

**Produkte der Solaren Kosmischen Strahlung in Meteoriten:  
Aufbau und Erprobung einer  
Laser-Extraktionsanlage für Edelgase**

Dissertation  
zur Erlangung des Grades  
„Doktor der Naturwissenschaften“

am Fachbereich  
Geowissenschaften  
der Johannes Gutenberg-Universität  
in Mainz

Matthias Pätsch  
geb. in Pforzheim

Mainz 2000

Dekan : Prof. Dr. D. Schenk  
Tag der mündlichen Prüfung : 14.09.2000

## Inhaltsangabe

1	Einführung .....	4
2	Meteorite.....	5
3	Klassifizierung.....	8
3.1	Undifferenzierte Meteorite (Chondrite).....	8
3.2	Differenzierte Meteorite .....	11
4	Edelgase in Meteoriten .....	13
4.1	Getrappte Komponenten .....	13
4.1.1	Die solare Komponente .....	14
4.1.2	Die planetare Komponente .....	16
4.1.3	Die terrestrische Komponente .....	16
4.2	In-situ Komponenten .....	17
4.2.1	Die radiogene Komponente .....	17
4.2.2	Die kosmogene Komponente.....	18
4.3	Unterscheidung der Edelgaskomponenten.....	22
5	GCR- und SCR-Signaturen in Meteoriten.....	23
5.1	Produktion von Radionukliden und stabilen Isotopen.....	23
5.2	Ablation und „space erosion“ .....	24
5.3	Modellrechnungen .....	26
6	Edelgas-Messungen .....	33
6.1	Aufbereitung der Gase .....	33
6.1.1	Extraktion der Gase .....	33
6.1.2	Extraktion durch Laser-Pulse.....	34
6.1.3	Reinigung der Gase.....	35
6.1.4	Trennung der Edelgase .....	35
6.2	Das Massenspektrometer „Alfred“ .....	36
6.2.1	Auflösungsvermögen .....	37
6.2.2	Eichung und Empfindlichkeit .....	38
6.2.3	Untergrundsignale / Blank .....	42
7	Experimentelles .....	43
7.1	Verdampfung durch Laser .....	43
7.2	Laser.....	43

7.2.1	CO <sub>2</sub> -Laser .....	44
7.3	Die Laser-Extraktionsanlage.....	46
7.4	Die Extraktionskammer .....	48
7.5	Extraktion von chondritischem Material .....	50
7.6	Parameter der Extraktion .....	52
7.7	Extraktionseffizienz der Edelgase .....	53
7.8	Doppelt geladene Atome und Moleküle .....	55
7.9	Ablauf der Lasermessung .....	56
7.10	Verlauf der Blankmessungen.....	58
7.11	Eichung der Lasermessung .....	61
8	Die Suche nach SCR Effekten .....	63
8.1	Daten der <sup>26</sup> Al-Aktivitäten .....	65
8.2	Tiefenprofile in verschiedenen Meteoriten.....	67
8.3	Fehlerbetrachtung .....	69
8.4	Der Meteorit ALH88003 .....	70
8.4.1	Probenlokation.....	71
8.4.2	Parameter der Extraktion .....	72
8.4.3	Edelgasdaten .....	72
8.4.4	Diskussion.....	74
8.5	Der Meteorit ALH88009 .....	75
8.5.1	Probenlokation.....	75
8.5.2	Parameter der Extraktion .....	76
8.5.3	Edelgasdaten .....	76
8.5.4	Diskussion.....	79
8.5.5	Ortsabhängige Bestrahlung.....	79
8.6	Der Meteorit ALH88013 .....	82
8.6.1	Probenlokation.....	83
8.6.2	Parameter der Extraktion .....	84
8.6.3	Edelgasdaten .....	84
8.6.4	Diskussion.....	87
8.7	Der Meteorit ALH88023 .....	89
8.7.1	Probenlokation.....	90
8.7.2	Parameter der Extraktion .....	91

8.7.3	Edelgasdaten .....	91
8.7.4	Diskussion.....	93
8.8	Der Meteorit ALH88048 .....	94
8.8.1	Probenlokation.....	95
8.8.2	Parameter der Extraktion .....	96
8.8.3	Edelgasdaten .....	96
8.8.4	Diskussion.....	99
8.9	Fazit der Tiefenprofile .....	100
9	Zusammenfassung .....	101
10	Anhang.....	102
11	Literatur .....	105

## 1 Einführung

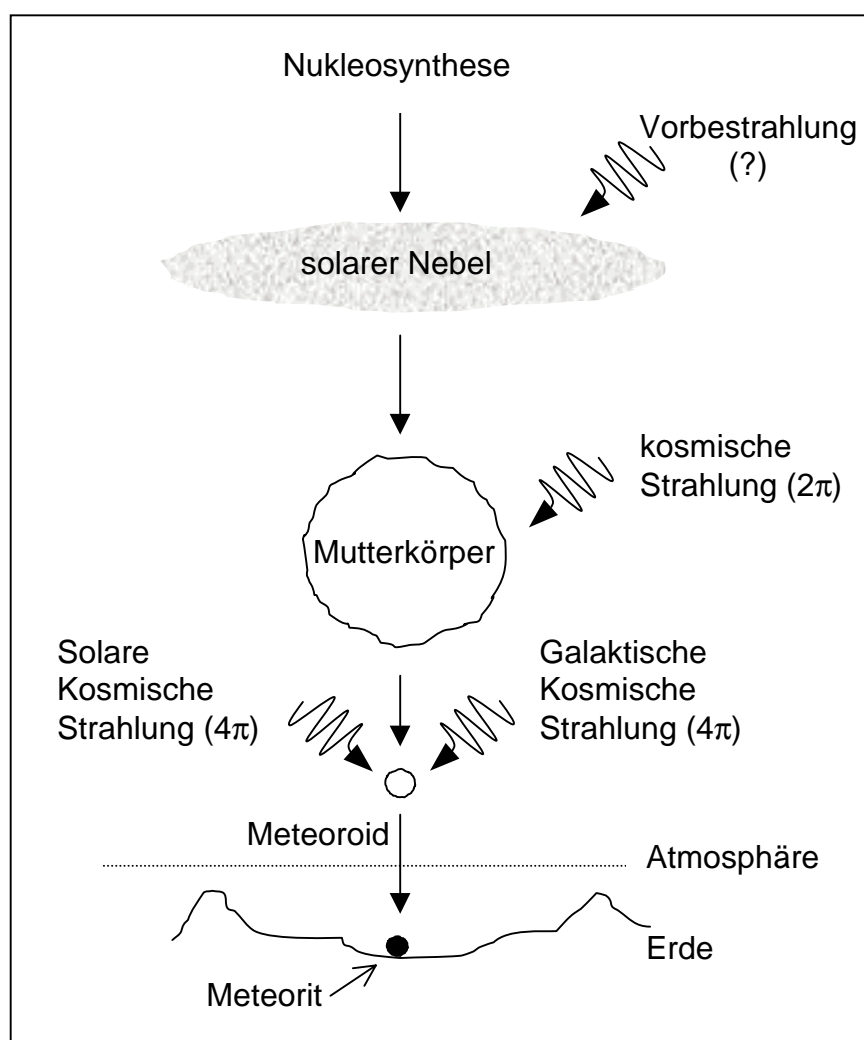
Seit jeher ist die Menschheit fasziniert von dem was sie nicht versteht. Der Weltraum markierte schon immer etwas Nicht(be)greifbares. In früheren Kulturen war etwas Religiöses oft der einfachste Weg sich Dinge zu erklären, die man nicht verstand. Heute haben in vielen Bereichen die Naturwissenschaften diese Aufgabe übernommen. Die Faszination des Weltraums ist aber die gleiche geblieben. Steine die vom Himmel fallen bringen uns den Weltraum näher. Untersuchungen an diesen Meteoriten liefern eine Vielzahl von Hinweisen darüber welche Prozesse im Universum stattfinden und –fanden.

Die Kosmische Strahlung produziert durch Kernreaktionen neue Nuklide in Körpern. Ebenfalls ist bekannt, dass diese Strahlung aus zwei unterschiedlichen Quellen stammt. Man unterscheidet eine isotrope Hintergrundstrahlung hoher Energie von einer Strahlung niedriger Energie, die ihren Ursprung in unserer Sonne hat. Die Produkte dieser „Solaren Kosmischen Strahlung“ sind an Hand von Radionukliden in Meteoriten nachgewiesen. Die Analyse der Edelgas-Isotope könnte diese Befunde bestätigen. Ziel dieser Arbeit ist es eine neue experimentelle Methode zu entwickeln, um die Möglichkeiten der Edelgas-Analysen zu erweitern. Die zu untersuchenden Proben von extraterrestrischem Gestein wurden bislang in einem Ofen erhitzt, um die Edelgase freizusetzen. Der Einsatz eines Lasers soll nun die Möglichkeit verschaffen, einzelne kleine Bereiche eines Gesteins zu verdampfen. Dadurch bestünde die Möglichkeit, auf einfachem Wege Tiefenprofile im Millimeterbereich an einem Meteoriten für Edelgas-Isotope zu untersuchen. Bislang konnte eine Differenzierung der Quellen der kosmischen Strahlung an stabilen Nukliden in Meteoriten nicht nachgewiesen werden. Die Analyse von Tiefenprofile an kleinen Meteoriten könnte dies jedoch ermöglichen.

## 2 Meteorite

Unser Planetensystem hat sich vor ca. 4,6 Ga aus dem solaren Nebel entwickelt, dessen Masse aus Endprodukten früherer Sterne bestand. Unsere Sonne ist, da sie auch schwere Elemente enthält, ein Stern zweiter oder dritter Generation. Aus dem Nebel gingen die Sonne, die Planeten und die vielen Körper im Asteroidengürtel hervor. Ursprung für die Meteoroiden bzw. Meteorite sind deren Mutterkörper im Asteroidengürtel. Abbildung 1 zeigt die Entwicklungsgeschichte der meteoritischen Materie.

Ausführliche Literatur zu diesem und dem folgenden Kapitel findet sich unter [BÜH88, DTV90, HEI88, KER88, SCH93].



*Abbildung 1: Entwicklungsgeschichte der meteoritischen Materie.*

Als Meteoroiden werden jene kosmischen Körper bezeichnet, die durch die wechselwirkenden gravitativen Kräfte der Planeten (vor allem des Jupiter) aus ihrem Ursprungsgebiet, dem Asteroidengürtel heraus beschleunigt werden [GLA97]. Als weitere Ursprungsgebiete gelten Mars und Mond, von denen jeweils etwas mehr als ein Dutzend Meteorite gefunden wurden [MET99]. Kreuzt einer dieser Körper die Erdbahn, so ist es möglich, dass er als Lichterscheinung in unserer Atmosphäre erglüht. Bei sehr kleinen Körpern, welche in der Atmosphäre verglühen, spricht man von einer Sternschnuppe (Meteor). Übersteht ein kosmischer Körper seine Reise durch die Luftmassen und fällt auf die Erde, so nennt man ihn einen Meteoriten. Sehr kleine Körper mit Ausmaßen von weniger als einem Millimeter bezeichnet man als Mikro-Meteorite, die ebenfalls den Durchgang durch die Atmosphäre überstehen.

Man schätzt, dass jährlich ca. 40.000 Tonnen extraterrestrisches Material auf die Erde niedergeht [LOV93], der größte Teil als Mikro-Meteorite. Nur ein sehr kleiner Teil aller Meteorite wird als Fund entdeckt und ein noch kleinerer Anteil als Fall beobachtet. Statistisch werden pro Jahr nur sechs Fälle beobachtet und dann auch gefunden [BÜH88]. Seit Mitte des letzten Jahrhunderts geht man ganz gezielt auf die Suche nach Meteoriten. Zwei Voraussetzungen müssen für eine erfolgreiche Suche gegeben sein. Wichtig ist einerseits, dass in den Suchgebieten die Witterungsbedingungen insoweit günstig sind, dass der Verwitterungsprozess minimal ist (i.d.R. ist er das in Wüsten). Eine weitere Voraussetzung ist, dass Konzentrationsprozesse die Meteorite in gewissen Gebieten ansammeln. Diese Prozesse können in Bewegung durch Wind oder durch Fließbewegungen im Eis zu Stande kommen [CAS92]. Daraus ergeben sich zwei Arten von vielversprechenden Suchgebieten auf unserer Erde: Trockene Wüstengebiete und die Blaueis-Felder in der Antarktis. Seit gezielte Meteoritenexpeditionen in diesen Gebieten unternommen wurden, ist die Anzahl der Funde beträchtlich gestiegen.

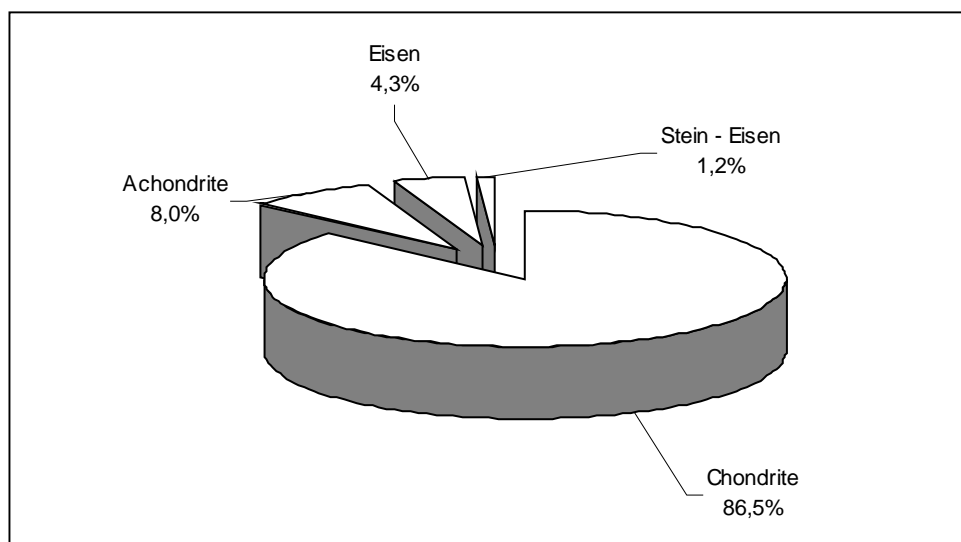
Meteoritenuntersuchungen stellen für den Wissenschaftler ein, im Vergleich zu Weltraum-Missionen, kostengünstiges Forschungsgebiet dar. Aus diesen Untersuchungen kann die Wissenschaft Erkenntnisse über den Werdegang und den Ursprung unseres Sonnensystems erlangen, indem Theorien überprüft und verifiziert werden können. So sind die ältesten bekannten Mineralphasen Bestandteile von Meteoriten (z.B.: Allende). Diese Mineralphasen werden als CAI's bezeichnet (engl.: Ca-Al-rich Inclusions). Sie bestehen im Wesentlichen aus Oxiden und Silikaten der Elemente Kalzium und Aluminium. Diese Minerale besitzen einen hohen Siedepunkt (ca. 1400 °C) und damit sind sie die ersten festen Kondensate in



einem heißen, sich abkühlenden Sonnennebel. Auf diese Weise geben sie uns einen Anhaltspunkt, wann das erste feste Material im Sonnensystem entstanden ist. Auch Hinweise aus der Zeit bevor sich unser Sonnensystem gebildet hat sind in manchen Meteoriten enthalten. Präsolare Körner geben Aufschluss über die physikalisch-chemischen Parameter vor der Akkretion unseres Sonnensystems. Die Bestrahlungsgeschichte der Meteorite lässt sich aus den, durch kosmische Strahlung produzierten Nukliden ableiten. Auf welchen Bahnen sich Meteoroiden bewegen und welche Zeitskalen dabei eine Rolle spielen, kann aus der Analyse dieser Nuklide abgeleitet werden.

### 3 Klassifizierung

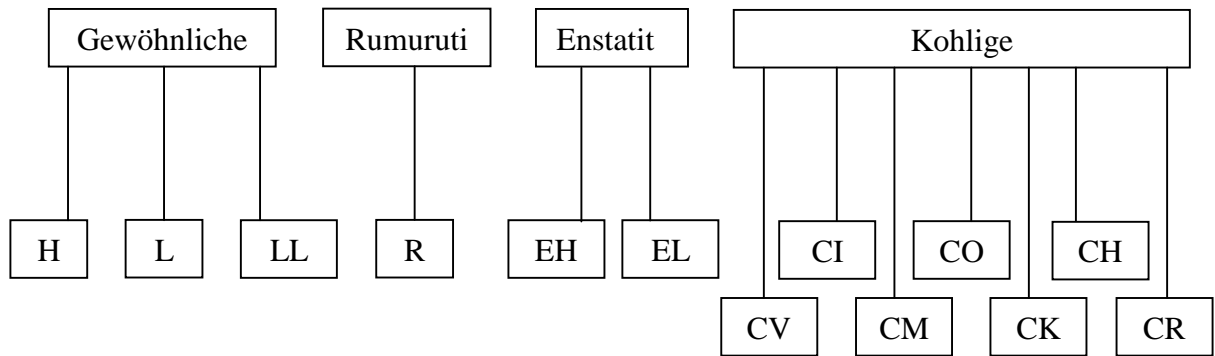
Meteorite lassen sich zunächst in zwei Gruppen einteilen, dabei orientiert man sich an deren Genese. Die Unterscheidung dieser Gruppen erfolgt nach deren Differenzierungsgrad. Differenzierung bedeutet in diesem Fall, dass Prozesse im Mutterkörper dessen chemisch-mineralogische Zusammensetzung lokal veränderten. Entmischung durch Wärme und Gravitation gehören zu solchen Vorgängen. Zur ersten Gruppe gehören die Meteorite, deren Mutterkörper nicht verändert wurden, also undifferenziert blieben. Man bezeichnet diese als Chondrite. Die zweite Gruppe umfasst die differenzierten Meteoriten (Achondrite, Eisen- und Stein-Eisenmeteorite), deren Mutterkörper verändert wurden. Abbildung 2 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Meteoritenfälle [MET99].



**Abbildung 2:** Häufigkeitsverteilung der Meteoritenfälle [MET99]. Die undifferenzierten Meteorite (Chondrite) sind, im Gegensatz zu den differenzierten, wesentlich häufiger vertreten.

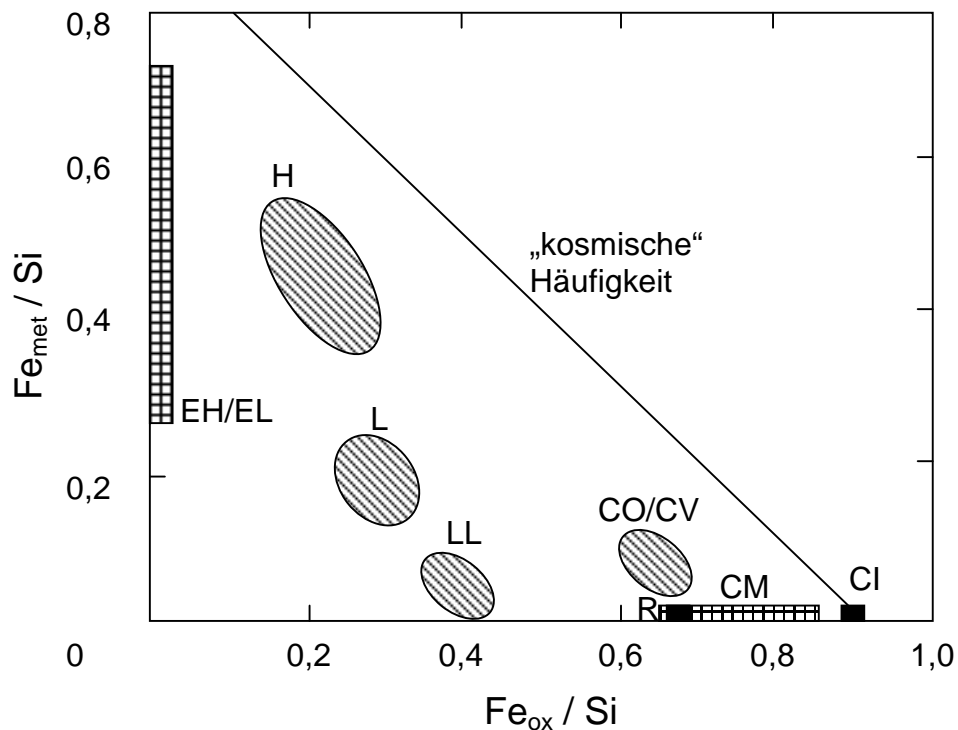
#### 3.1 Undifferenzierte Meteorite (Chondrite)

Die Chondrite sind mit 87% die häufigste Gruppe der beobachteten Meteoritenfälle. Den Namen Chondrite verdankt diese Gruppe der Tatsache, dass in ihrer feinkörnigen Matrix millimetergroße Silikatkügelchen, die sogenannten Chondren, eingebettet sind. Die Matrix selbst besteht hauptsächlich aus den Mineralien Olivin, Pyroxen und Feldspat. Daneben enthält sie auch metallisches Nickeleisen [HEI88]. Da beide Komponenten (Matrix und Chondren) vorhanden sind, deutet dies darauf hin, dass diese Körper nie als Ganzes aufgeschmolzen waren. Sie gelten als undifferenziert.



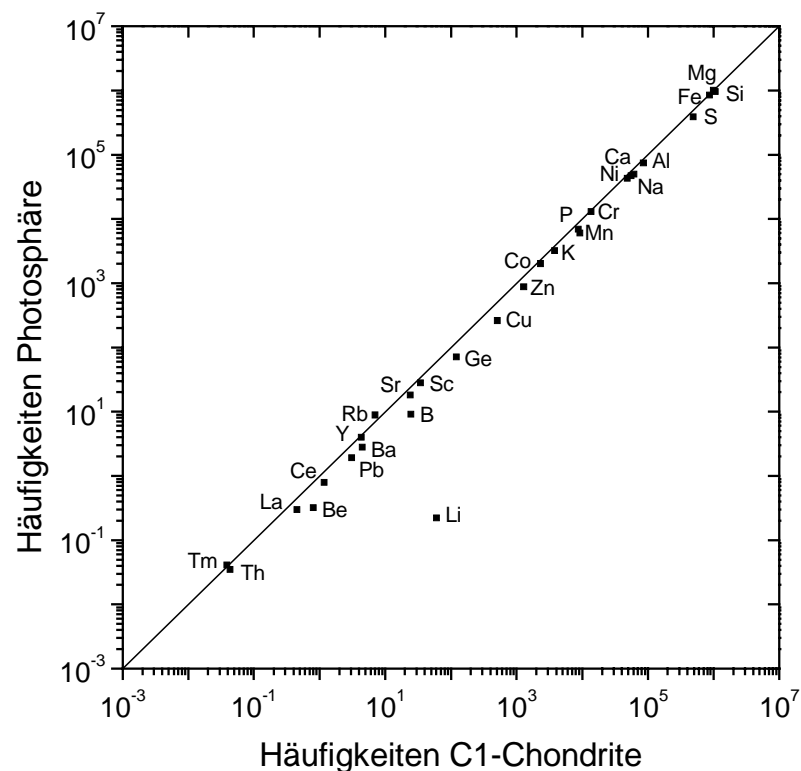
**Abbildung 3:** Schema der undifferenzierten Meteorite (Chondrite).

