F	341,12	9,75	20,00	$5,75 \cdot 10^8$	$(2,78 \pm 0,11) \cdot 10^{-11}$	$5,48 \pm 0,22$

Probe	Ni [mg]	Tiefe [cm]	Träger [mg Ca]	Flussd. [$\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	Ca-41/Ca-40	P(Ca-41) [dpm/kg Ni]
NI016F	381,42	0,84	20,00	$5,52 \cdot 10^8$	$(3,08 \pm 0,42) \cdot 10^{-11}$	$5,65 \pm 0,77$
NI026F	380,19	2,39	20,00	$5,67 \cdot 10^8$	$(2,77 \pm 0,12) \cdot 10^{-11}$	$4,97 \pm 0,22$
NI038F	377,77	4,63	20,00	$5,72 \cdot 10^8$	$(3,07 \pm 0,20) \cdot 10^{-11}$	$5,49 \pm 0,36$
NI059F	381,99	8,02	20,00	$5,75 \cdot 10^8$	$(3,00 \pm 0,12) \cdot 10^{-11}$	$5,28 \pm 0,21$

Tabelle B.4: ^{60}Fe -Produktionsraten der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Dicktarget-Analysen. Die Spalte „Fe-60/Fe-nat“ ist das per AMS gemessene Isotopenverhältnis. Die Spalte „P(Fe-60)“ beinhaltet die Produktionsrate vom ^{60}Fe .

Probe	Ni [mg]	Tiefe [cm]	Träger [mg Fe]	Flussd. [$\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	Fe-60/Fe-nat	P(Fe-60) [dpm/kg Ni]
NI016F	381,42	0,84	3,00	$5,52 \cdot 10^8$	$(5,79 \pm 0,26) \cdot 10^{-12}$	$0,118 \pm 0,005$
NI026F	380,19	2,39	3,00	$5,67 \cdot 10^8$	$(5,19 \pm 0,23) \cdot 10^{-12}$	$0,103 \pm 0,005$
NI038F	377,77	4,63	3,00	$5,72 \cdot 10^8$	$(6,48 \pm 0,29) \cdot 10^{-12}$	$0,129 \pm 0,006$
NI059F	381,99	8,02	3,00	$5,75 \cdot 10^8$	$(7,55 \pm 0,33) \cdot 10^{-12}$	$0,147 \pm 0,006$
NI079F	382,15	9,86	3,00	$5,75 \cdot 10^8$	$(6,78 \pm 0,30) \cdot 10^{-12}$	$0,132 \pm 0,006$

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde in der Zeit von März 2001 bis Dezember 2003 an der Abteilung Nuklearchemie durchgeführt.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. S. M. Qaim für die interessante Aufgabenstellung und das stetige Interesse an dieser Arbeit. Außerdem hat er sich in persönlichen Fragen stets als freundschaftlicher Ratgeber erwiesen.

Für das mir entgegengebrachte Vertrauen, seine stets „offene Tür“, seine engagierte Förderung und die dadurch unter anderem entstandenen Reisemöglichkeiten sowie viele fachliche und persönliche Gespräche bedanke ich mich besonders bei Herrn Dr. U. Herpers.

Bei Herrn Prof. Dr. H. Palme möchte ich mich für die offene Aufnahme in den Kreis seiner Mitarbeiter und für die intensiven Diskussionen bedanken, die dadurch entstanden sind.

Auch Prof. Dr. R. Michel stand jederzeit mit Rat und Tat zur Seite. Dafür danke ich ihm herzlich.

Dr. P. W. Kubik (ETH Zürich) sowie Dr. K. Knie und die übrige Arbeitsgruppe von Dr. G. Korschinek (TU-München) haben nicht nur die AMS-Messungen dieser Arbeit durchgeführt, sondern standen immer für fachliche Diskussionen zur Verfügung. Auch Ihnen möchte ich dafür danken.

Die Herren Dr. H.-A. Synal, J. Santos-Arevalo und Dr. Ch. Schnabel haben die ^{41}Ca -Messungen und die Präparation des CaH_2 durchgeführt wofür ich mich bedanke. Herrn Dr. Ch. Schnabel habe ich darüber hinaus viele weitere Impulse zu dieser Arbeit zu verdanken.

Bei Frau P. Kudejova bedanke ich mich für die Durchführung der PGAA-Messungen der Meteoritenproben.

Herrn PD Dr. I. Leya danke ich für die Durchführung der kernphysikalischen Rechnungen und die stete Diskussionsbereitschaft.

Frau Dr. M. Wadhwa vom Field Museum in Chicago stellte uns freundlicherweise Proben des Meteoriten Grüneberg zur Verfügung, wofür ich mich hiermit bedanken möchte.

Herrn Ing. Ch. Anger danke ich für die leihweise Überlassung einer Probe des Meteoriten Morávka für die Koinzidenzmessungen.

Bei Herrn Prof. L. Schultz möchte ich mich für Ergebnisse von Edelgasanalysen der Meteoriten Morávka und Neuschwanstein bedanken.

Ein besonderer Dank geht an Herrn Dr. H.-H. Fischer. Seine Hilfe bei der Durchsicht der Arbeit war unschätzbar. Weiterhin hat er als freundschaftlicher Kollege und für persönliche und fachliche Diskussionen jederzeit zur Verfügung gestanden. Seine spezielle Offenheit hat jede Zusammenarbeit mit ihm äußerst fruchtbar und angenehm gestaltet.