Die weitere Unterteilung bezieht sich bei gewöhnlichen Chondriten und Enstatit-Chondriten auf deren Eisengehalt, sowohl des metallischen als auch des Gesamtgehalts. So bezeichnen die Buchstaben H, L und LL hohes Gesamt-Eisen, niedriges Gesamt-Eisen und sowohl niedriges Gesamt-Eisen wie auch niedrigen Anteil an metallischem Eisen. Abbildung 4 zeigt die Verhältnisse des oxidierten und des reduzierten Eisens in Chondriten, normiert auf den Anteil von Silizium.



**Abbildung 4:** Anteil an oxidiertem und reduziertem Eisen in Chondriten, normiert auf Silizium. Grafik in Anlehnung an [WAS85].

Die kohligen Chondrite besitzen nahezu kein metallisches Eisen, wodurch die obengenannte Einteilung hier entfällt. Die weitere Unterteilung erfolgt durch eine Klassifizierung in chemische und petrologische Gruppen (1-7). Die interessanteste Gruppe stellen die C1/CI-Chondrite dar. Sie enthalten keine Chondren und entsprechen, mit Ausnahme volatiler Elemente, der chemischen Zusammensetzung der Photosphäre der Sonne, welche durch spektralanalytische Methoden bestimmt wurde. Die Sonne stellt mit ihrem Massenanteil von 99,9% die solare Elementzusammensetzung unseres Sonnensystems dar. Somit sind die CI-Chondrite im chemischen Sinne Repräsentanten unseres Sonnensystems [BRO96, WOO79]. Einen Vergleich der Elementhäufigkeiten der Photosphäre mit Elementhäufigkeiten in CI-Chondriten zeigt Abbildung 5 (vgl. Abb. 7).



**Abbildung 5:** Vergleich der Elementhäufigkeiten von C1-Chondriten mit der Photosphäre der Sonne, normiert auf Silizium ( $=10^6$ ) [BRO96], volatile Elemente sind nicht dargestellt. Grafik in Anlehnung an [WOO79].

### 3.2 Differenzierte Meteorite

Eine mögliche Erklärung der Differenzierung besagt, dass die Mutterkörper, oder deren Vorläufer, aufgeschmolzen wurden. Die Energie für diesen Prozess stammte hauptsächlich aus der vorangegangenen Akkretion und aus radioaktiven Zerfällen kurzlebiger Radionuklide. Jedoch können auch gravitative Wechselwirkungen eine Rolle gespielt haben. So stellt man sich vor, dass in einem aufgeschmolzenen Körper die schwere, metallische Phase ins Innere, in den Kern gewandert ist und die leichteren silikatischen Phasen sich im Mantel des Mutterkörpers angereichert haben. Dieser konzentrische Aufbau entspricht dem unserer Erde. Eine spätere Zertrümmerung des „schalenförmigen“ Mutterkörpers führte dann zu unterschiedlichen Meteoriten-Gruppen. So glaubt man, Eisenmeteorite entstammten einem früheren Kern, Stein-Eisen-Meteorite einem Kern-Mantelbereich und die basaltischen Achondrite fänden ihren Ursprung im Kruste-Mantelbereich [HEI88].

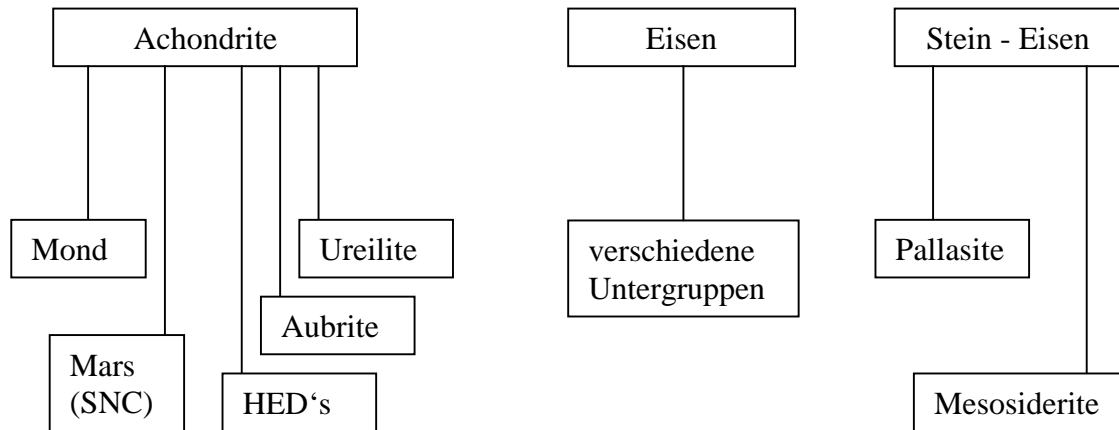
Wie der Name bereits andeutet, enthalten die Achondrite keine Chondren und bestehen, wie die Chondrite hauptsächlich aus Olivin, Pyroxen und Feldspat [SCH93].

Bei den „Mond-Meteoriten“ ist man sich inzwischen einig, dass diese einen lunaren Ursprung haben. Vergleiche dieser Achondrite mit Mondproben der Apollo- und Luna-Missionen lassen keinen Zweifel offen. Anders verhält es sich bei den SNC-Meteoriten (nach den Meteoriten Shergotty, Nakhla und Chassigny). Ergebnisse der Mars-Pathfinder-Mission sowie ein sehr junges Kristallisationsalter, welches auf einen großen Mutterkörper hindeutet, bewegt viele Wissenschaftler zur Annahme, dass die SNC's ihren Ursprung im Mars haben.

Ureilite, Aubrite und HED's (Howardite, Eukrite und Diogenite) seien hier als weitere Vertreter der Achondrite nur namentlich erwähnt.

Die quantitativ selten vorkommenden Eisenmeteorite (4% der Fälle) sind bei den Funden überdurchschnittlich vertreten. Ursache dafür ist eine höhere Verwitterungsbeständigkeit und der Umstand, dass sie durch eine höhere Dichte und eine auffälligere Textur leichter von terrestrischem Material unterschieden werden können. Sie bestehen aus einer Mischung von zwei verschiedenen Eisen-Nickel-Legierungen, Kamazit und Tänit.

Die Stein-Eisen-Meteorite stellen mit ihren Pallasiten die optisch auffälligsten Körper dar. Große Olivinkristalle sind hier in einer Eisen-Nickel-Matrix eingebettet. Den Mesosideriten ist zu eigen, dass deren Silikate feinkörniger sind. Bei beiden Gruppen besteht jeweils die Hälfte aus einer metallischen Eisen-Nickel-Phase bzw. aus Silikatmineralen.



**Abbildung 6:** Schema der differenzierten Meteorite.

## **4 Edelgase in Meteoriten**

Die als Spurenelemente in einem Meteoriten auftretenden Edelgase Helium, Neon, Argon, Krypton und Xenon treten in unterschiedlichen Element- und Isotopenverhältnissen auf. Das hat seine Ursache darin, dass diese in unterschiedlichen Prozessen gebildet werden. Eine Einteilung in zwei Gruppen von Edelgas-Komponenten ist sinnvoll. Man unterscheidet eine getrappte von einer in-situ erzeugte Komponente (s.u.).

Zu der getrappten Komponente gehören die Anteile: planetar, solar und terrestrisch. Die in-situ Komponente enthält einen radiogenen / fissiogenen und einen kosmogenen Anteil.

### **4.1 Getrappte Komponenten**

Die getrappten Komponenten bezeichnen diejenigen Komponenten, welche entweder bei der Bildung des Körpers eingebaut wurden oder später durch Implantierung und / oder Absorption hinzukamen. Diese Edelgaskomponenten unterteilen sich in drei Anteile, welche als solar, planetar und terrestrisch bezeichnet werden. Der solare Anteil trägt seinen Namen, da er eine Edelgas-Isotopenzusammensetzung besitzt, die der der emittierten Teilchen unserer Sonne entspricht.

Eine genaue Beschreibung befindet sich in den folgenden Kapiteln. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die typischen Edelgas-Isotopen-Verhältnisse bezüglich der getrappten Komponente.

Komponenten	$\frac{^3\text{He}}{^4\text{He}} [-10^{-4}]$	$\frac{^{20}\text{Ne}}{^{22}\text{Ne}}$	$\frac{^{21}\text{Ne}}{^{22}\text{Ne}}$	$\frac{^{36}\text{Ar}}{^{38}\text{Ar}}$
Solar:				
Solarer Wind (SW)	4,57 $\pm 0,08^{\dagger}$	13,8 $\pm 0,1^{\dagger}$	0,0328 $\pm 0,0005^{\dagger}$	5,48 $\pm 0,05^{\dagger}$
Solar Energetic Particles (SEP)	2,4	11,3 $\pm 0,3$	0,030 $\pm 0,001$	5,20-5,35
Planetar:				
Ne-A-2		8,500 $\pm 0,057^{\blacklozenge}$	0,036 $\pm 0,001^{\blacklozenge}$	
Q	1,53 <sup>§</sup>	10,7 $\pm 0,2^{\S}$	0,0294 $\pm 0,001^{\S}$	5,29 $\pm 0,02^{\S}$
Andere:				
Erdatmosphäre (EA)	0,014 $\pm 0,0001$	9,80 $\pm 0,08$	0,0290 $\pm 0,0002$	5,320 $\pm 0,013$
Ne-E(H)		< 0,2	< 0,003	
Ne-E(L)		< 0,01	< 0,001	

**Table 1:** Isotopen-Verhältnisse der getrappten Komponenten. Die mit <sup>†</sup>, <sup>◆</sup> und <sup>§</sup> gekennzeichneten Werte stammen von [BEN93], [HUS95] und [WIE92], alle anderen aus einer Datenzusammenstellung von [SWI88].

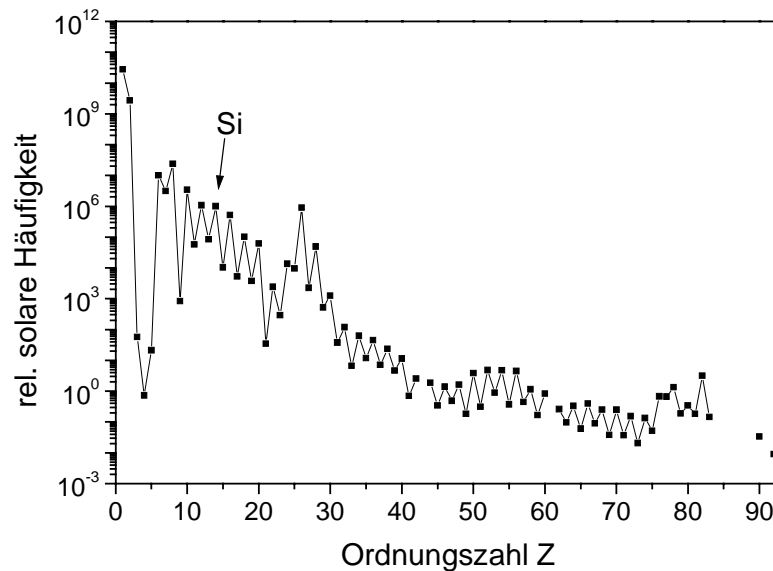
#### 4.1.1 Die solare Komponente

Die solare Komponente trägt ihren Namen, da der ständige Teilchenstrom von der Sonne in die Oberfläche der meteoroidischen Körper implantiert wird. Dieser Teilchenstrom wird wiederum in zwei Anteile unterschieden, den Sonnenwind (SW) und die Solar Energetic Particles (SEP). Die Kenntnisse über die physikalischen Parameter dieser Ionenströme stammen von Aluminium-Folienexperimenten während der Apollo Missionen, späteren Satellitenexperimenten und Untersuchungen von Mondproben und Meteoriten.

Durch Einschläge entsteht auf dem Mutterkörper eine Gesteinstrümmerschicht, dem Regolith, der bei jedem neuen Einschlag „umgewälzt“ wird. Dadurch sind ständig neue Fragmente an der Oberfläche dem Teilchenstrom ausgesetzt. Diese solaren Komponenten können (in diesem Fall) auch in größeren Tiefen eines Meteoriten nachgewiesen werden.



Der Sonnenwind und die Oberfläche der Sonne besitzen eine annähernd gleiche Zusammensetzung, was auf die Quelle des Sonnenwindes hindeutet. Dabei sind Wasserstoff und Helium am häufigsten vertreten, danach nimmt zu den schwereren Kernen hin die Häufigkeit stark ab. Abbildung 7 zeigt die solaren Häufigkeiten der Elemente, normiert auf Silizium mit  $10^6$ .



**Abbildung 7:** Relative solare Häufigkeiten der Elemente, normiert auf Silizium ( $=10^6$ ), als Funktion der Ordnungszahl. Grafik in Anlehnung an [BRO96].

Die Bezeichnung Wind deutet darauf hin, dass alle Teilchen die gleiche Geschwindigkeit von ca.  $400 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  besitzen. Dies entspricht einer spezifischen Energie von  $\approx 1 \text{ keV/Nukleon}$  und eine Eindringtiefe von einigen zehn Nanometern in Steinmeteoroiden. Der Fluß des Sonnenwindes in Erdbstand ( $\equiv 1 \text{ AU}$ ) ist rund  $10^8 \text{ Teilchen} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  [CAF88]. Die Sonne produziert aber nicht nur den „langsamen“ Sonnenwind, sondern kann, während der „solar flares“ (den Ausbrüchen der Sonnenkorona) Teilchen auf Energien von einigen GeV/Nukleon beschleunigen. Die als Solar Energetic Particles (SEP) bezeichneten Teilchen haben typische Energien von 10-100 MeV/Nukleon. Einer Energie von 50 MeV/Nukleon entspricht dann eine Geschwindigkeit von  $\approx 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Der durchschnittliche integrale Fluß der SEP für Energien über  $10^5 \text{ MeV/Nukleon}$  ist im Erdbstand etwa  $100 \text{ Teilchen} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Die Reichweite in Steinmeteoroiden beträgt einige Millimeter bis Zentimeter [CAF88].

### 4.1.2 Die planetare Komponente

Der Begriff „planetar“ hat sich im Englischen wie auch im Deutschen eingebürgert, ist aber unpräzise, besser wäre der Begriff „primordial“. Er bezeichnet die Edelgaskomponenten, welche bei der Bildung unseres Planetensystems und damit auch des meteoroidischen Materials vor rund 4,6 Milliarden Jahren (Ga) eingebaut wurden. Da unser Sonnensystem, und damit auch die Meteoroiden, aus dem solaren Nebel entstanden ist, sollten sich die solaren und primordialen Komponenten entsprechen. Die Isotopenzusammensetzungen sind jedoch unterschiedlich. Dieser Fraktionierungseffekt ist bis heute weitgehend ungeklärt [SWI88]. Die Phase Q als auch Ne-A gehören zu dieser planetaren / primordialen Komponente. Ne-A wird mittlerweile in drei unterschiedliche Unterkomponenten aufgeteilt. Daneben gibt es noch eine präsolare Komponente. Mikroskopisch kleine Körner (< 20 µm), welche die Frühphase des Sonnensystems, in dem nahezu alle Festkörper zerstört wurden, überstanden haben, lassen sich in einigen Meteoriten auffinden. Diese präsolaren Körner werden auch als Sternenstaub bezeichnet. Sie bestehen mineralogisch im wesentlichen aus Korund, Diamant, Graphit und Siliziumkarbid (SiC). Man geht davon aus, dass diese Körner in den Hüllen alternder Sterne gebildet werden [OTT93]. Ne-A2 wird oft als planetare Komponente bezeichnet, ist aber tatsächlich präsolare und findet sich in Nano-Diamanten [HUS95].

### 4.1.3 Die terrestrische Komponente

Wie der Name schon andeutet, besitzt diese Komponente ihren Ursprung in der Erde. Ist der Meteorit nach seinem Fall der irdischen Atmosphäre ausgesetzt, so werden terrestrische Edelgase aus der Luft aufgenommen. Auch Verwitterungsprozesse auf der Erde führen dazu, dass atmosphärische Edelgase gebunden werden [SHE94].

In Tabelle 2 sind die Isotopen-Häufigkeiten und Isotopen-Verhältnisse der Erdatmosphäre aufgezeigt.

	$^4\text{He}$	$^{20}\text{Ne}$	$^{40}\text{Ar}$	$^{84}\text{Kr}$	$^{132}\text{Xe}$
Häufigkeit [%]	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,93	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$8,7 \cdot 10^{-6}$
	$\frac{^3\text{He}}{^4\text{He}}$	$\frac{^{20}\text{Ne}}{^{22}\text{Ne}}$	$\frac{^{21}\text{Ne}}{^{22}\text{Ne}}$	$\frac{^{36}\text{Ar}}{^{38}\text{Ar}}$	$\frac{^{40}\text{Ar}}{^{36}\text{Ar}}$
Verhältnisse	$1,4 \cdot 10^{-6}$	9,80	$2,9 \cdot 10^{-2}$	5,32	295,5

Tabelle 2: Isotopen-Häufigkeiten und -Verhältnisse der Atmosphäre (EA) [OZI83] (vgl. Tab. 1).

## 4.2 In-situ Komponenten

Im Gegensatz zum Fall der getrappten Komponente werden bei der in-situ Komponente die Isotope durch Kernreaktionen im Meteoroiden produziert. Durch den Zerfall radioaktiver Kerne entstehen z.B. neue Nuklide, die hier als radiogene Komponente bezeichnet werden. Ein typisches Beispiel dafür ist das Edelgas-Isotop  $^{40}\text{Ar}$ , welches aus dem Elektroneneinfang des radioaktiven  $^{40}\text{K}$  hervorgeht. Das Edelgas-Isotop  $^{40}\text{Ar}$  in Meteoriten hat fast ausschließlich seine Quellen in diesem Kernzerfall.

Aber auch durch Kernreaktionen zwischen hochenergetischen Teilchen der kosmischen Strahlung und den Atomkernen im bestrahlten Körper, können neue Kerne entstehen. Sie werden dann als kosmogene Komponente bezeichnet.

### 4.2.1 Die radiogene Komponente

Einige der bei der Nukleosynthese gebildeten radioaktiven Kerne, die noch nicht vollständig zerfallen waren, wurden bei der Bildung des meteoritischen Materials eingebaut. Dies hatte zur Folge, dass deren Tochterprodukte sich mit der Zeit im Körper akkumuliert haben. Diese Tochterisotope bilden die radiogene Komponente.

Nuklide mit kurzer Halbwertszeit wie  $^{129}\text{I}$ , welche inzwischen ausgestorben sind, erlauben es, die Zeit zwischen ihrer Bildung und dem Einbau in das meteoritische Material abzuschätzen. Dieser Zeitraum wird als „Formationsalter“ bezeichnet. Die aus den langlebigen Kernen produzierten radiogenen Edelgase ermöglichen es neben der Altersbestimmung auch Informationen über Gasverlust durch Erwärmung zu bekommen. Tabelle 3 zeigt die wichtigsten radiogenen Quellen der Edelgase.

Mutterkern	Edelgas-Tochterkern	Halbwertszeit [a]	Anmerkung
$^{129}\text{I}$	$^{129}\text{Xe}$	$1,6 \cdot 10^7$	ausgestorben
$^{40}\text{K}$	$^{40}\text{Ar}$	$1,3 \cdot 10^9$	Elektroneneinfang
$^{235}\text{U}$	$^4\text{He}$	$7,0 \cdot 10^8$	$\alpha$ -Zerfall
$^{238}\text{U}$	$^4\text{He}$	$4,5 \cdot 10^9$	$\alpha$ -Zerfall
$^{232}\text{Th}$	$^4\text{He}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	$\alpha$ -Zerfall
$^{238}\text{U}$	Kr, Xe	$8,2 \cdot 10^{15}$	Spaltung
$^{244}\text{Pu}$	Kr, Xe	$8,2 \cdot 10^7$	Spaltung, ausgestorben

**Tabelle 3:** Radiogene Quellen der Edelgase [OZI83].

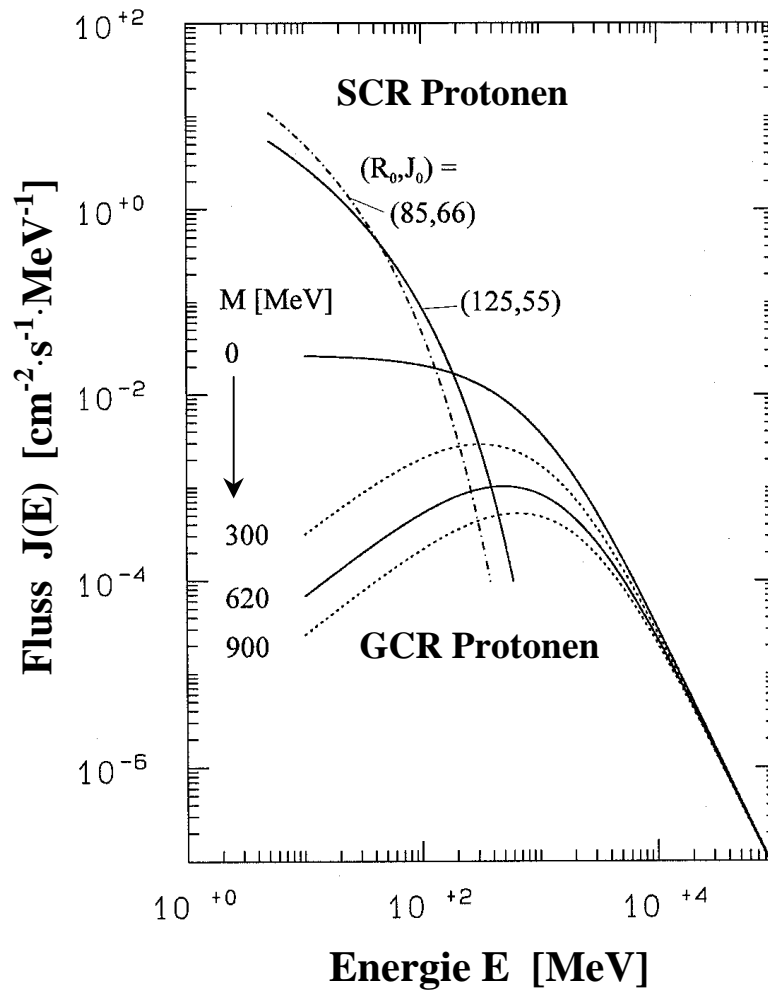
#### 4.2.2 Die kosmogene Komponente

Durch energiereiche Strahlung werden in einem Meteoroiden oder auch den Oberflächenschichten der Planeten, durch Kernreaktionen neue Atomkerne produziert. Das Sonnensystem wird von unterschiedlichen Strahlungen durchdrungen, man bezeichnet sie im Ganzen als kosmische Strahlung. Diese besteht zum größten Teil aus Protonen und Heliumkernen. Treffen diese Kernteilchen auf einen Körper, so lösen sie Kernreaktionen aus. Nicht nur diese primären Teilchen, sondern auch die, durch sie produzierten sekundären Teilchen (sekundäre Protonen und Neutronen) haben ihren Anteil an der Produktion neuer Nuklide. Tabelle 4 zeigt Beispiele für kosmogene Nuklide in Meteoriten [MIC97, EUG88]. Als Haupt-Targetelemente werden die Elemente bezeichnet, welche bei den Kernreaktionen die wichtigsten Mutternuklide darstellen. In der Tabelle sind alle bekannten Targetelemente aufgeführt. Abhängig von der jeweiligen chemischen Zusammensetzung des bestrahlten Körpers und / oder des jeweiligen Wirkungsquerschnittes für die Kernreaktion ist die Ausbeute an Tochternukliden unterschiedlich hoch. Die mit § gekennzeichneten Elemente markieren die Haupt-Targetelemente und sind für die Berechnung der Produktionsraten [EUG88] relevant, wobei auch die Häufigkeit dieser Elemente in gewöhnlichen Chondriten berücksichtigt wurde.

Nuklid	Halbwertszeit [a]	Targetelement
<sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	stabil	C, O, Mg, Al, Si, P, S, Ca, Ti <sup>§</sup> , Cr <sup>§</sup> , Mn <sup>§</sup> , Fe <sup>§</sup> , Ni <sup>§</sup>
<sup>10</sup> Be	1,51 Ma	C, O, Mg, Al, Si, P, S, Ca, Ti, Fe, Ni
<sup>14</sup> C	5,73 ka	O, Mg, Al, Si, S, P, Ca, Ti, Fe, Ni
<sup>20</sup> Ne, <sup>21</sup> Ne, <sup>22</sup> Ne	stabil	Na, Mg <sup>§</sup> , Al <sup>§</sup> , Si <sup>§</sup> , P, S <sup>§</sup> , Ca <sup>§</sup> , Ti, Fe <sup>§</sup> , Ni <sup>§</sup>
<sup>26</sup> Al	716 ka	Mg, Al, Si, P, S, Ca, Ti, Fe, Ni
<sup>36</sup> Cl	300 ka	Cl, Ca, Ti, Fe, Ni
<sup>36</sup> Ar, <sup>38</sup> Ar	stabil	Cl, K <sup>§</sup> , Ca <sup>§</sup> , Ti <sup>§</sup> , Cr <sup>§</sup> , Mn <sup>§</sup> , Fe <sup>§</sup> , Ni <sup>§</sup>
<sup>60</sup> Fe	1,5 Ma	Ni
<sup>78</sup> Kr, <sup>80</sup> Kr, <sup>82</sup> Kr, <sup>83</sup> Kr	stabil	Br, Rb <sup>§</sup> , Sr <sup>§</sup> , Y <sup>§</sup> , Zr <sup>§</sup>
<sup>124-132</sup> Xe	stabil	Te, I, Ba <sup>§</sup> , La <sup>§</sup>

**Tabelle 4:** Targetelemente, kosmogene Nuklide und deren Halbwertszeiten [MIC97]. Der größte Teil der Elemente spielt eine untergeordnete Rolle, da deren Elementhäufigkeit und/oder deren Wirkungsquerschnitt für die Kernreaktion klein sind. Die mit § gekennzeichneten Elemente stellen Haupt-Targetelemente dar und gehen in die Berechnungen der Produktionsraten nach Eugster ein [EUG88].

Einerseits durchdringt die sogenannte galaktische kosmische Strahlung (GCR vom englischen galactic cosmic rays) den Raum mit ihrem hochenergetischen Teilchenfluss. Die GCR besteht aus 87% Protonen, 12%  $\alpha$ -Teilchen und 1% schwereren Kernen [SIM83]. Dieser Fluss hat vermutlich seinen Ursprung in den Supernovaexplosionen [COL60] und erfährt auch dort seine primäre Beschleunigung. Weitere Beschleunigungen, bis zu  $10^{20}$  eV durch wandernde Magnetfelder postulierte bereits Fermi in den 40er Jahren [FER49]. Diese Strahlung erfährt eine Modulation durch zyklische Sonnenaktivitäten [MIC96]. Die Maxima und Minima werden durch den Modulationsparameter M berücksichtigt.



**Abbildung 8:** Energiespektren für Protonen der galaktischen (GCR) und solaren (SCR) kosmischen Strahlung im Abstand von 1 AU [MIC96].

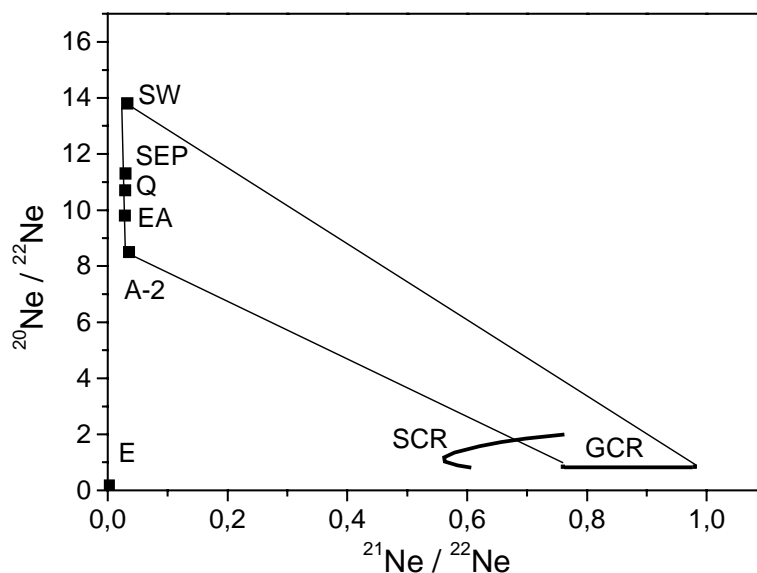
Die zweite Strahlung niederer Energie hat ihren Ursprung in unserer Sonne. Man bezeichnet sie als SCR (engl.: solar cosmic rays). Sie besteht vorwiegend aus Protonen (98%) und  $\alpha$ -Teilchen (2%) [GOS88]. Die SCR hat ihren Ursprung in den Ausbrüchen der Sonnenkorona und zeigt, im Vergleich zur GCR, höhere Flussdichten und niedrigere Energien. Die Eruptionen sind periodisch und variieren in kurzen Zyklen (11 Jahre) und längeren Zyklen. Variierende Magnetfelder können die emittierten Teilchen auf Energien bis  $10^8$  eV beschleunigen [RAO94]. Die solare kosmische Strahlung ist (im Gegensatz zur GCR) nicht isotrop. Als Funktion des Abstandes nimmt die Intensität ab ( $\sim R^{-2}$  bis  $R^{-2.5}$ ) [HAM88].

Im Spektrum der primären Protonen beider Strahlungen (Abb. 8) sind Unterschiede zu erkennen. Dargestellt sind langzeitgemittelte Werte mit unterschiedlichen Modulations-

parametern  $M$ , charakteristischen Rigiditäten  $R_0$  und Flussdichten  $J_0$  [MIC96]. Die Rigidität beschreibt die Härte des Spektrums. Das bedeutet, dass bei hohen Rigiditäten ein höherer Anteil an Protonen mit hoher Energie im Spektrum vertreten ist. Die Rigidität besitzt die Einheit Volt. Die Einheit der Flussdichte ist [ $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ] (Protonen pro Flächen- und Zeiteinheit).  $J_0$  ist die charakteristische Flussdichte für Protonen mit Energien, die größer als 10 MeV sind. Der Parametersatz ( $R_0, J_0$ ) charakterisiert vollständig das SCR-Spektrum. Aus untersuchten Tiefenprofilen und Wirkungsquerschnitten für  $^{10}\text{Be}$  und  $^{26}\text{Al}$  schließt die Arbeitsgruppe um Michel [MIC96] auf einen charakteristischen Parametersatz von  $R_0=125$  MV und  $J_0=55$   $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Andere Autoren leiten aus der Untersuchung anderer Nuklide unterschiedliche Werte für diesen Parametersatz ab [JUL98], dabei variiert  $R_0$  zwischen 70 und 125 MV und  $J_0$  zwischen 55 und 380  $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 4.3 Unterscheidung der Edelgaskomponenten

Die getrappten und die in-situ gebildeten Komponenten lassen sich auf Grund ihrer unterschiedlichen Isotopenverhältnisse identifizieren. Bilden sie eine Mischung, so kann aus der Kenntnis der reinen Komponenten auf die Anteile in der Mischung geschlossen werden. In Abbildung 9 ist ein Drei-Isotopen-Plot für Neon dargestellt. Die getrappten Komponenten mit hohem  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  und niedrigem  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  auf der einen Seite und die kosmogenen Komponenten mit niedrigerem  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  und höherem  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  auf der anderen Seite bilden jeweils bestimmte Bereiche in dieser Darstellung. Die Isotopenverhältnisse von Mischungen finden sich im dargestellten Trapez.



**Abbildung 9:** Drei-Isotopen-Plot für Neon mit den Werten aus Tabelle 1 für die getrappten Komponenten. Die kosmogenen Komponenten GCR und SCR stellen Bereiche von Verhältnissen dar, abhängig von der Position im Körper und dessen Größe (siehe folgendes Kapitel).

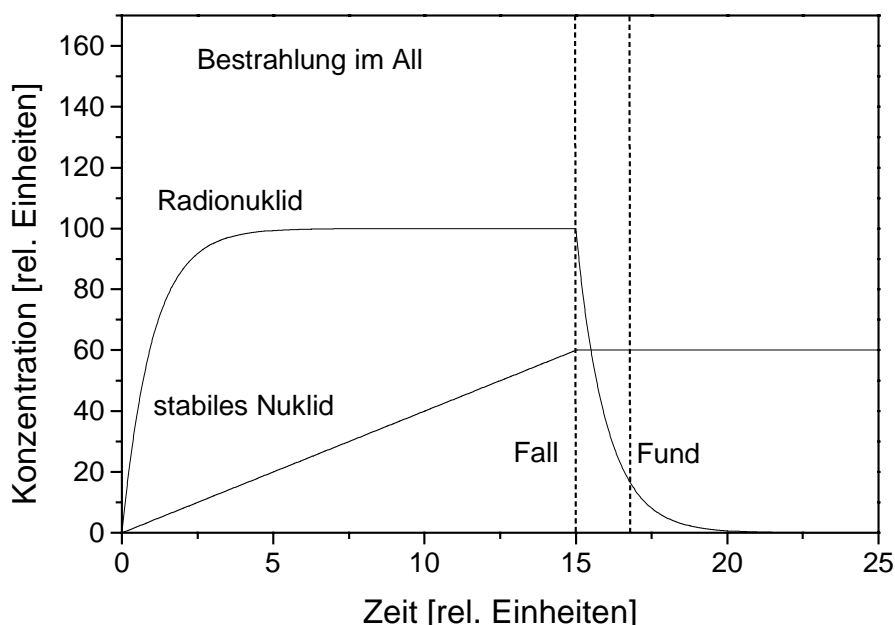


## 5 GCR- und SCR-Signaturen in Meteoriten

Die Produktion kosmogener Nuklide durch SCR konnte an Hand von Mondproben genau studiert werden. Tiefenprofile an lunarem Gestein [RAO94, REE94], Modellrechnungen zu kosmischer Strahlung in Wechselwirkung mit Materie [LEY00, MIC96, NES99] und Bestrahlungsexperimente an künstlichen Proben [MIC89] haben ein Bild von den Produktionsvorgängen verschafft. Diese werden durch Untersuchungen an diversen Meteoriten gestützt. Es gibt jedoch noch keinen Nachweis von stabilen Nukliden, die durch SCR erzeugt wurden.

### 5.1 Produktion von Radionukliden und stabilen Isotopen

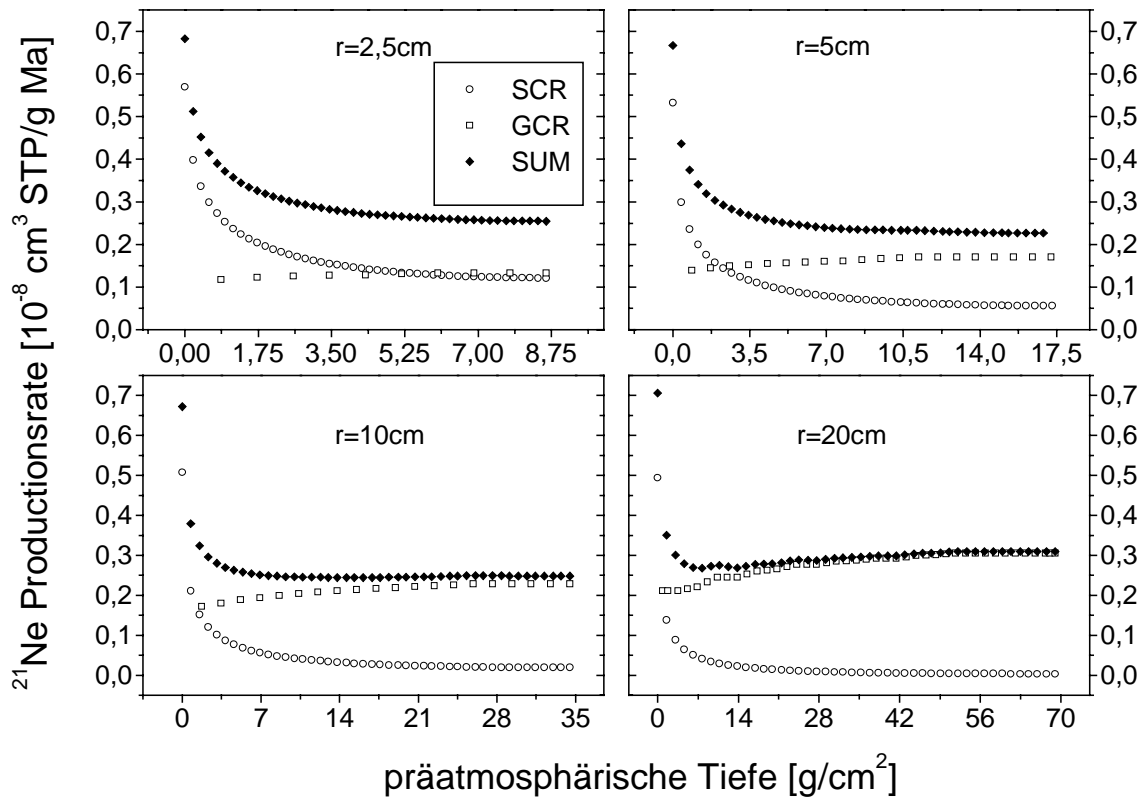
Ist ein Körper der kosmischen Strahlung ausgesetzt, so zeigen stabile Produkte einen linearen, Radionuklide einen „exponentiellen“ Zuwachs; wobei diese, abhängig von ihrer Halbwertszeit, einen Sättigungswert erreichen. Nach dem Fall auf die Erde, bleibt das stabile Produkt erhalten, die Aktivität des radioaktive Produkt klingt mit der Zeit ab (Abbildung 10).



**Abbildung 10:** Konzentration von stabilen Isotopen und Radionukliden während der Bestrahlung durch GCR und nach dem Fall auf die Erde. Nach sieben Halbwertszeiten erreicht das Radionuklid 99% seiner Sättigung; das stabile Isotop reichert sich linear an.

## 5.2 Ablation und „space erosion“

Der SCR-Anteil (produziert in einigen Zentimetern des Meteoroiden) ist kaum nachweisbar, wenn der bestrahlte Körper die Erde erreicht und in der Atmosphäre einen Großteil seiner Masse durch Ablation verliert. Der Verlust liegt meist im Bereich von 27-99,9% [BHA80]. Die Ablation ist um so geringer, je kleiner ein Körper ist (kleineres Volumen-Oberflächen-Verhältnis). Eine zweite Größe, die den Radius reduziert, nennt man space erosion. Hierbei handelt es sich um eine Abtragung der extraterrestrischen Gesteinsoberfläche, während des Aufenthaltes im interplanetaren Raum. Kollisionen mit Mikrometeoriten sind hierbei der dominierende Mechanismus, aber auch die Einwirkung des Sonnenwindes (Kapitel 4.1.1) spielt eine Rolle [DOH78, MCG86]. Typische Erosionsraten liegen bei etwa 1 mm/Ma. Ein effektiver SCR-Beitrag ist in einem „großen“ Meteoroiden ( $r > 10$  cm) nur in den äußersten Millimetern ( $< 20$  mm) zu erwarten, da die Produktion durch SCR schnell im Körper abnimmt. Bei kleinen Meteoroiden ( $r \leq 5$  cm) bleibt ein effektiver SCR-Beitrag bis in dessen Innerstes erhalten. Damit ist ein Nachweis von SCR-Effekten in kleinen Meteoroiden am wahrscheinlichsten. Abbildung 11 stellt den theoretischen Verlauf der produzierten Nuklide mit der Tiefe für vier verschiedene Meteoroidengrößen dar. Man erkennt, dass bei einem kleinen Körper von  $r = 2,5$  cm bei einer Bestrahlung in 1 AU ein signifikanter SCR-Beitrag enthalten ist. Bei einem viermal größeren Radius ( $r = 10$  cm) ist der Beitrag durch SCR deutlich geringer.



**Abbildung 11:** Produktionsraten für  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Abschirmtiefe. Bestrahlung von L-Chondriten unterschiedlicher Größe bei 1AU durch GCR und SCR. Die Summe beider wird mit SUM dargestellt. Bei einer mittleren Dichte von  $3,5\text{g/cm}^3$  entspricht  $1\text{g/cm}^2$  einer Tiefe von  $0,29\text{cm}$  [NES99b].

### 5.3 Modellrechnungen

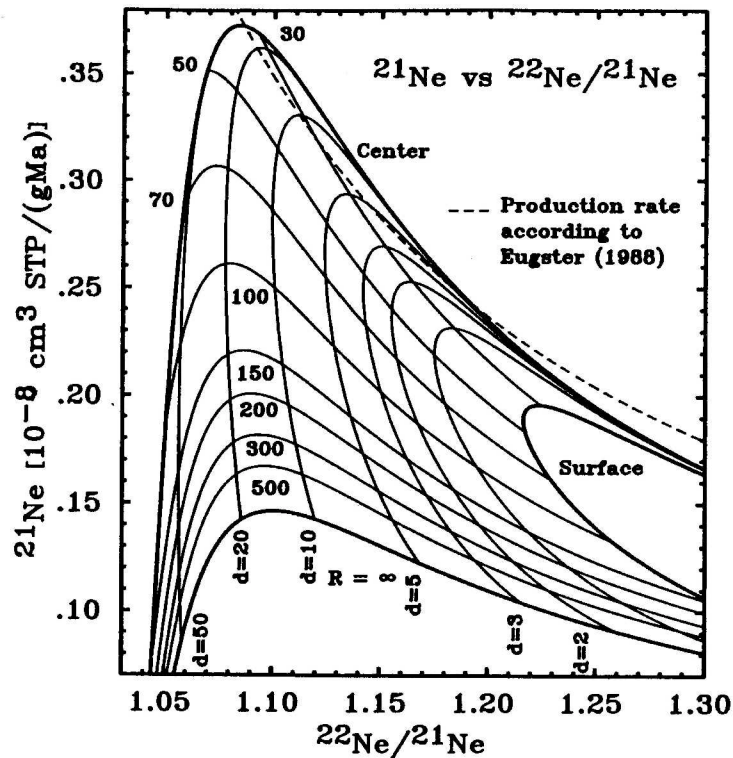
Die Konzentrationen der kosmogenen Nuklide in einem Meteoroiden sind eine Funktion des Radius, der Tiefe und der chemischen Zusammensetzung.

Ein rechnerischer Ansatz um die Produktion von beobachteten Nuklidkonzentrationen in Meteoriten zu beschreiben, geht auf Signer und Nier zurück [SIG60]. Ihr semi-empirisches Modell benutzten sie, um die Produktion der leichten Edelgase im Eisenmeteoriten „Grant“ zu beschreiben. Alle weiteren empirischen Modelle beschreiten den selben Weg. Die freien Parameter des Modells werden an die gemessenen Nuklidkonzentrationen angepasst. Tiefenprofile des Meteoriten „Knyahinya“ (L5), bei denen Konzentrationen von He, Ne und Ar, Aktivitäten von  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$  und  $^{53}\text{Mn}$ , sowie nuclear-tracks-Spaltspuren gemessen wurden, sind die Ausgangsbasis für Modelle für Steinmeteorite. Spätere Tiefenprofile ergänzten diese Parameter teilweise.