Herr Prof. Dr. K. Thiel hat mir bei vielen Fragen geholfen. Für seine stete Hilfs- und Diskussionsbereitschaft danke ich ihm.

Den Mitarbeitern des Arbeitskreises Kosmochemie des Instituts für Mineralogie und Geochemie der Universität zu Köln D. Hezel, P. Kegler, T. Schönbeck und I. Vogel möchte ich für intensive Diskussionen und sowie nette Abende danken. T. Schönbeck war mir bei den ICP-OES-Messungen besonders behilflich.

Ebenso möchte ich mich bei den Kollegen U. Otto und A. Reuter aus der Elektronikwerkstatt der Abteilung Nuklearchemie sowohl für das freundschaftliche Arbeitsklima als auch die besondere Hilfsbereitschaft bedanken. Gleiches gilt für die Kollegen W. Pyschny und M. Kreikler aus der feinmechanischen Werkstatt der Abteilung Nuklearchemie.

Eine besondere Erwähnung verdient mein Kollege E. Bolz. Er hat nicht nur die komplette Detektorelektronik der Abteilung Nuklearchemie instand gehalten und erweitert, sondern auch maßgeblich zum Gelingen spektroskopischer Messungen dieser Arbeit beigetragen. Durch seine besondere Kollegialität und Offenheit für Neues war die Zusammenarbeit mit ihm immer ein Vergnügen.

Schließlich haben auch einige Personen meines privaten Umfeldes zur Erstellung dieser Arbeit beigetragen. Zunächst ist meine Familie zu nennen. Mein Vater, der am 18.05.2001 plötzlich und unerwartet verstarb, meine Mutter und auch mein Bruder haben mir ein privates Umfeld geschaffen, das die Grundlage allen weiteren Handelns bildete. Außerdem ist in diesem Zusammenhang mein spezieller Freund Carlos Albuquerque zu erwähnen, dem ich Besonderes zu verdanken habe.

Letztlich geht ein Dank an alle Freundinnen und Freunde, die mir während der Promotion mit Rat, Hilfe, Gesprächen, Parties und vielem mehr einen Rückhalt jenseits des Berufs gaben.

Diese Arbeit wurde zum Teil von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

Erklärung

Ich versichere, dass ich die von mir vorgelegte Dissertation selbständig angefertigt, die benutzten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben und die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen –, die anderen Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, in jedem Einzelfall als Entlehnung kenntlich gemacht habe; dass diese Dissertation noch keiner anderen Fakultät oder Universität zur Prüfung vorgelegen hat; dass sie – abgesehen von unten angegebenen Teilpublikationen – noch nicht veröffentlicht worden ist sowie, dass ich eine solche Veröffentlichung vor Abschluss des Promotionsverfahrens nicht vornehmen werde. Die von mir vorgelegte Dissertation ist von Prof. Dr. Dr. h.c. S. M. Qaim betreut worden



Thomas Bastian

Teile dieser Arbeit wurden bereits bzw. werden in folgenden Publikationen veröffentlicht oder auf den entsprechenden Konferenzen vorgestellt:

T Bastian, U. Herpers, P. W. Kubik und R. Michel, Detailed Study of Cosmogenic Nuclides in Martian Meteorites, PSI Scientific Report 2003 (submitted).

T. Bastian, U. Herpers, P. W. Kubik und R. Michel, Cosmogenic Nuclides in Martian Meteorites, PSI Scientific Report 2002/Vol. I, Particles & Matter, 128 (2003), ISSN 1423-7296, March 2003.

T. Bastian, U. Herpers, P. W. Kubik, GAMS-Group Munich and R. Michel, Comprehensive Study of Cosmogenic Nuclides in Martian Meteorites, Meteor. Planet. Sci. 38, A94 (2003).

T. Bastian, U. Herpers, P. W. Kubik, GAMS-Gruppe München, Analyse und Modellierung kosmogener Radionuklide in Marsmeteoriten, GDCh-Jahrestagung Chemie 2003, München, 6. - 11. Oktober 2003.

C. Schnabel, H.-A. Synal, P. Gartenmann, F. J. Santos-Arevalo, I. Gomez-Martinez, M. Suter, A. Tarabishi, T. Bastian, F. Sudbrock, U. Herpers, I. Leya, M. Gloris und R. Michel, Proton-induced production cross sections and production rates of ^{41}Ca from Ni, Nucl. Instr. and Meth. (2003) (accepted for publication).

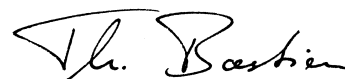
Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name: Thomas Bastian
Geburtsdatum: 11.01.1975
Geburtsort: Köln
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: ledig

Ausbildung und berufliche Tätigkeiten

1981 – 1985 Grundschule Friesenstraße Köln
1985 – 1986 Liebfrauenschule Köln
1986 – 1990 Apostelgymnasium Köln
1990 – 1994 Friedrich-Wilhelm-Gymnasium Köln
17.06.1994 Abitur
1995 – 2000 Studium der Chemie an der Universität Köln
30.10.2000 Diplom an der Universität zu Köln:
„Optimierungsversuche zur Produktion des
Positronenstrahlers Iod-124“
2001 – 2003 Anfertigung der vorliegenden Dissertation an der
Abteilung Nuklearchemie der Universität zu Köln



Thomas Bastian