Eine Größe, welche die Abschirmung beschreibt ist der Parameter  $(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_c$  (der tiefgestellte Buchstabe „c“ bedeutet, dass nur rein kosmogene Anteile gemeint sind). Unter der Annahme, dass die Produktionsrate von  $^3\text{He}$  tiefenunabhängig ist, ergibt eine Auftragung von  $(^3\text{He}/^{21}\text{Ne})_c$  vs.  $(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_c$  eine annähernd lineare Beziehung mit positiver Steigung [EBE66]. Dieser sogenannte „Bern-Plot“ beschreibt die Änderung der Produktionsrate von  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Abschirmtiefe, welche durch den Parameter  $(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_c$  beschrieben wird.

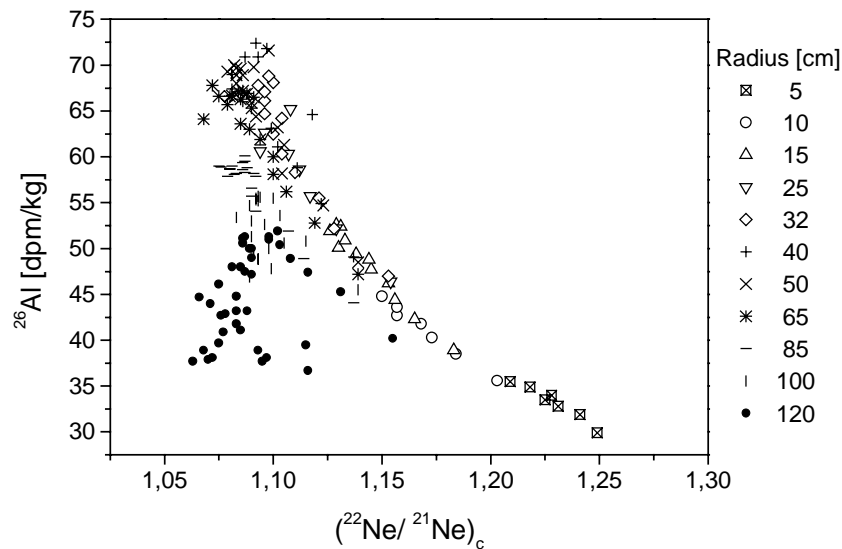
Abbildung 12 zeigt eines der Ergebnisse von Graf et al. [GRA90a,b]. Sie zeigt die Produktionsrate von  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion von  $(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_c$  für verschiedene Größen und Tiefen in einem L-Chondriten. Die horizontalen Zahlen geben den Radius, die vertikalen die Tiefe in cm an.

Eine von Eugster [EUG88] ermittelte empirische Korrelation, die zur Bestimmung des Bestrahlungsalters herangezogen wird ist als gestrichelte Linie dargestellt. Diese rein empirische Korrelation gilt für „typische“ Meteoritengrößen. Eine Differenzierung zwischen Größe und Abschirmtiefe wird nicht berücksichtigt. Man erkennt, dass die von Eugster vorgeschlagene Korrelation für Meteorite mit Radien von 30-40 cm mit diesem Modell für  $1,08 < (^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_c < 1,18$  gut übereinstimmt.



**Abbildung 12:** Produktionsrate von  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Abschirmtiefe für verschiedene Größen und Tiefen eines L-Chondriten bezüglich GCR-Bestrahlung [GRA90]. Das Verhältnis  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  ist ein Maß für die Abschirmtiefe. Die horizontalen Zahlen geben den Radius, die vertikalen die Tiefe in cm an. Die gestrichelte Linie zeigt die empirische Korrelation nach Eugster [EUG88].

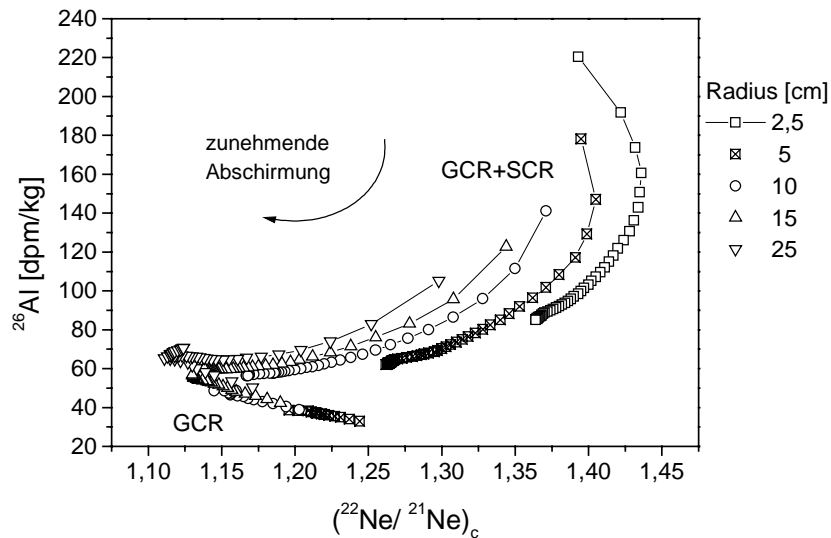
Tiefenprofile bezüglich  $^{26}\text{Al}$  am Meteoriten „Salem“ [NIS90] und Profile an Mondgesteinen [REE94, SHR70] zeigten jedoch starke Abweichungen von den reinen GCR-Modellen, welche von Leya, Neumann und Michel berechnet werden. Ein hoher  $^{26}\text{Al}$ -Wert von 155 dpm/kg [NIS90] wurde erstmalig nahe der Kruste des Meteoriten „Salem“ gemessen. Konzentrationen und Aktivitäten, welche deutlich über den von GCR-Modellen vorhergesagten Werten liegen, deuten auf einen zusätzlichen Beitrag durch SCR hin. Die Modelle von Leya, Neumann und Michel beziehen sich auf Untersuchungen des Meteoriten „Knyahinya“, auf Ergebnisse von Bestrahlungsexperimenten und gemessenen Wirkungsquerschnitten. Damit stellen diese Modelle eine nicht-empirische Vorhersage dar. Abbildung 13 und 14 zeigen die Ergebnisse von Modellrechnungen [LEY00, NES99b], bei denen L-Chondrite verschiedener Größe mit unterschiedlichen Abschirmtiefen als Basis dienten. Bei diesen Modellen werden im Gegensatz zum obengenannten auch kleinere Radien berücksichtigt.



**Abbildung 13:** Für L-Chondrite und GCR modellierte  $^{26}\text{Al}$ -Aktivitäten als Funktion des kosmogenen  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  [LEY00]. Die Einheit [dpm/kg] gibt an wie viele Zerfälle pro Minute und Kilogramm erfolgen.

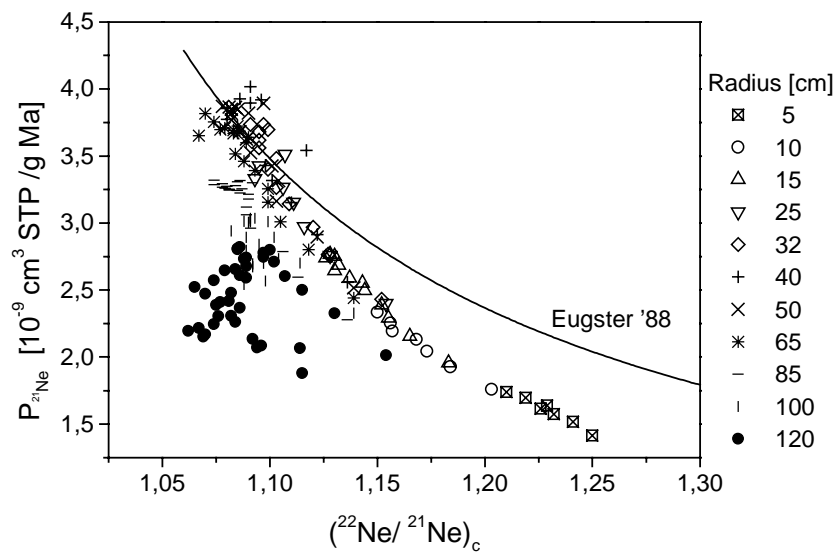
Dargestellt ist das durch reine GCR-Strahlung produzierte  $^{26}\text{Al}$  in Abhängigkeit vom kosmogenen  $(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_c$ . Hohe Werte signalisieren eine oberflächennahe Position oder kleinen Radius und niedrige Werte eine gewisse Abschirmtiefe. Für die hier dargestellten Radien nimmt die  $^{26}\text{Al}$ -Aktivität mit wachsender Tiefe zu, bzw. die  $^{26}\text{Al}$ -Aktivität nimmt mit sinkendem  $(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_c$  zu (für Radien  $> 65$  cm gilt diese Beziehung nicht mehr). Ein experimentell bestimmter, hoher  $^{26}\text{Al}$ -Wert, welcher höher ist als der für reines GCR kalkulierte Wert, deutet hier auf einen SCR-Beitrag hin.

In Abbildung 14 sind dieselben GCR-Modelldaten wie in Abbildung 13 dargestellt. Zusätzlich ist der potentielle Beitrag durch SCR [NES99b] für verschiedene Abschirmtiefen und Radien wiedergegeben. Experimentell ermittelte Aktivitäten und Neon-Verhältnisse, welche größer als die reinen GCR-Werte sind, lassen sich als Beitrag durch SCR deuten.

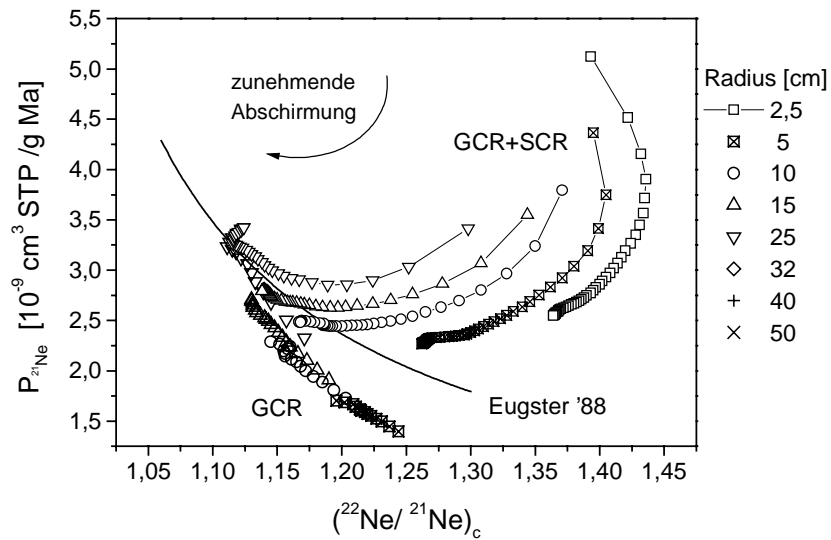


**Abbildung 14:** Für L-Chondrite, GCR und SCR [NES99b] modellierte  $^{26}\text{Al}$ -Aktivität als Funktion des kosmogenen  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ . Bestrahlung im Abstand von 1 AU zur Sonne.

Analog zu den Abbildungen 13 und 14 sind in Abbildung 15 und 16 die Daten eines stabilen Isotops dargestellt. Man erkennt, dass für kleine Körper das reine GCR-Modell [LEY00] die Produktionsraten unterschätzt (im Gegensatz zur empirische Beziehung von Eugster). In Abbildung 16 sind zusätzlich die Produktionsraten durch SCR im Abstand von 1 AU von der Sonne berücksichtigt. Abhängig vom Bestrahlungsort und der Bestrahlungsdauer addieren sich die SCR-Produktionsraten zu denen reiner GCR. Da die Eugster'sche Korrelation für kleine Meteorite (hohes  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ ) größere Produktionsraten (als die für reine GCR-Produktion) ergeben, wird die Abweichung, zwischen den gerechneten GCR-Raten und den experimentell gefundenen Produktionsraten durch die zusätzlich von SCR produzierten Nukliden erklärt.



**Abbildung 15:** Für L-Chondrite und GCR modellierte  $^{21}\text{Ne}$ -Produktionsraten als Funktion des kosmogenen  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  [LEY00], im Vergleich zu der von Eugster ermittelten empirischen Korrelation.



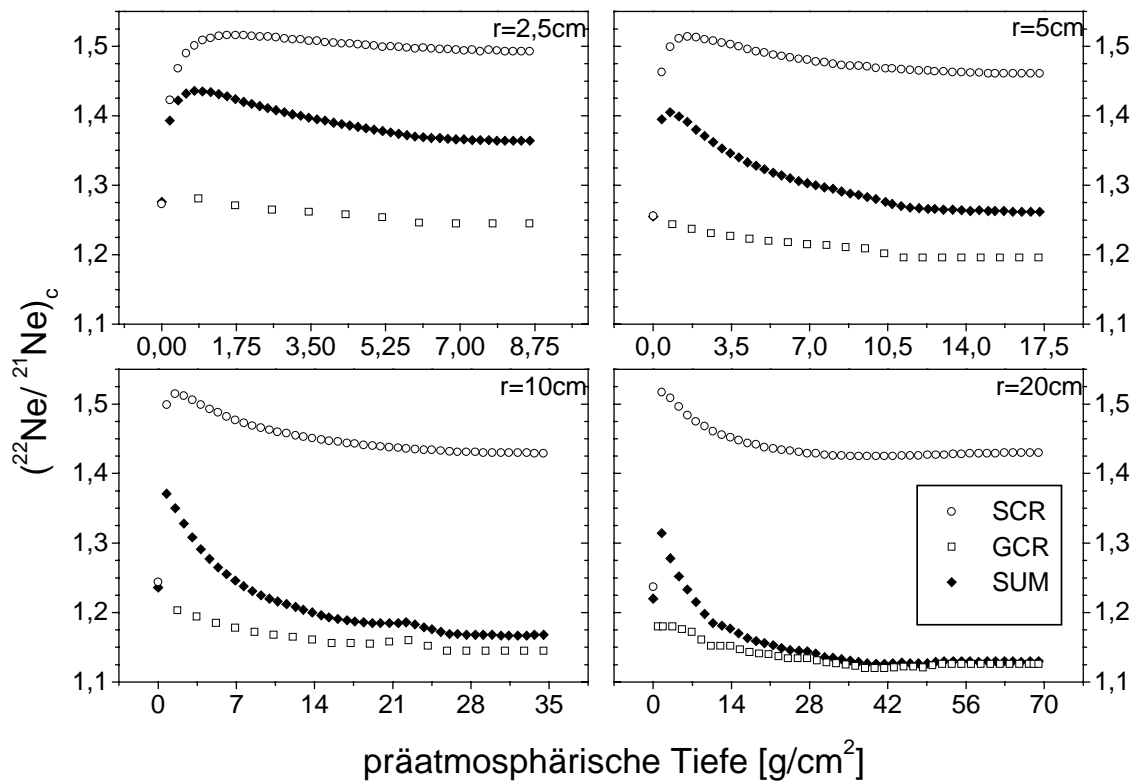
**Abbildung 16:** Für L-Chondrite, GCR und SCR [NES99b] modellierte  $^{21}\text{Ne}$ -Produktionsraten als Funktion des kosmogenen  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ . Bestrahlung im Abstand von 1 AU zur Sonne.



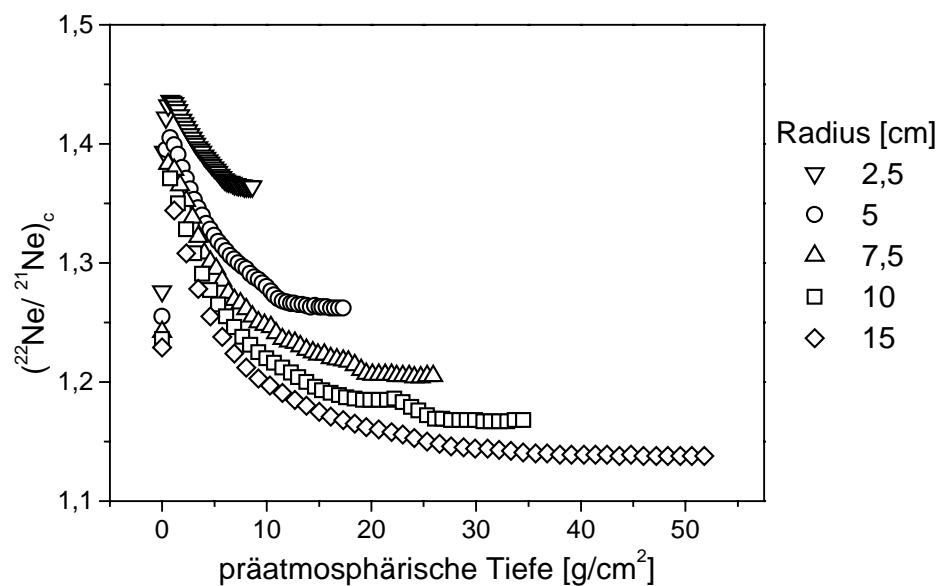
Eindeutige Aussagen bezüglich SCR konnten über stabile Nuklide in Meteoriten bislang nicht gemacht werden. Radionuklidwerte geben einen deutlicheren Hinweis auf SCR (vgl. Kapitel 8.5.5). Erst wenn diese ermittelt wurden, ist eine Untersuchung auf stabile Nuklide hinsichtlich einer SCR-Produktion sinnvoll. Einzelne Datenpunkte der Neonverhältnisse geben alleine keinen eindeutigen Befund. Ein Neon-Isotopen-Tiefenprofil an kleinen Meteoriten mit SCR-Signatur hinsichtlich  $^{26}\text{Al}$  kann Aufschluss geben. Solche Untersuchungen wurden an dem Meteoriten „Salem“ durchgeführt. Ein hoher  $^{26}\text{Al}$ -Wert von 155 dpm/kg an der Oberfläche wurde erstmalig von Nishiizumi et al. gemessen [NIS90]. Die Radionuklidaten der Tiefenprofile sind eindeutig und ergeben keinen Zweifel an einer SCR-Signatur, jedoch zeigen Neon-Isotopen-Verhältnisse aus jenen Tiefenprofilen keine Anzeichen von einem SCR-Anteil [NIS90]. Diese Daten wurden so interpretiert [REE92], dass eine mehrstufige Bestrahlung zu solchen Ergebnissen führen kann und / oder dass durch Ablation die sensitiven Bereiche bezüglich SCR-Neon-Isotopen-Verhältnisse verloren gegangen sind.

Als ein weiteres Beispiel soll hier der Verlauf des  $(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_c$  mit der Tiefe dargestellt werden. In Abbildung 17 und 18 sind die Ergebnisse von Modellrechnungen [NES99b] für L-Chondrite dargestellt. Ausgangspunkt für diese Rechnungen waren GCR- und SCR-Bestrahlungen in einer Entfernung von 1 AU. Deutlich zu erkennen sind die hohen  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Werte in den ersten ein bis zwei Zentimetern. Bei Neon-Isotopen-Tiefenprofilen sollte diese Erhöhung zu erkennen sein, wenn auch bei einer mehrstufigen Bestrahlung sie niedriger ausfallen würde. Eine Abflachung der Erhöhung erfolgt auch durch die genannte „space erosion“ [BOD93]. Die hier benutzten Ergebnisse der Modelle [NES99b] sind für Bestrahlungen in 1 AU errechnet worden. In den Modellen blieben „space erosion“ und Ablation unberücksichtigt, sie können nur abgeschätzt werden.

Die Modelle von Leya, Michel und Neumann unterscheiden sich vor allem durch die Differenzierung zwischen GCR und SCR. Diese Unterscheidung ist im Gegensatz zu früheren Modellen in Bezug auf diese Arbeit von großem Nutzen. Diese theoretischen Modelle sollten jedoch auch kritisch betrachtet werden, da die benutzten Parametersätze bislang nicht gänzlich bekannt sind (vgl. Kapitel 4.2.2).



**Abbildung 17:** Das Verhältnis  $(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_c$  als Funktion der Tiefe. Bestrahlung von L-Chondriten unterschiedlicher Größe bei 1 AU durch GCR und SCR [NES99b]. Die Summe beider wird mit SUM dargestellt. Bei einer mittleren Dichte von  $3,5\text{g/cm}^3$  entspricht  $1\text{g/cm}^2$  einer Tiefe von  $0,29\text{cm}$ .



**Abbildung 18:** Das Verhältnis  $(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_c$  als Funktion der Tiefe. Bestrahlung von L-Chondriten unterschiedlicher Größe bei 1 AU durch GCR und SCR [NES99b].

## 6 Edelgas-Messungen

Die Analyse der Isotopenzusammensetzung von denen in dieser Arbeit zugrunde liegenden Edelgasen, wurden am Edelgas-Massenspektrometer-System „Alfred“ durchgeführt [LOE93]. Eine Erweiterung durch den Anbau einer Laser-Extraktions-Anlage ermöglicht es, gezielt kleine Bereiche meteoritischer Körper zu verdampfen. Die bereits bestehende Anlage wurde so modifiziert, dass die Laser-Messungen zeitversetzt zu den herkömmlichen Bulk-Messungen durchgeführt werden können.

### 6.1 Aufbereitung der Gase

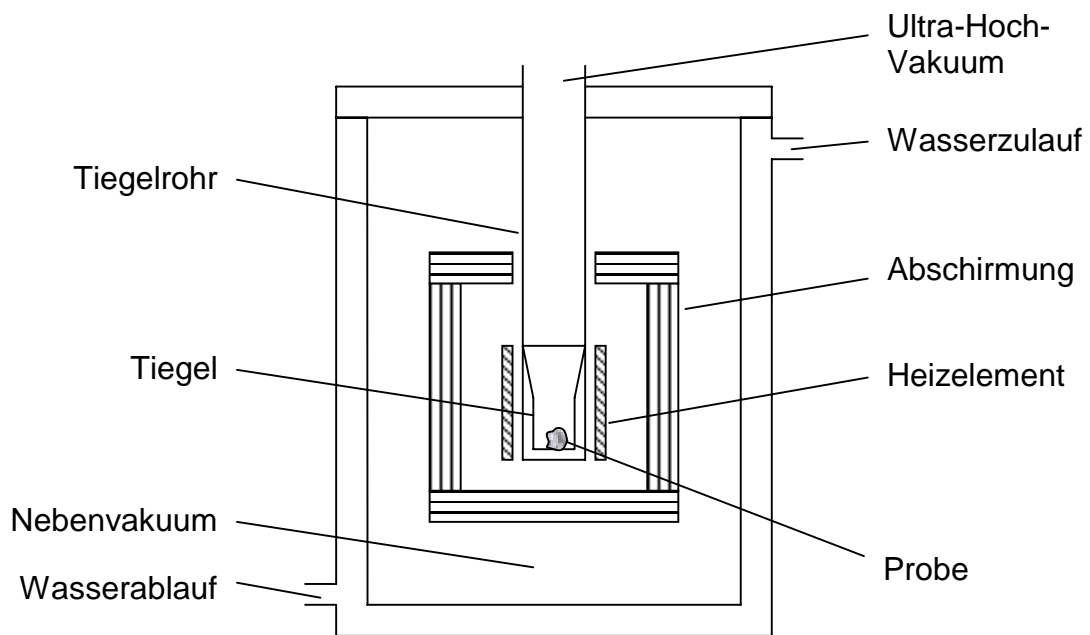
Der Ablauf vor der eigentlichen Isotopenanalyse im Massenspektrometer gliedert sich in die folgenden drei Abschnitte:

- (1) Extraktion der Edelgase: Dazu wird ein von Götz [GÖT84] entwickelter Extraktionsofen für Gesamtgesteinsanalysen oder die hier beschriebene Laser-Extraktionsanlage benutzt.
- (2) Gasreinigung: Dabei werden über verschiedene Reaktionspartner nahezu alle Gase, außer den Edelgasen, aus dem extrahierten Gasgemisch entfernt.
- (3) Elementtrennung: Im letzten Schritt werden die einzelnen Edelgase kryogenisch voneinander getrennt, um eine möglichst kurze Aufenthaltsdauer der einzelnen Fraktionen im Massenspektrometer zu gewährleisten.

Der gesamte Ablauf einer Edelgasmessung vollzieht sich in einem abgeschlossenen, stationären System bei einem Restgas-Druck  $< 10^{-6}$  Pa. Einen Gesamtüberblick der Anlage ist in Abbildung 64 im Anhang dargestellt.

#### 6.1.1 Extraktion der Gase

Der Extraktionsofen ermöglicht es, Festkörper bei Temperaturen von  $> 1800$  °C zu verdampfen. Im Inneren des wassergekühlten Doppel-Vakuum-Systems befindet sich ein Wolfram-Tiegel, umschlossen von einem Tantal-Rohr, welches wiederum von einem, sich in Nebenvakuum befindlichen Wolfram-Heizelement erhitzt wird. Einer Temperatur von  $1800$  °C entspricht einer Leistung von ca. 6 kW. Der Heizungsbereich wird von einer Anordnung von Wolframblechen, die als Strahlungsschild wirken, thermisch abgeschirmt. Abbildung 19 zeigt schematisch einen Querschnitt durch diesen Extraktionsofen.



**Abbildung 19:** Schematischer Querschnitt durch einen Extraktionsofen. Zeichnung in Anlehnung an [GÖT84].

Ein senkrecht über dem Tiegel angebrachtes Fenster ermöglicht die Kontrolle der Temperatur mittels eines Pyrometers. Die meteoritischen Proben befinden sich zunächst im sogenannten Probenbaum und können von dort in den Ofen eingebracht werden, um sie dort zu verdampfen. Typische Probenmengen liegen im Bereich von 100 bis 150 mg, die Dauer der Extraktion bei 30 Minuten. Die in dieser Arbeit gemessenen Gesamtgesteins-Proben, die nachfolgend als Bulk-Proben bezeichnet werden, wurden in diesem Ofen verdampft.

### 6.1.2 Extraktion durch Laser-Pulse

Die Extraktion der Gase unter Zuhilfenahme von Laser-Licht hat Vorteile für kleine Proben: Der fokussierte, einige 10  $\mu\text{m}$  breite Laserstrahl ermöglicht ein gezieltes Verdampfen einzelner Bereiche eines Meteoriten. So können einzelne Mineralkörner bzw. einzelne Gebiete gezielt untersucht werden. Der wassergekühlte  $\text{CO}_2$ -Laser mit einer Leistung von 30 W erbringt durch eine Fokussierung eine Energieflussdichte von  $\approx 1 \text{ GW} \cdot \text{m}^{-2}$ . Kapitel 7 führt den Aufbau, den Messablauf und die Möglichkeiten der Laser-Extraktion detaillierter aus.

### 6.1.3 Reinigung der Gase

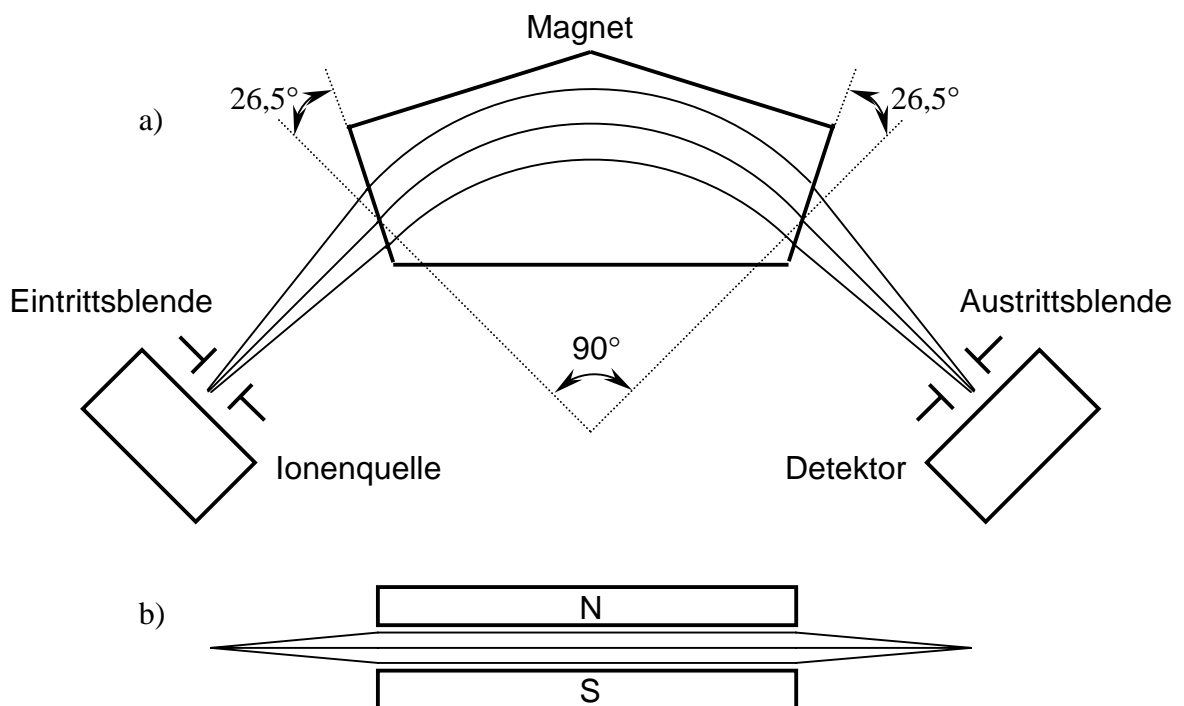
Die Tatsache, dass Edelgase inerte Gase sind, macht man sich zu Nutze, um die restlichen reaktiven Gase abzutrennen. Die erste Reinigungsstufe erfolgt an einem Titan-Schwamm, der bei einer Arbeitstemperatur von ca. 800°C gehalten wird. Zwei weitere Getter (der Firma SAES) aus einer Aluminium-Zirkon-Legierung arbeiten bei unterschiedlichen Temperaturen, da das Reaktionsvermögen der verschiedenen unedlen Gase temperaturabhängig ist.

### 6.1.4 Trennung der Edelgase

Ziel einer Trennung der Edelgase in einzelne Fraktionen ist es, die Verweildauer der Edelgase während der eigentlichen Isotopenmessung im Massenspektrometer niedrig zu halten. Die Ionenquelle des Spektrometers wirkt wie eine Pumpe, wodurch der Partialdruck des zu untersuchenden Gases während der Messung abfällt. Weiter beeinflusst der sogenannte Memory-Effekt die Messung: Ionisierte Atome, die an den Innenwände des Spektrometers und des Detektors haften bleiben, können bei darauf folgende Messungen wieder „ausgespült“ werden, was dazu führt, dass diese Ergebnisse verfälscht werden. Die Trennung der Edelgase erfolgt in Kontakt mit einer Kühlfalle. Ein mit Aktivkohle befüllter Zylinder wird über eine Temperaturregelung zwischen -196°C und +150°C betrieben. Dies wird mit flüssigem Stickstoff und einer Heizspirale, die über einen Temperaturfühler geregelt wird, ermöglicht. Die einzelnen Edelgas-Fraktionen adsorbieren bei unterschiedlichen Temperaturen an der Aktivkohle [FRE78]. Mit drei Kühlfallen können die einzelnen Fraktionen getrennt werden. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Daten wurde nur in zwei Fraktionen getrennt, da die schweren Edelgase in zu geringen Konzentrationen vorhanden waren, um sie genauer zu untersuchen. Die Edelgase wurde in eine erste Fraktion (Helium und Neon) und in eine zweite mit Argon, Krypton und Xenon getrennt. Die Funktion einer weiteren Kühlfalle am Spektrometer bei einer Temperatur von -196°C besteht darin, während der Neonmessung den Anteil an Rest-Argon zu senken. Dies ist nötig, da  $^{40}\text{Ar}^{++}$  bei einer Massenauflösung von  $\approx 350$ , auf die gleiche Position fokussiert wird wie  $^{20}\text{Ne}^+$ . Dieser Effekt sollte niedrig gehalten werden, um eine spätere Korrektur möglichst klein zu halten.

## 6.2 Das Massenspektrometer „Alfred“

Die gereinigt und voneinander getrennten Fraktionen werden in das Spektrometer eingelassen. In der Elektronenstoß-Ionenquelle werden die neutralen Atome ionisiert. In der Quelle befindet sich ein Stoßkästchen mit einem Wolfram-Filament ( $\varnothing=150\ \mu\text{m}$ ), das bei einem Strom von ca. 3 A Elektronen freisetzt. Diese werden in das Stoßkästchen auf 60 eV beschleunigt. Ein Magnetfeld in Flugrichtung dient dazu, die Elektronen auf eine Schraubenbahn zu zwingen, um deren Wegstrecke zu verlängern und eine Auffächerung zu vermindern. Durch Stoßionisation werden die Gasatome, in Abhängigkeit der Elektronenenergie einfach und zu einem geringen Teil auch doppelt positiv geladen. Die auf 4 keV beschleunigten Ionen verlassen die Quelle in Richtung des Separationsmagneten und passieren die Eintrittsblende des Massenspektrometers.



**Abbildung 20:** Schema des Spektrometers. Strahlverlauf durch radiale (a) und axiale (b) Fokussierung. Grafik in Anlehnung an [PLA97].

Eine um  $26,5^\circ$  gegen die Normale der Flugrichtung geneigte Polschuhbegrenzung führt zu einer Fokussierung in die Symmetrieebene (axiale Fokussierung) [PLA97]. Im  $90^\circ$ -Feldmagneten werden die Ionen abhängig von ihrem Ladungs-Masse-Verhältnis und der variierbaren Feldstärke auf die Ausgangsblende vor den Detektoren abgebildet. Zum Nachweis der Ionen stehen zwei Detektorsysteme zur Verfügung. Ein Faraday-Auffänger für hohe und ein Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) für niedrige Ionenströme. Die Verstärkung des SEV gegenüber dem Auffänger ist abhängig von der SEV-Betriebsspannung. Für Messungen von größeren Gasmengen wird eine Spannung von 1,6 kV, für niedrige Gasmengen eine Spannung von 2 kV angelegt. Dies entspricht für  $^4\text{He}$  einer Verstärkung von ca. 1.000 (1,6 kV) bzw. 11.000 (2 kV). Über einen Widerstand, welcher zwischen  $10^8$ ,  $10^9$  und  $10^{10} \Omega$  umgeschaltet werden kann, werden die Stromstärken der Detektoren als Spannungssignale registrierbar. Diese Signale werden verstärkt, digital verarbeitet und von einem Rechner aufgezeichnet. Dieser steuert auch die Magnetfeldstärke und den Ablauf der Messzyklen.

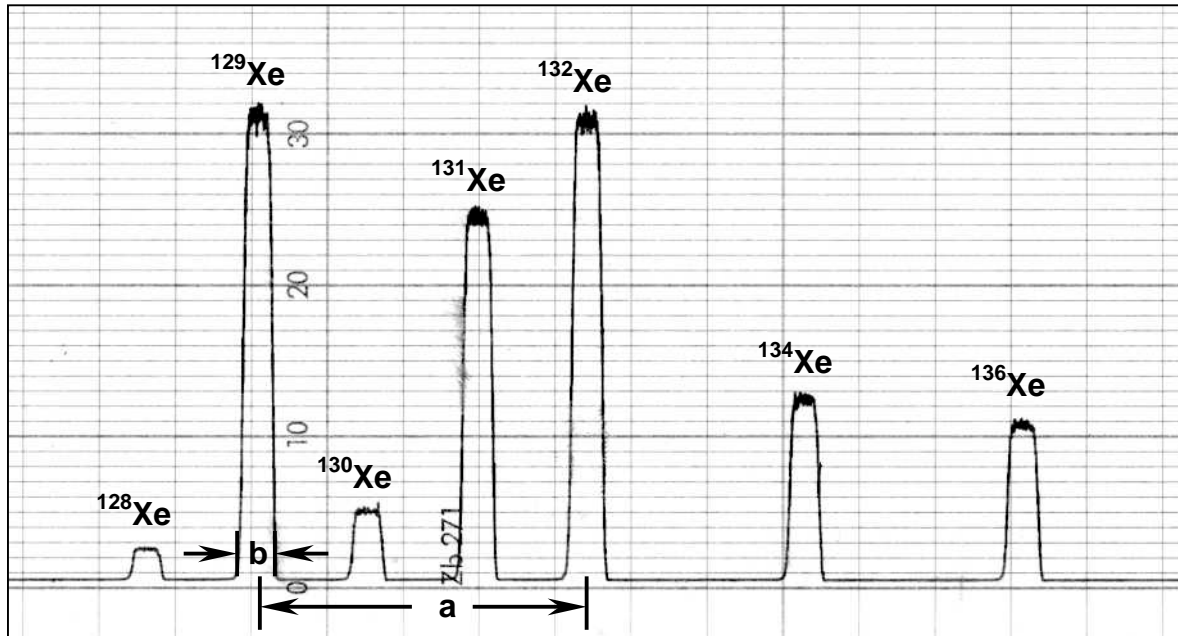
### 6.2.1 Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen ergibt sich aus der Abbildung der Eingangsblende auf die Ausgangsblende. Bei gleich großen Ein- und Ausgangsblenden entsteht ein scharfes Signal in Form eines Sägezahns. Dem steht entgegen, dass die Höhe eines „scharfen Peaks“ durch „Peakjumping“ schwer zu lokalisieren ist. Bei Vergrößerung der Eingangs- oder Ausgangsblende entsteht ein verbreitertes, plateauartiges Signal, bei dem das Maximum besser aufzufinden ist [PLA97]. Damit nimmt das Auflösungsvermögen allerdings ab. Das Massenauflösungsvermögen ist wie folgt definiert [BRU64]:

$$A = \frac{(M_1 + M_2)/2}{|M_1 - M_2|} \cdot \frac{a}{b}$$

- mit:  $M_{1,2}$  Massen 1 und 2, in Masseneinheiten  
 a Abstand zwischen  $M_1$  und  $M_2$   
 b Breite des Signals bei 1%

Abbildung 21 zeigt ein Massenspektrum von Xenon, das die Isotopenverhältnisse bei einer Eichung wiedergibt. Das Auflösungsvermögen beträgt bei den hier benutzten Einstellungen ca. 370.



*Abbildung 21: Massenspektrum von Xenon (ohne  $^{124}\text{Xe}$  und  $^{126}\text{Xe}$ ) mit den Isotopenverhältnissen eines Eichschlucks. Hieraus ergibt sich eine Auflösung von ca. 370.*

## 6.2.2 Eichung und Empfindlichkeit

Um den gemessenen Signalhöhen Gaskonzentrationen zuweisen zu können, benötigt man ein definiertes Standardgas, das hier als Eichgas bezeichnet wird. Es stehen zwei Behälter mit definiertem Inhalt zur Verfügung. Die Menge und die Isotopenzusammensetzung der Edelgase beider Eichgase ist bekannt. Das Eichgas 1 besteht aus einem Edelgasgemisch, das für Neon und Argon eine isotopische Zusammensetzung wie Luft hat. Bei Helium ist das Isotop  $^3\text{He}$  mit einem  $^4\text{He}/^3\text{He}$ -Wert von 2,19 erhöht vorhanden. Das Edelgasgemisch des Eichgases 2 wurde von der Firma „Messer Griesheim“ zusammengestellt. Die Elementverhältnisse dieses Eichgases entsprechen denen gewöhnlicher Chondrite, wobei die Anteile von Krypton und Xenon etwas erhöht sind. Die isotopischen Verhältnisse entsprechen denen der Luft. In Tabelle 5 ist die Edelgaszusammensetzung des Eichgases 2 laut Gasgemischzertifikat des Herstellers aufgezeigt. Die Unsicherheiten der Volumenanteile wurde mit 2% angegeben.



Edelgas-Element	Volumenanteil [%]
Helium	48,7
Neon	0,49
Argon	50,5
Krypton	0,19
Xenon	0,11

*Tabelle 5: Elementzusammensetzung des Eichgases 2 laut Gasgemisch-Zertifikat. Die Unsicherheiten wurden mit 2% angegeben.*

Über eine Pipette kann ein definiertes Volumen des Eichgases, der sogenannte Eichschluck, in die Anlage eingebracht werden. Das Gas wird dann auf das gleiche Volumen ausgedehnt, welches bei Messungen von verdampften Proben benutzt wird. Die durch Eichmessungen erhaltenen Signale stehen also in direktem Verhältnis zum Gasvolumen des jeweiligen Isotops aus dem definierten Eichschluck. Die Signalhöhen von Proben können damit einem Gasvolumen zugeordnet werden. Mit Hilfe der bekannten Probenmasse kann eine Konzentration der Isotope angegeben werden. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Eichungen wurde Eichgas 2 benutzt. (Eichgas 1 dient zur Bestimmung der Massenfraktionierung von Helium).

Die Empfindlichkeit des Massenspektrometers, also das Verhältnis von Signalhöhe zu Gasvolumen ist massenabhängig, da die Elemente unterschiedliche Ionisierungswahrscheinlichkeiten besitzen und im Spektrometer eine Massenfraktionierung stattfindet. Die mittleren Empfindlichkeiten  $E_0$  und deren Schwankungen für Laser- und Bulk-Messungen sind in Tabelle 6 dargestellt. Der Mittelwert  $E_0$  wurde über 22 Eichungen in einem Jahr (1999) gebildet. Es ist zu erkennen, dass die Empfindlichkeit zu höheren Massen hin zunimmt.

Da alle Ionen die gleichen Energien besitzen aber durch ihre unterschiedliche Masse unterschiedliche Impulse haben, werden leichtere Ionen, mit einer höheren Geschwindigkeit am SEV effizienter nachgewiesen. Dies führt zu einer Massenfraktionierung, die korrigiert werden muss (Tabelle 7). Neben den Empfindlichkeiten ist die Reproduzierbarkeit und das Rausch-Signal-Verhältnis wichtig. Bei Messungen der mittels Laser extrahierten Gase wurde die Empfindlichkeit des SEV erhöht, was aber ein höheres Rausch-Signal-Verhältnis mit sich brachte.

Isotop	Empfindlichkeit $E_0$ [mV·cm <sup>-3</sup> STP]	Schwankungen innerhalb eines Jahres [%]	Detektor Ableitwiderstand 10 <sup>10</sup> Ω
--------	---	--	--

**Bulk-Messungen**

<sup>4</sup> He	4,80·10 <sup>7</sup>	1,3	Faraday
<sup>20</sup> Ne	5,84·10 <sup>10</sup>	4,8	SEV
<sup>40</sup> Ar	7,11·10 <sup>8</sup>	2,1	Faraday
<sup>84</sup> Kr	7,58·10 <sup>11</sup>	7,0	SEV
<sup>132</sup> Xe	9,64·10 <sup>11</sup>	7,2	SEV

**Laser-Messungen**

<sup>4</sup> He	5,52·10 <sup>11</sup>	5,2	SEV
<sup>20</sup> Ne	9,43·10 <sup>11</sup>	1,8	SEV
<sup>40</sup> Ar	7,19·10 <sup>8</sup>	5,9	Faraday

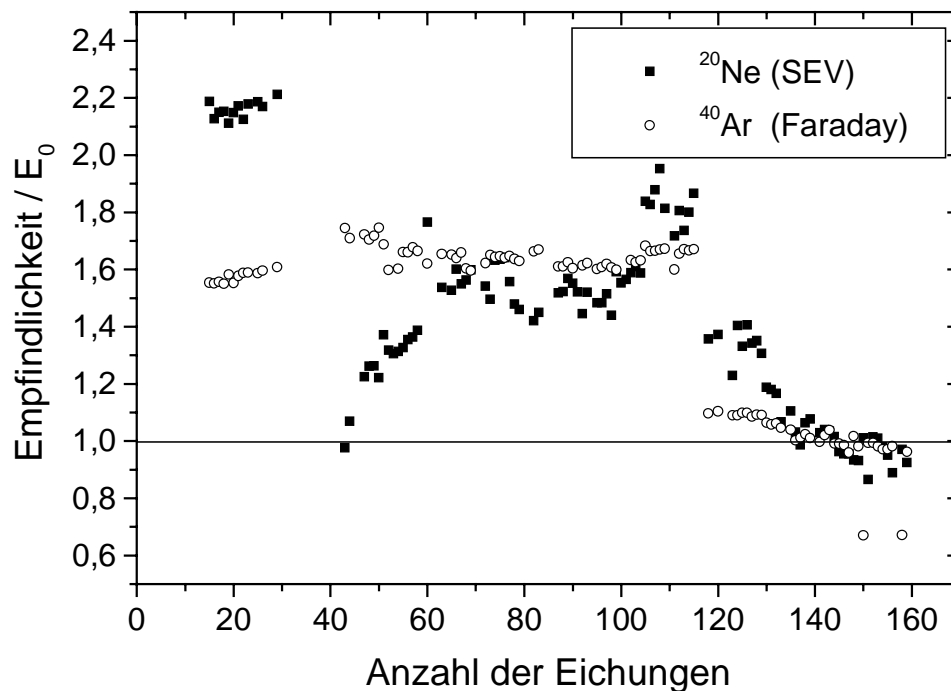
**Tabelle 6:** Empfindlichkeit und Schwankungen der jeweiligen Isotope in Abhängigkeit des Detektorsystems über einen Zeitraum von einem Jahr. Die Abkürzung STP steht für Standard Temperature and Pressure ( $T=0\text{ °C}$  und  $p=101,3\text{ kPa}$ ) und ist eine Normierung auf diese Parameter.

Die in Tabelle 6 aufgelisteten Empfindlichkeiten unterliegen einem Trend, der bei den Schwankungen nicht berücksichtigt wurde. Die Empfindlichkeit des SEV nimmt mit der Zahl der nachgewiesenen Ionen ab. Dieser Trend ist für den Faraday-Auffänger kaum vorhanden (vgl. Abb. 22).

Edelgas-Element	Massenfractionierung [% / AMU]
Helium	9,3 ± 0,8
Neon	1,2 ± 0,1
Argon	0,9 ± 0,1

**Tabelle 7:** Mittlere Massenfractionierung pro Masseneinheit des SEV.

Der Verlauf der auf  $E_0$  normierten Empfindlichkeiten über einen Zeitraum von vier Jahren ist in Abbildung 22 dargestellt. Am Beispiel von  $^{20}\text{Ne}$  und  $^{40}\text{Ar}$  ist der Verlauf der Empfindlichkeiten für den SEV und den Faraday-Auffänger zu erkennen. Im Verlauf zeigen sich mehrere unstetige Veränderungen. Die Stufe nach Eichungs-Nummer 30 ist auf den Austausch des Faraday-Auffängers und auf Veränderungen an der Ionenquelle zurückzuführen. Da dabei der Spektrometerbereich belüftet wurde, änderte sich auch die Empfindlichkeit des SEV. Eine zweite Stufe nach Eichungs-Nummer 117 kann keiner offensichtlichen äußeren Einwirkung zugeschrieben werden. Mehrere geringfügige Schwankungen können durch Stromausfälle, kleinere Lecks oder durch sehr hohe Gasmengen erklärt werden.



**Abbildung 22:** Verlauf der Empfindlichkeiten über den Zeitraum von 01/96 bis 03/00, normiert auf den Mittelwert  $E_0$  des Jahres 1999 aus Tabelle 6. Der unterschiedliche Verlauf der Empfindlichkeiten des SEV und des Faraday-Auffängers ist anhand des Verlaufs von  $^{20}\text{Ne}$  und  $^{40}\text{Ar}$  dargestellt.

Um einen Vergleich mit Daten anderer Labors zu erhalten, werden regelmäßig Messungen an Standard-Proben durchgeführt. Dazu dient ein Korngrössenseparat des L6-Chondriten „Bruderheim“, welches von der University of California, Berkeley Ende der 60er Jahre an

zahlreiche Labors verteilt wurde. Ein laborinterner Standard, der L6-Chondrit „Lakewood“, wird ebenfalls regelmäßig zur Kontrolle herangezogen.

### 6.2.3 Untergrundsignale / Blank

Das Untergrundsignal, das hier als Blank bezeichnet wird, muss von den Signalen einer Probenmessung subtrahiert werden. Zur Bestimmung des Blanks für Bulk-Messungen wird ein Stück der Nickelfolie, die auch für das Einpacken der Proben verwendet wird, im Ofen verdampft. Die Blank-Messung durchläuft die gleichen Schritte wie die Proben-Messungen. Bei Laser-Messungen ist dies ähnlich. Das Untergrundsignal ohne Verdampfung wird aufgezeichnet um später vom Probensignal subtrahiert zu werden. Diese Werte sind nicht konstant, da nach dem Laden neuer Proben, bei dem der Probenbaum bzw. die Laserkammer belüftet wird, sich ein erhöhter Blankwert einstellt. Ein Ausheizen dieser Bereiche über 24-48 Stunden nach dem Probenwechsel ist daher nötig. Tabelle 8 enthält die gemittelten Untergrundsignale. Die Blank-Signale sind nicht nur Untergrundsignale der Edelgase, sondern zum Teil auch unbekannte Verbindungen mit entsprechenden Massen.

Isotop	Blank-Signal [cm <sup>3</sup> STP]
--------	---------------------------------------

Bulk-Messungen:

<sup>3</sup> He	$2 \cdot 10^{-12}$
<sup>21</sup> Ne	$2 \cdot 10^{-13}$
<sup>36</sup> Ar	$1 \cdot 10^{-10}$
<sup>40</sup> Ar	$1 \cdot 10^{-8}$
<sup>84</sup> Kr	$9 \cdot 10^{-13}$
<sup>132</sup> Xe	$1 \cdot 10^{-12}$

Laser-Messungen:

<sup>3</sup> He	$1 \cdot 10^{-12}$
<sup>21</sup> Ne	$5 \cdot 10^{-14}$
<sup>36</sup> Ar	$8 \cdot 10^{-12}$
<sup>40</sup> Ar	$2 \cdot 10^{-9}$

**Tabelle 8:** Dem Blank-Signal reiner Edelgase entsprechende Gasmenge.

## 7 Experimentelles

### 7.1 Verdampfung durch Laser

Ziel dieser Arbeit war es, eine Edelgas-Extraktionsanlage aufzubauen, zu erproben und erste Untersuchungen damit durchzuführen. Diese Extraktionsanlage sollte im Stande sein, gezielt kleine Bereiche von meteoritischem Material zu verdampfen. Dazu ist eine Verdampfung durch gebündeltes Laserlicht geeignet. Der hier verwendete CO<sub>2</sub>-Laser bietet mit einer Ausgangsleistung von 30 W die Möglichkeit dazu.

Schwerpunkt der in dieser Arbeit durchgeführten Laser-Messungen waren Edelgas-Tiefenprofile in Meteoriten, wobei die Analyse der Neon-Isotope, in erster Linie <sup>21</sup>Ne und <sup>22</sup>Ne, im Vordergrund standen.

In den folgenden Kapiteln sollen die Grundlagen der Lasertechnik, der apparative Aufbau und die erzielten Ergebnisse dargestellt werden.

### 7.2 Laser

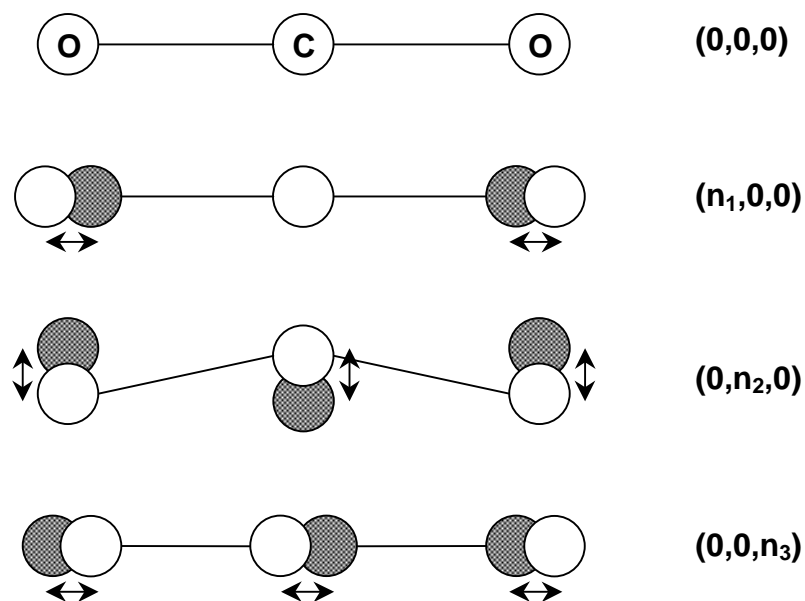
Das Wort LASER ist eine Abkürzung für light amplification by stimulated emission of radiation. Das beschreibt den Prozess der Lichtverstärkung durch induzierte Emission. Dieser soll im Folgenden erklärt werden. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in [EIC90, KNE95].

Elektromagnetische Strahlung stammt aus der spontanen Emission von Photonen. Ein durch äußere Energie angeregtes Atom oder Molekül kehrt in seinen Grundzustand zurück und emittiert dabei ein Photon. Diese ohne äußere Einwirkung stattfindende spontane Emission kann auch umgekehrt ablaufen. Die induzierte Emission bei der, nach Einwirkung einer elektromagnetischen Strahlung entsprechender Frequenz, der Übergang vom angeregten zum Grundzustand erfolgt, ist die Umkehrung der spontanen Emission. Infolge der Auswahlregeln gibt es bei manchen Elementen Energieniveaus, die das Elektron nicht durch einen direkten Übergang auf ein niedrigeres Niveau verlassen kann. Man bezeichnet sie als metastabile Zustände, in die ein Elektron durch Elektronenstoß oder auf dem Umweg über ein höheres Niveau gelangen kann. Die Verweildauer in metastabilen Zuständen beträgt ca. 10<sup>-3</sup> s, im Gegensatz zu angeregten Zuständen mit ca. 10<sup>-9</sup> s. Bei genügend starker Anregung (Pumpen), kann so ein großer Teil der Atome gleichzeitig angeregt sein und Energie speichern. Der durch induzierte Emission ausgelöste Übergang vieler Atome in den Grundzustand, führt zu einer intensiven, monochromatischen (konstante Wellenlänge),

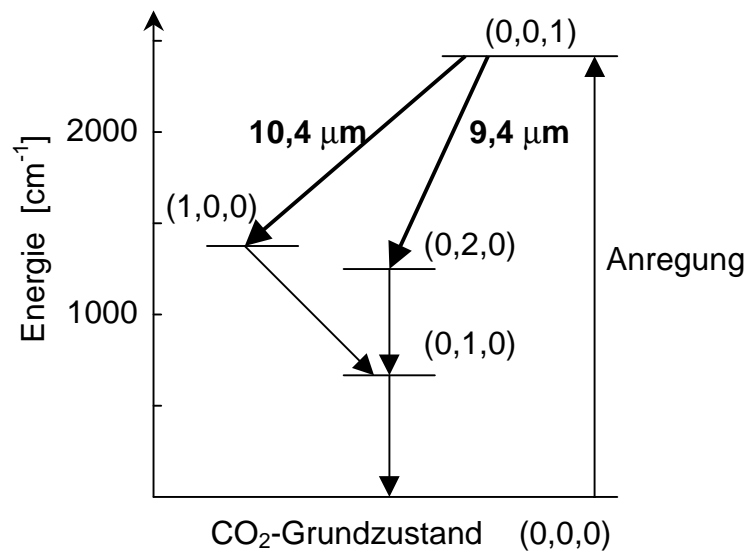
kohärenten (phasengleich) und eng gebündelten Strahlung. Eine Verstärkung dieses Effekts wird durch zwei parallele Spiegel, zwischen denen sich die Strahlung als stehende Welle ausbildet, erreicht.

### 7.2.1 CO<sub>2</sub>-Laser

Der Kohlendioxid-Laser gehört zu der Klasse der Molekülgas-Laser und ist ein Vibrations-Rotations-Laser. Das CO<sub>2</sub>-Molekül ist ein lineares Molekül mit einer Symmetriearchse in der Molekülachse. Eine Symmetrieebene befindet sich senkrecht zu dieser Achse. Man kann drei Normalschwingungsarten des Moleküls unterscheiden, welche in erster Näherung unabhängig voneinander ausgeführt werden können. Diesen Schwingungszuständen entsprechen Energieniveaus des Moleküls. In Abbildung 23 ist das CO<sub>2</sub>-Molekül und dessen Normalschwingungen dargestellt. Abbildung 24 zeigt die dazugehörigen Energieniveaus.



*Abbildung 23: Das CO<sub>2</sub>-Molekül und dessen Normalschwingungen.*



**Abbildung 24:** Energieschema der Vibrationszustände des CO<sub>2</sub>-Moleküls.

Durch Gasentladungen wird das Molekül in das oberste langlebige Laserniveau (0,0,1) angeregt. Die Lebensdauer dieses Niveaus liegt, je nach Gasdruck und Temperatur, im Bereich von 100 μs bis 1 ms. Wie in Abbildung 24 zu erkennen ist, sind zwei Laser-Übergänge mit Wellenlängen von 9,4 μm und 10,4 μm möglich. Das dargestellte Energieschema berücksichtigt nur Vibrationszustände. Rotationszustände spalten die jeweiligen Niveaus auf, so dass die Linien des Emissionsspektrums nicht diskret sind. Nach Berücksichtigungen aller Aufspaltungen ergeben sich vier verbreiterte Linien bei 9,3 μm, 9,6 μm, 10,2 μm und 10,6 μm. In der Literatur wird fast ausschließlich der letzte Wert für die Wellenlänge eines CO<sub>2</sub>-Lasers angegeben.

Die unteren Laserniveaus entleeren sich durch Strahlung niederer Energie. Dabei sind Stoßprozesse mit anderen Molekülen (beigegebenes Helium) und mit der Wand des Entladungsrohres maßgeblich.

### 7.3 Die Laser-Extraktionsanlage

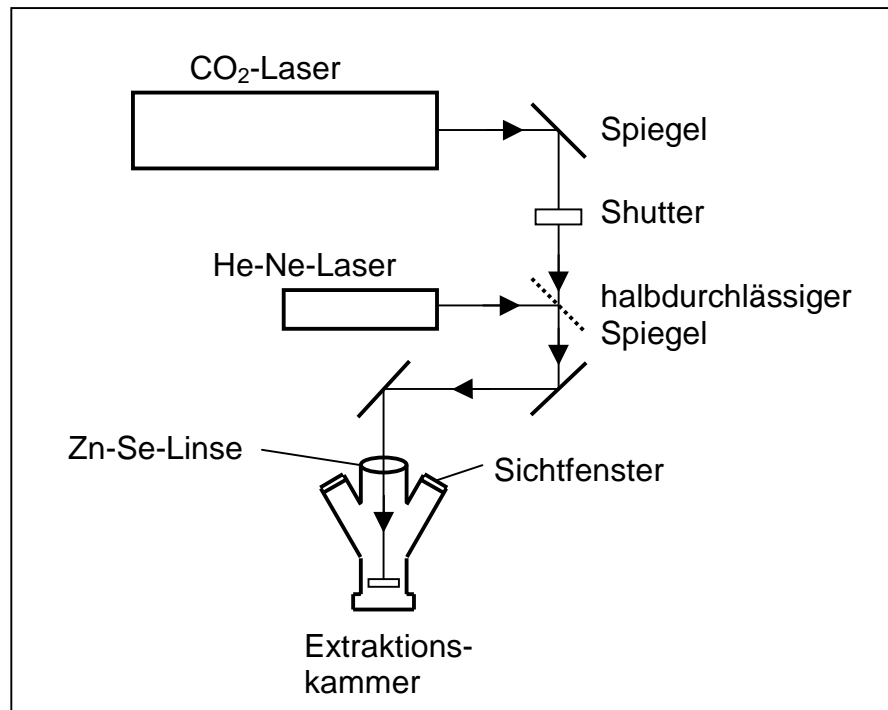
Der in dieser Arbeit verwendete CO<sub>2</sub>-Laser (der Firma „Synrad“) besitzt eine Leistung von 30 W. Der Strahl hat beim Austritt einen Durchmesser von 3 mm, der eine Divergenz von maximal 17' aufzeigt. Die Wellenlänge des CO<sub>2</sub>-Lasers liegt im nicht sichtbaren Bereich ( $\lambda=9,3-10,6 \mu\text{m}$ ), wodurch zur Justierung eine Einkopplung eines sichtbaren Strahls notwendig ist. Der Strahl eines He-Ne-Laser, mit einer Leistung von 1 mW und einer Wellenlänge von 633 nm wird über einen halbdurchlässigen Spiegel eingekoppelt. Durch eine Zn-Se-Meniskuslinse mit einer Brennweite von 127 mm wird der gemeinsame Strahl fokussiert, so dass er im Brennpunkt einen effektiven Durchmesser von 20–30  $\mu\text{m}$  erreicht. Mit Hilfe des sichtbaren Strahls ist es möglich den Brennpunkt auf der Probe zu positionieren. Der letzte Spiegel vor der Extraktionskammer, dessen Oberfläche (wie die der anderen auch) über Stellschrauben in zwei Richtungen beweglich ist, dient der Zielerfassung. Der Lichtspot des He-Ne-Lasers hat durch Streuung eine Ausdehnung von ca. 500  $\mu\text{m}$  auf der Oberfläche. Dadurch wird die Zielerfassung auf diese Größenordnung begrenzt. Der Durchmesser des Verdampfungstrichters an der Oberfläche liegt, bei den hier gewählten Pulsdauern (s.u.) ebenfalls in dieser Größenordnung. Am Grund des Trichters wird ein minimaler Durchmesser von 20–30  $\mu\text{m}$  erreicht. Durch die unterschiedlichen Wellenlängen der Strahlen, ergibt sich ein Dispersionseffekt in der Linse, wobei die Strahlen unterschiedlich gebeugt werden. Dieser Effekt kann durch einen mittigen Durchgang der Strahlen durch die Linse vermindert werden. Die Abweichungen zwischen anvisiertem Brennpunkt und tatsächlichem Ort der Verdampfung werden dadurch gering gehalten (< 200  $\mu\text{m}$ ). Zwei Sichtfenster ermöglichen die Zielerfassung, wobei das eine mit einer digitalen Kamera, das andere mit einer Kaltlichtlampe besetzt ist. Das Signal der Kamera wird auf einem Bildschirm stark vergrößert dargestellt.

Die Energieflussdichte nach der Fokussierung liegt für den CO<sub>2</sub>-Strahl im Bereich von 1 GW·m<sup>-2</sup>. Für einen Dauerpuls ist diese Leistung zu hoch. Um den Laserstrahl zu pulsen, also in kleinen Zeiteinheiten zur Verfügung zu haben, befindet sich ein „Shutter“ im Strahlengang. Dieser ermöglicht es, durch rotierende Scheiben den Strahl zu takten. Die Puls-On- und Puls-Off-Zeiten können zwischen 10<sup>-4</sup> s und 10 s eingestellt werden. Dadurch können Energiepakete zwischen 3·10<sup>-3</sup> und 300 Joule nacheinander ausgestrahlt werden. Pulse von sehr kurzer Dauer führen zu einer niedrigen Erwärmung der benachbarten Bereiche und einem schmalen Verdampfungstrichter. Profil-Messungen, bei denen mehrere Bereiche verdampft werden und die in den durchgeführten Untersuchungen im Vordergrund



standen, sind Energiepakete von jeweils 3 Joule gewählt worden, um eine ausreichende Gasmenge zu erhalten. Dies entspricht bei den hier durchgeführten Messungen Puls-On und Puls-Off-Zeiten von 0,1 s und 1 s. Bei Messungen von Einzelkörnern sollte diese Rate weiter unterschritten werden, um benachbarte Bereiche weniger zu erfassen.

In Abbildung 25 ist der Aufbau der Laser-Extraktionsanlage dargestellt, die Kenngrößen der Laser-Extraktionsanlage sind in Tabelle 9 zusammengestellt.



**Abbildung 25:** Schema der Laser-Extraktions-Anlage.

CO<sub>2</sub> Laser:

Strahldurchmesser	3 mm
Divergenz	<0,3°
Wellenlänge	10,6 μm
Leistung	30 W
Energieflussdichte	≈4 MW·m <sup>-2</sup>
Strahldurchmesser (fok.)	20–30 μm
Energieflussdichte (fok.)	≈1 GW·m <sup>-2</sup>

He-Ne Laser:

Strahldurchmesser	3 mm
Leistung	1 mW
Energieflussdichte	≈0,1 kW·m <sup>-2</sup>
Linse	Zn-Se-Meniskus
Brennweite	127 mm

Shutter

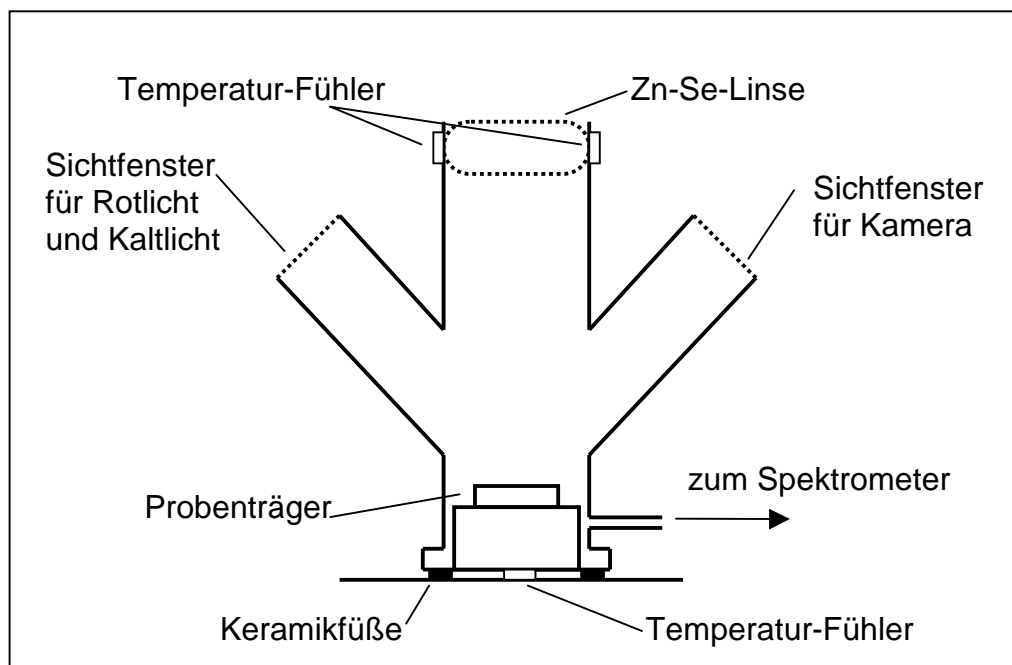
Puls Zeiten	10 <sup>-4</sup> – 10 s
-------------	-------------------------

**Table 9:** Kenngrößen der Laser-Extraktionsanlage.

## 7.4 Die Extraktionskammer

Die Extraktionskammer wurde für den Zweck der Laser-Extraktion entwickelt. Im Anhang ist in Abbildung 65 die Konstruktionszeichnung dieser Extraktionskammer wiedergegeben. Die Sichtfenster sind Teile der CF40-Baureihe der Firma „Pfeiffer-Vakuum“. Der Rest der Kammer wurde in der mechanischen Werkstatt des Max Planck Instituts für Chemie hergestellt, wobei auch hier Ultra-Hoch-Vakuum-Bauteile der „con-flat-Reihe“ genutzt wurden. Die stark zerbrechliche Zn-Se-Linse der Firma „Gerhardt Franck Optronik“ ist passgenau in das Gehäuse eingelassen. Ein Indiumdraht dichtet, zwischen Edelstahl und „Glas“, das Vakuum von der Atmosphäre ab. Zusätzlich ist von außen ein Leckdichtungsmittel aufgetragen worden. Damit werden Leckraten von  $<10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ( $10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) erreicht. Dies bedeutet, dass mittels verschiedener Pumpen ein Restdruck  $<10^{-7} \text{ Pa}$  ( $10^{-9} \text{ mbar}$ ) erzielt wird. Die Kammer ist mit Heizbändern umwickelt, um nach jeder Extraktion den Restgasdruck durch Ausheizen zu vermindern. Ein

Temperaturfühler, auf Höhe der Linse, gibt die gemessene Temperatur an einen Regler weiter, welcher die Temperatur auf max. 140°C einregelt, um zu verhindern, dass der Schmelzpunkt des Indiums (156°C) überschritten wird und leicht gebundene Edelgase aus der Probe extrahiert werden [HUN69]. Ein Temperaturfühler am Boden der Kammer und einer an der Linse, lassen auch ein direktes Ablesen der Temperatur zu. Zusätzlich zu den Heizbändern ist eine Rotlichtlampe (60 W) im Abstand von 10 cm vom Sichtfenster installiert. Damit wird eine Bestrahlung der Probe ermöglicht. Um beim Ausheizen nicht zu viel Wärme an den Untergrund zu verlieren, steht die Kammer auf drei kleinen Keramikscheiben. In Abbildung 26 ist die Extraktionskammer schematisch dargestellt.



**Abbildung 26:** Schematischer Querschnitt durch die Laser-Extraktionskammer.

Mit Hilfe eines schrägen Metallzylinders wurde die effektive Brennweite der Linse ermittelt. Dazu wurde ein abgeschrägter, eloxierter Zylinder in die Kammer eingebracht und strichweise mit dem Laser bestrahlt. Ein Minimum der Breite des Striches der abgetragenen eloxierten Oberfläche ergab, mit der Messung der Höhe dieser Position, die effektive Brennweite. Es zeigte sich, dass der optimale Arbeitsbereich bei 6,2 mm Höhe vom Kammerboden liegt. Je nach Probenhöhe muss dieser Arbeitsbereich, mit Metallscheiben verschiedener Stärke aufgefüllt werden. Diese Scheiben wurden ebenfalls eloxiert, um bei einem versehentlichen „Danebenschießen“ Reflexionen gering zu halten.

## 7.5 Extraktion von chondritischem Material

Wie bereits erwähnt, sind die Gasmengen des verdampften Materials abhängig von der Pulsdauer. Da die verdampfte Masse nicht direkt bestimmt werden kann, muss aus den ermittelten Gaskonzentrationen auf die Masse geschlossen werden. Dazu wird eine Gesamtgesteinsmessung (Bulk) aus der Nähe der Laser-Spots zum Datenvergleich herangezogen. Aus den durch die Bulk-Messungen bekannten Konzentrationen und den Gasmengen aus der Laser-Messung, kann die verdampfte Masse ermittelt werden. Bei diesem Verfahren können Fehler entstehen, da bei der Bestrahlung ein unbekannter Anteil nicht verdampft, sondern explosiv entfernt wird. Dieser Anteil wird mit wachsenden Puls-On-Zeiten größer.

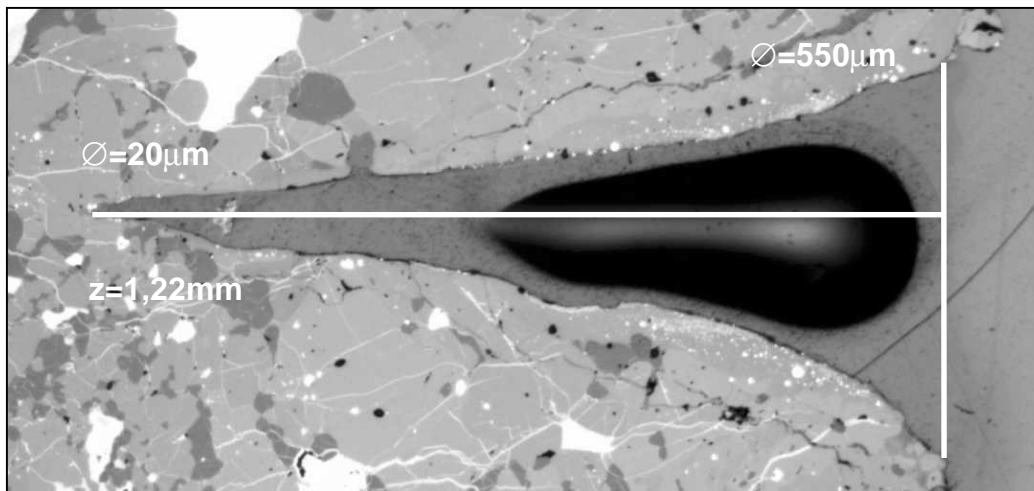
Bei Verdampfungsexperimenten an zwei homogenen Chondriten, „Calliham“ (L6) und „Eldjoug003“ (L6) wurden die freigesetzten Gasmengen in Abhängigkeit von den verschiedenen Puls-Modi ermittelt. Bei konstanter Einstrahlenergie und Puls-Off Zeiten von 1 s wurden die Puls-On-Zeiten zwischen 1,0 s und 0,01 s variiert. Das ermittelte und Blank-korrigierte Signal für  $^{36}\text{Ar}$  ist in Tabelle 10 wiedergegeben.

$^{36}\text{Ar}$ [mV]	PulsOn [s]	PulsOff [s]	Anzahl der Pulse
1 ±1	0,01	1,0	500
19 ±1	0,1	1,0	50
24 ±1	1,0	1,0	5
580 ±1	5	0	1

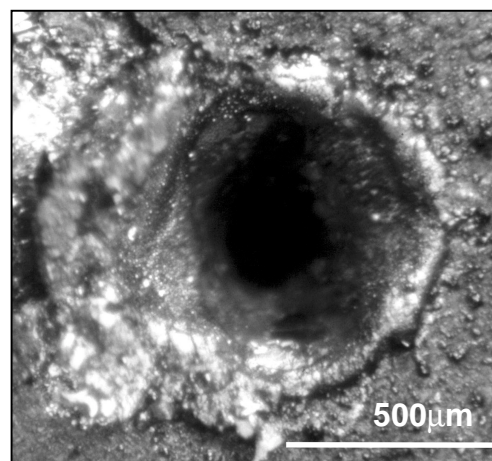
**Tabelle 10:** Signal des  $^{36}\text{Ar}$  bei unterschiedlichen Puls-Modi des Shutter bei konstanter Gesamtenergie (Eldjoug003).

Bei Puls-On-Zeiten  $\geq 1,0$  s ist der explosive Auswurf zu stark, bei Puls-On-Zeiten  $< 0,1$  s ist das Signal zu niedrig. Somit ergab sich eine optimale Puls-On-Zeit von 0,1 s. Eine Erhöhung der Puls-Off-Zeiten ( $\geq 2,0$  s) ergab eine verstärkte Überhöhung für Helium (siehe Kapitel 7.7), bei einer Erniedrigung unter 0,1 s war die Menge des explosiven Auswurfs zu groß. Für die weiteren Messungen wurden daher Puls-On- und Puls-Off-Zeiten von 0,1 s und 1,0 s gewählt. Bedeutsam ist auch die Anzahl der Pulse. Dazu wurde der Chondrit „Calliham“ mit Pulswiederholungen von 12, 25 und 50 bestrahlt.

Dabei zeigte sich ein nahezu lineares Ansteigen der Gasmenge bei Erhöhung der Pulsrate. Bei Pulsraten von 50 wird dabei eine Trichtertiefe von ca. 1 mm erreicht. Ein solches Loch ist in Abbildung 28, sein Querschnitt in Abbildung 27 dargestellt. Man erkennt einen effektiven Durchmesser von ca. 500  $\mu\text{m}$  an der Oberfläche und den minimalen Durchmesser von 20  $\mu\text{m}$  am Boden des Verdampfungstrichters.



**Abbildung 27:** Querschnitt durch einen Verdampfungstrichter bei einer Pulsrate von 50, einer Puls-On-Zeit von 0,1 s und einer Puls-Off-Zeit von 1,0 s. Das Volumen beträgt ca.  $7,8 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3$ . Die Flanken des Trichters waren aufgeschmolzen. Der Trichter ist mit einem Präparationsharz gefüllt; der dunkle Fleck geht ebenfalls auf die Präparation zurück.



**Abbildung 28:** Aufsicht auf einen Verdampfungstrichter erzeugt mit den gleichen Puls-Modi wie in Abbildung 27. (EIDjouf003).

## 7.6 Parameter der Extraktion

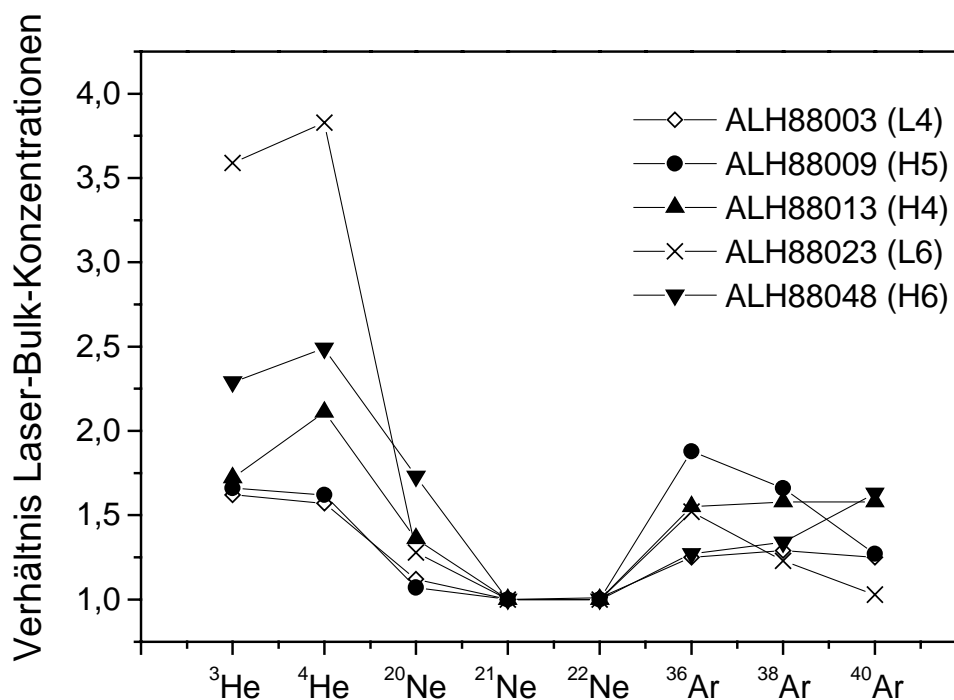
Die mittlere Tiefe der untersuchten Trichter liegt bei  $1,40 \pm 0,18$  mm, der mittlere Durchmesser (bei diesen Tiefen) bei  $42 \pm 15$   $\mu\text{m}$  und der mittlere Oberflächendurchmesser bei  $523 \pm 33$   $\mu\text{m}$ . Damit ergibt sich ein mittleres Volumen von  $9,9 \pm 2,8 \cdot 10^{-5}$   $\text{cm}^3$ . Das entspricht, bei einer mittleren Dichte von  $3,5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  einer Masse von  $0,35 \pm 0,10$  mg. Die großen Unsicherheiten beruhen darauf, dass nur drei repräsentative Querschnitte zur Verfügung standen, dass der oberflächennahe Durchmesser nicht exakt zu bestimmen war und dass das Material mineralogisch nicht homogen ist.

Bei den Intensitäten des fokussierten Laserstrahls nimmt der Reflexionsgrad für Metalle als Funktion der Intensität ab [HER91, MOE89]. Ab einem Wert von  $10^{10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  ist der Reflexionsgrad nahe Null. Diese Intensitäten wurden hier nicht erreicht. Der Grad der Reflexion an Metallen liegt zwischen 0,5 und 0,8 [HER91]. Sind die Inhomogenitäten derart, dass der Strahl auf Metall trifft, so verringert sich die Eindringtiefe und damit das verdampfte Volumen.

Vergleiche mit den gemessenen Edelgasvolumen zeigen, dass ein Teil des Materials nicht verdampft, sondern explosiv ausgeschleudert wird. Eine Mittelung über alle Laser-Messungen, ergibt eine errechnete Masse von  $0,32 \pm 0,04$  mg. Diese Schwankungen ergeben sich aus der Tatsache, dass die chondritischen Körper, auf dieser Skalengröße, inhomogen sind und dass die Körper (unter sich) mineralogisch-chemischen Schwankungen unterliegen. Aus den errechneten Massen, bezüglich Volumen und Gasmenge, lässt sich keine genaue Aussage darüber treffen, wie groß der ausgeworfene, explosive Anteil gegenüber dem verdampften ist; die Unsicherheiten sind zu groß. Diese Vergleiche sind nur mit den errechneten Massen von  $^{21}\text{Ne}$  und  $^{22}\text{Ne}$  durchgeführt worden. Diese werden bei einer Laser-Analyse einzeln nicht überhöht wiedergegeben (siehe folgendes Kapitel).

## 7.7 Extraktionseffizienz der Edelgase

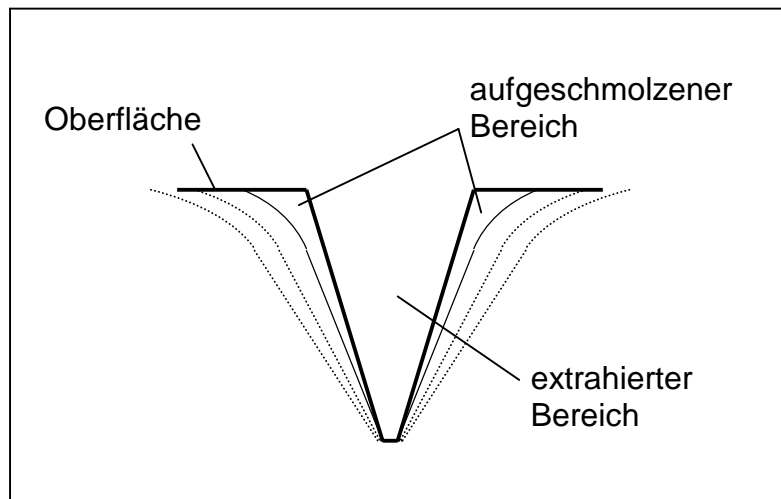
Die Extraktionseffizienz der Edelgase durch die Laser-Extraktion ist in Abbildung 29 dargestellt. Dies geht aus der Verhältnisbildung der Bulk-Konzentrationen zu den mittleren Laser-Konzentrationen hervor. Alle Massen sind auf  $^{21}\text{Ne}$  normiert.



**Abbildung 29:** Unterschiedliche Extraktionseffizienz der Isotope, normiert auf  $^{21}\text{Ne}$ , aus den Verhältnissen von Laser- zu Bulk-Messungen.

Die unterschiedliche Extraktionseffizienz ähnelt einer Massenfraktionierung, hat jedoch andere Ursachen. Man erkennt, dass  $^{21}\text{Ne}$  gegenüber  $^{22}\text{Ne}$  nicht verändert ist. Die leichteren Massen  $^3\text{He}$  und  $^4\text{He}$  sind stark überhöht. Die schwereren Massen des Argon sind etwas weniger überhöht.

Die Überhöhung der Helium-Massen und  $^{20}\text{Ne}$  gegenüber  $^{21}\text{Ne}$  kann einerseits thermisch erklärt werden. Bei der Verdampfung des Materials bildet sich im Körper eine Wärmewelle aus die nach außen wandert. Das Temperaturprofil eines solchen Loches während der Extraktion ist in Abbildung 30 schematisch dargestellt.



**Abbildung 30:** Schematischer Temperaturverlauf während einer Laser-Extraktion.

Man erkennt den aufgeschmolzenen Bereich ebenfalls in Abbildung 27. In diesem Temperaturfeld werden die jeweiligen Edelgase je nach Temperatur freigesetzt. Die leichten Edelgase werden dabei bei niedrigeren Temperatur frei, die schwereren bei höheren Temperaturen. Eine Ausnahme bildet  $^{40}\text{Ar}$ , welches bei ähnlichen Temperaturen freigesetzt wird wie Helium [HUN69]. Diesem Verhalten ist ein zweiter Prozess überlagert. Die kosmogene, radiogene und getrappte Komponente sind an unterschiedliche Mineralphasen „gebunden“ und werden bei unterschiedlichen Temperaturen freigesetzt. Die Überhöhung von  $^3\text{He}$  ist ausschließlich auf die Temperaturabhängigkeit zurückzuführen, da von einer rein kosmogenen Komponente ausgegangen werden kann.  $^4\text{He}$  ist vornehmlich radiogen und ist damit in den Uran- und Thorium-haltigen Phasen zu finden und wird ebenfalls bei niedrigeren Temperaturen freigesetzt. Auch die Überhöhung von  $^{20}\text{Ne}$  und  $^{40}\text{Ar}$  ist nicht alleine temperaturabhängig, die Trägerphase setzt die getrappte Komponente früher frei.

Damit erklärt sich ein überhöhtes Vorkommen der leichteren Edelgase und  $^{40}\text{Ar}$ . Das überhöhte Vorkommen von  $^{36}\text{Ar}$  und  $^{38}\text{Ar}$  lässt sich dagegen nicht eindeutig erklären: (1) Die Anteile von kosmogenen Edelgasen gegenüber getrappten Edelgasen sind bei Laser- und Bulk-Messungen gleich. Daraus ergibt sich keine Argumentation bezüglich der Überhöhung. (2) Die Tatsache, dass Eisen bei den Haupttargetelementen von kosmogenem  $^{36}\text{Ar}$  und  $^{38}\text{Ar}$  bedeutend ist, und der Reflexionsgrad an freiem Eisen erhöht ist, ergibt ebenfalls keine Erklärung. Durchgeführte Rechnungen bezüglich der Produktion an Eisen und freiem Eisen bei verschiedenen Reflexionsgraden ergaben keine signifikanten Ergebnisse, welche diese Überhöhung erklären können. (3) Die Messungen der Argonfraktion wurden mit dem Faraday-Auffänger durchgeführt, da die Gasmenge des  $^{40}\text{Ar}$



für eine Messung mit dem SEV bei einer Betriebsspannung von 2 kV zu hoch waren. Für den Faraday-Auffänger befanden sich die Gasmengen von  $^{36}\text{Ar}$  und  $^{38}\text{Ar}$  am Rande der Nachweisgrenze,  $^{40}\text{Ar}$  konnte im mittleren Messbereich aufgenommen werden. Wie in Kapitel 6.1.4 angesprochen, ist das Detektorsignal zeitabhängig (Memory-Effekt und sinkender Partialdruck). Die leichten Argonisotope unterliegen dadurch stark einem Trend, welcher rechnerisch auf den Zeitpunkt des Gaseinlasses zurückinterpoliert wird. Für kleine Gasmengen wird diese Korrektur ungenau, wodurch eine systematische Überbewertung der leichten Argonisotope nicht auszuschließen ist. (4) Wie schon erwähnt, ist Eisen eines der Haupttargetelemente von kosmogenem  $^{36}\text{Ar}$  und  $^{38}\text{Ar}$ . H-Chondriten enthalten ca. 15-19 Gewichtsprozent metallisches Eisen [WAS74], L-Chondrite ca. 4-9%. Die Wärmeleitfähigkeit von Eisen liegt mit  $\approx 75 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  weit über dem der silikatischen Matrix ( $\approx 2\text{-}3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Dadurch könnte zu den Gasmengen aus der Verdampfung ein weiterer Beitrag aus den naheliegenden Bereichen des freien Eisens hinzukommen und so zu einer relativen Überhöhung der leichten Edelgasisotope führen.

Effekte der gleichen Größenordnung und Schwankung erhielten die Mitarbeiter an der ETH-Zürich [VOG99], welche an einer ähnlichen Laser-Extraktionsanlage, jedoch mit einem anderen Schwerpunkt, arbeiten. Da für die hier durchgeführten Tiefenprofile  $^{21}\text{Ne}$  und  $^{22}\text{Ne}$  im Mittelpunkt standen und diese nicht verändert wiedergegeben werden, kann nur über diese Isotope eine genaue Aussage getroffen werden. Eine Bestimmung der Gaskonzentrationen ist nur mit der Messung einer benachbarten Bulk-Probe präzise. Verhältnisse von  $^{22}\text{Ne}$  zu  $^{21}\text{Ne}$  werden dagegen sehr genau bestimmt. Über die überhöhten Isotope lässt sich nur eine Aussage als Funktion mit der Tiefe treffen.

Beim vollständigen Verdampfen einzelner isolierter Proben treten unterschiedlichen Extraktionseffizienzen nicht auf [VOG99].

## 7.8 Doppelt geladene Atome und Moleküle

Doppelt geladene Atome und Moleküle werden durch das Magnetfeld teilweise auf Massen abgebildet, die einfach geladenen Edelgasatomen der halben Masse entsprechen (vgl. Kapitel 6.1.4). Das Molekül  $\text{CO}_2$  besitzt die doppelte Atommasse wie  $^{22}\text{Ne}$ . Wird das  $\text{CO}_2$ -Molekül in der Ionenquelle doppelt geladen, so wird am Detektor ein überhöhtes  $^{22}\text{Ne}$ -Signal nachgewiesen. Das gleiche gilt für  $^{40}\text{Ar}^{++}$  bezüglich  $^{20}\text{Ne}^+$ . Eine Korrektur wird dadurch möglich, dass in der Argonfraktion die Signale der Massen 20 und 22 mitgemessen werden. Da in der Argonfraktion kein Neon vorhanden ist, sind diese Signale

auf doppeltgeladenes  $^{40}\text{Ar}$  und  $\text{CO}_2$  zurückzuführen. Daraus erhält man die jeweiligen Anteile an doppeltgeladenen Massen und korrigiert so die Signale in der Neonfraktion. Die Verhältnisse aus einfach- zu doppeltgeladenen Massen ist abhängig vom Partialdruck. Mit kleiner werdenden Gasmengen nimmt der Anteil der doppelt geladenen Massen zu. Bei Bulk-Messungen mit Probenmassen von 100-150 mg liegt der Faktor für  $^{40}\text{Ar}^{++}/^{40}\text{Ar}^+$  bei 0,08; für Lasermessungen mit verdampften Massen von 1-2 mg ist der Faktor 0,11. Der Faktor für  $\text{CO}_2^{++}/\text{CO}_2^+$  ist für Bulk-Messungen  $< 0,01$  und mit den niedrigen  $\text{CO}_2$  Mengen damit vernachlässigbar [LOE93]. Für Laser-Messungen beträgt dieser Wert 0,01-0,02. Da bei den Lasermessungen die Probe beim Abkühlen ständig weiter Gase freisetzte kam es bei den ersten Analysen zu hohen Konzentrationen an  $^{40}\text{Ar}$  und  $\text{CO}_2$ , welche große Korrekturen notwendig machte. Daher ist es wichtig die Kammer zu einem definierten Zeitpunkt zu schließen um damit eine effektive Reinigung und Trennung vor dem Gaseinlass in den Spektrometerbereich zu gewährleisten.

Der  $\text{CO}_2$ -Gehalt nimmt während des Aufenthalts im Spektrometer stetig exponentiell ab, da kurz nach Beginn der Messung der Spektrometerbereich vom Restvolumen durch ein Ventil abgetrennt wird. Die Getter die in diesem Bereich befindlich sind, verringern den  $\text{CO}_2$ -Gehalt stetig. Nicht geklärt ist, warum der Gehalt an  $\text{CO}_2^{++}$  auf der Position von  $^{22}\text{Ne}$  nicht mit diesem exponentiellen Abfallen korreliert, sondern konstant bleibt.

## 7.9 Ablauf der Lasermessung

Eine Laser-Messung beginnt mit dem Laden der Probe. Für Messungen an Oberflächen von meteoritischen Körpern werden diese zunächst kartiert, um die Oberflächenpositionen später in der Kammer wiederzuerkennen. Dazu wird mit einer Gravurnadel ein Millimeter-Raster in die Oberfläche eingeritzt.

Die Kammer und die Probe werden mit Alkohol gereinigt. Der Probenträger wird mit entsprechenden Unterlegscheiben unterfüttert, die Probe platziert und die Kammer geschlossen. Daran schließt sich eine Ausheizung von 48 bis 72 Stunden an (siehe Kapitel 7.4). Nach der Abkühlung werden die zwei Laser erneut justiert, die Kamera und die Kaltlichtlampe in Position gebracht. Nachdem die jeweiligen Puls-On-Zeiten, Puls-Off-Zeiten und die Pulsraten am Shutter eingestellt sind und dieser noch geschlossen ist, d.h. der  $\text{CO}_2$ -Laserstrahl blockiert ist, wird mit dem Strahl des He-Ne-Lasers der Ort der Extraktion, mittels des letzten Spiegels vor der Kammer, angezielt. Ein mittiger Durchgang durch die Linse wird durch den zweitletzten Spiegel eingestellt. Die Ventile zu den Pumpen

werden geschlossen und der Shutter aktiviert. Der Strahl des CO<sub>2</sub>-Lasers verdampft nun (nach den eingestellten Puls-Modi) den angezielten Bereich.

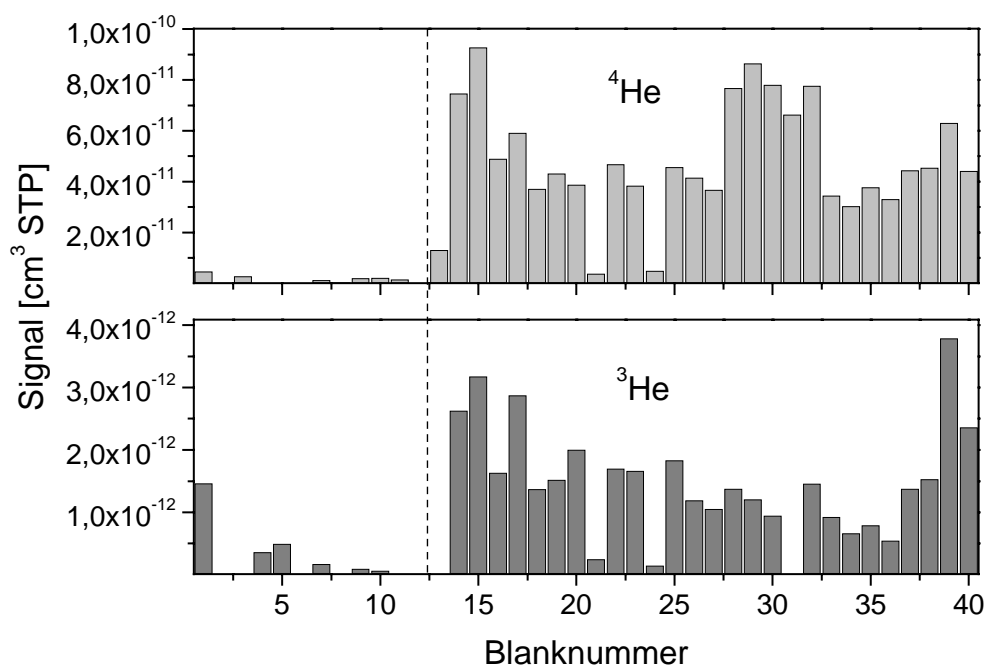
Nach der Extraktion wird das Gasgemisch an den Gettern gereinigt (Kapitel 6.1.3) und an den Kühlfallen getrennt. Wichtig ist, dass die Kammer nach einer Ausdehnungszeit des Gases (fünf Minuten) geschlossen wird, da die Probe noch warm ist und weiterhin Gase freisetzt. Wie in Kapitel 6.1.4 beschrieben, werden zunächst Helium und Neon gemessen und danach Argon. Da Argon nach dem Anfrieren nicht mehr auf das gesamte Volumen ausgedehnt wird, wird nach Beginn der Neon Messung die Kammer ausgeheizt. Eine Ausheizung durch die Heizbänder und die Rotlichtlampe über einen Zeitraum von zwei Stunden ist zwischen den einzelnen Extraktionen ausreichend. Der genaue Ablauf der Messung ist im Anhang aufgezeigt. Tabelle 11 gibt wieder, welche Detektoren bei den Proben-Messungen, bei den Blank-Messungen und bei den Eich-Messungen benutzt wurden.

Elemente	Messung	Detektor
Helium, Neon	Probe, Eichung	SEV
Argon	Probe, Eichung	Faraday
Helium, Neon	Blank	SEV
Argon	Blank	SEV

***Tabelle 11:*** Wahl des Detektorsystems für die jeweilige Messung und das jeweilige Element.

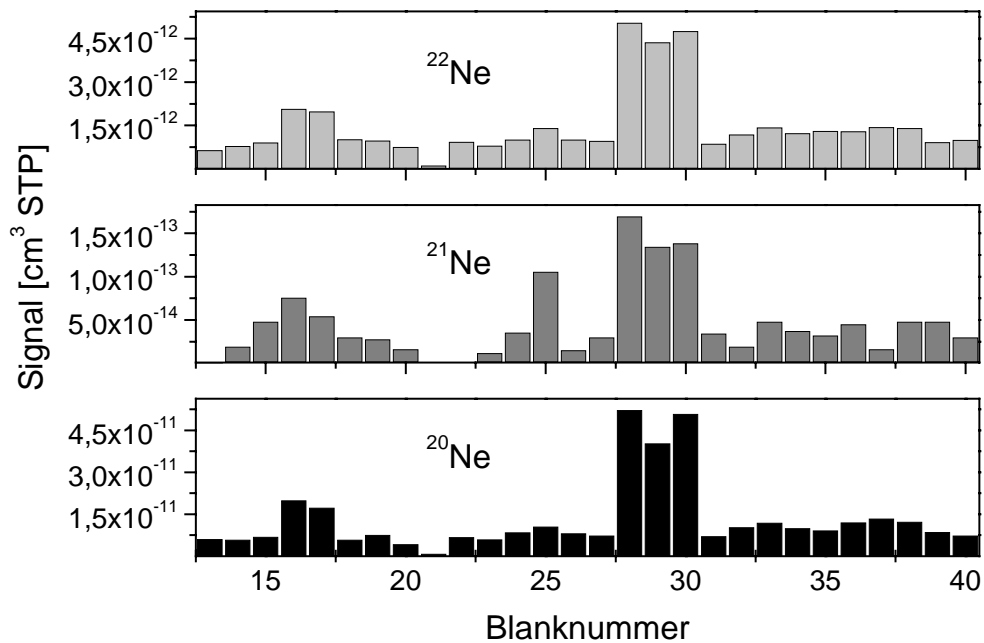
## 7.10 Verlauf der Blankmessungen

Die in Kapitel 6.2.3 exemplarischen Blank-Werte bei Laser-Messungen sollen in diesem Kapitel am Verlauf der Signale aufgezeigt werden. In Abbildung 31, 32 und 33 ist der Verlauf der Blank-Signale über einen Zeitraum von 20 Monaten dargestellt. Ab Blanknummer 12 wurde die Empfindlichkeit des SEV erhöht (vgl. Kapitel 6.2.2). Diese Erhöhung um einen Faktor von ca. elf ist in den Abbildungen zu erkennen. Die Schwankungen und Spitzen der Signale sind mit Vorkommnissen wie Probenladen oder Lecks korreliert.



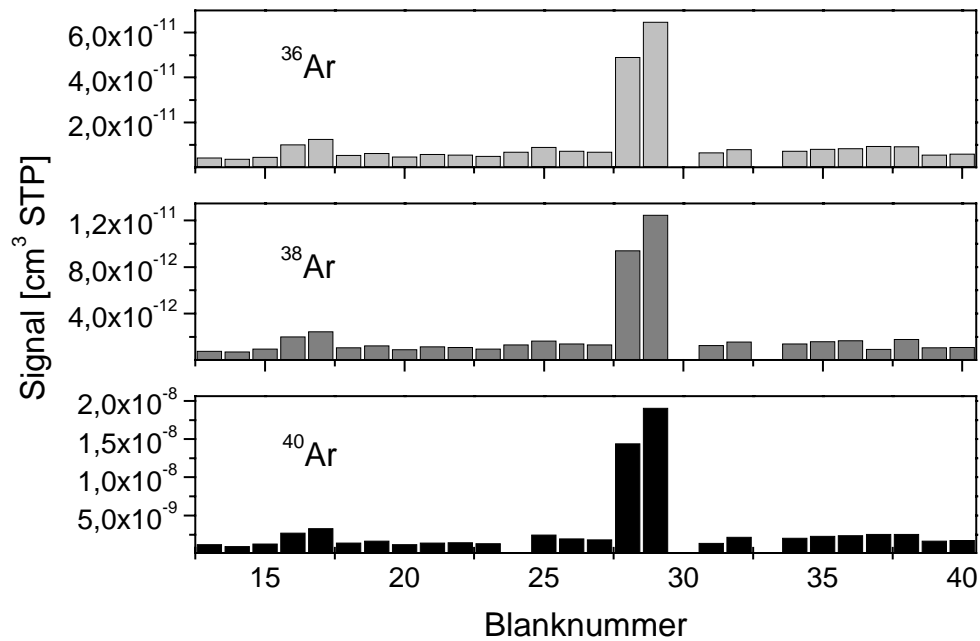
**Abbildung 31:** Verlauf der dem Blank-Signal reiner Edelgase entsprechende Helium-Gasmengen. Nach 12 Messungen wurde die Empfindlichkeit des SEV erhöht. Die Blanknummern 13 und 31 sind für  $^3\text{He}$  entfallen.

Nach Blanknummer 27 wurde die Linse der Extraktionskammer gewechselt. Danach ist ein starker Anstieg der Neon und Argon Signale zu erkennen. Bei den Signalen von Helium ist keine starke Erhöhung festzustellen. Die  $^3\text{He}$ -Signale bei Nummer 13 und 31 sind nicht dargestellt, da diese mit zu großen Fehlern behaftet sind.



**Abbildung 32:** Verlauf der dem Blank-Signal reiner Edelgase entsprechende Neon-Gasmengen. Ein starker Anstieg nach Nummer 27 ist auf das vorangegangene Wechseln der Linse zurückzuführen.

Bei Argon sind nicht alle Messungen mit dem SEV durchgeführt worden. Nummer 30 und 33 wurden hier mit dem Faraday-Auffänger gemessen, dadurch werden die niedrigen Werte falsch wiedergegeben. Bei Blanknummer 24 ist das Signal von  $^{40}\text{Ar}$  nicht dargestellt.



**Abbildung 33:** Verlauf der dem Blank-Signal reiner Edelgase entsprechende Argon-Gasmengen. Blanknummer 30 und 33 entsprechen Faraday-Messungen. Nummer 24 ist für  $^{40}\text{Ar}$  nicht angegeben.

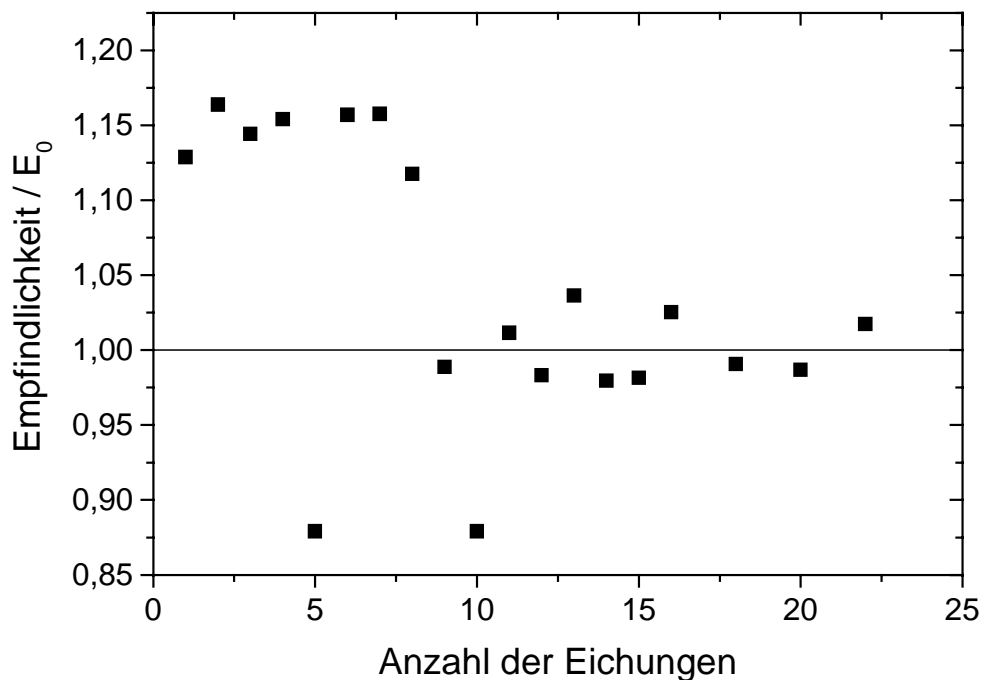
Die Blank-Messungen von Argon wurden mit dem empfindlichen SEV aufgenommen. Die Proben mit ihrem höherem Signal wurden dagegen mit dem Faraday-Auffänger gemessen. Um diese unterschiedlichen Verstärkungen miteinander verrechnen zu können, wurde der Verstärkungsfaktor ermittelt (siehe Kapitel 7.11). Die Verstärkungsfaktoren für Argon bei einer SEV-Spannung von 2 kV sind in Tabelle 12 dargestellt.

Argon-Isotop	Verstärkung SEV -Faraday
$^{40}\text{Ar}$	14.400
$^{38}\text{Ar}$	15.300
$^{36}\text{Ar}$	16.000

**Tabelle 12:** Verstärkung des SEV bei einer Spannung von 2 kV gegenüber dem Faraday-Auffänger für Argon.

## 7.11 Eichung der Lasermessung

Analog zu Kapitel 6.2.2 soll in diesem Kapitel die Eichung der Mess-Signale aufgezeigt werden. Da die Gasmengen des Eichschlucks auf Bulk-Messungen abgestimmt sind, müssen sie an das kleinere Volumen bei Laser-Messungen angepasst werden. Um dies zu gewährleisten, muss der Eichschluck verdünnt werden. Dazu wird dieser auf dasselbe Volumen einer Proben-Messung ausgedehnt. Ein SAES-Getter wird danach geschlossen und der Rest des Schlucks abgepumpt. Damit ergibt sich eine Verdünnung um einen Faktor  $12,7 \pm 0,6$ . Um Neon und Argon mit dem SEV bzw. dem Faraday-Auffänger in einem empfindlichen Messbereich messen zu können, genügt eine Verdünnung, für Helium wird doppelt verdünnt. Die Unsicherheit bei der Ermittlung des Verdünnungsfaktors geht direkt als Fehler in die Ermittlung der Empfindlichkeit ein. In Abbildung 34 ist der Verlauf der Empfindlichkeiten, normiert auf den Mittelwert der letzten zehn Neon-Eichungen dargestellt.



**Abbildung 34:** Verlauf der SEV-Empfindlichkeiten für Neon über einen Zeitraum von 20 Monaten, normiert auf den Mittelwert der letzten zehn Werte ( $E_0=9,43 \cdot 10^{11} \text{ mV} \cdot \text{cm}^{-3} \text{ STP}$ ).

Die Stufe nach acht Eichungen zeigt ein unstetiges Abfallen der Empfindlichkeit des SEV. Reziprok dazu steigt die Empfindlichkeit des Faraday-Auffängers. Solche plötzlichen Änderungen der Empfindlichkeit wurden bei Eichungen für Bulk-Messungen einige Male beobachtet (vgl. Kapitel 6.2.2) und waren meist mit Vorkommnissen wie Stromausfällen etc. korreliert. Für diesen Sprung in den Eichungen bei Laser-Messungen gibt es allerdings keine offensichtliche äußeren Einwirkungen und damit Erklärungen.

Die in Kapitel 7.10 dargestellte Verstärkung des SEV gegenüber dem Faraday-Auffänger wurde mit Hilfe eines Eichschlucks ermittelt. Dazu wurde ein Schluck mit beiden Detektoren gemessen und das Verhältnis der Signale errechnet. Dieses Verhältnis ist nicht konstant, da die Empfindlichkeit des SEV variiert und die Spannung von 2 kV im Wechsel mit Bulk-Messungen (1,6 kV) neu eingestellt wird.

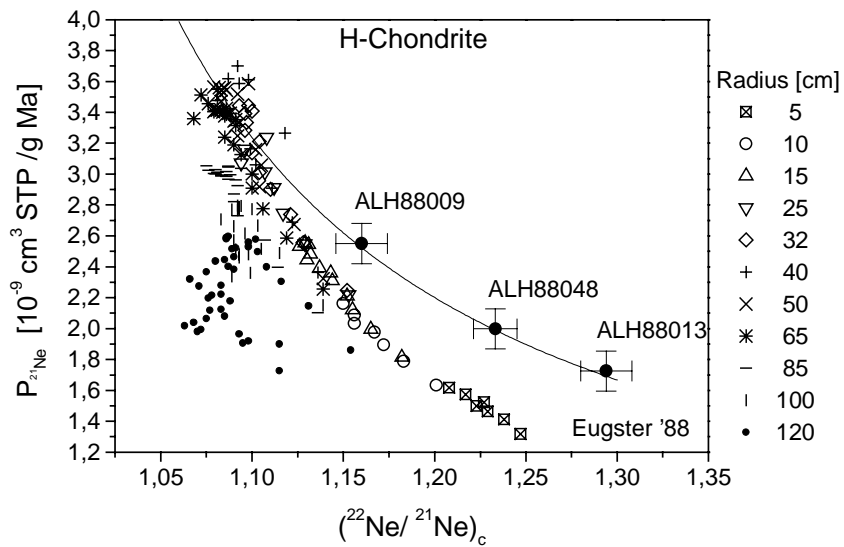


## 8 Die Suche nach SCR Effekten

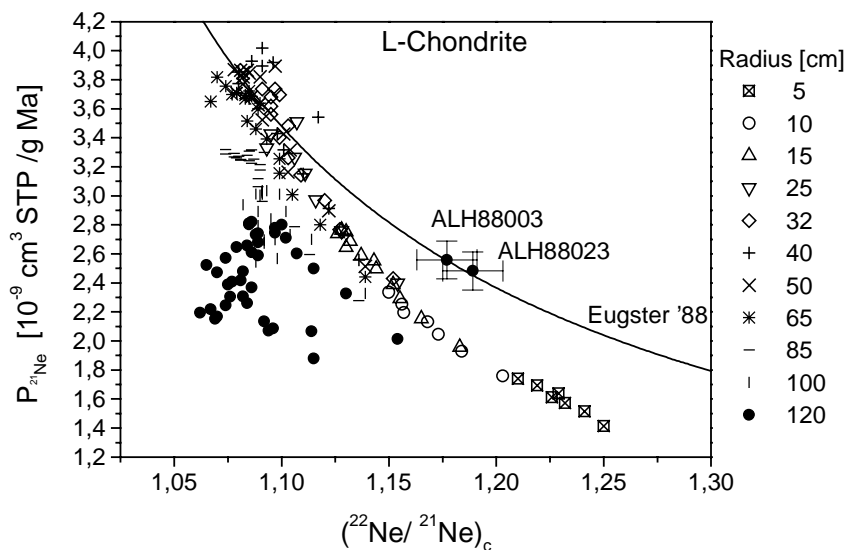
Wie schon im Kapitel 5.3 ausgeführt, kann ein effektiver Beitrag zur kosmogenen Komponente durch SCR durch die Analyse von Radionukliden, z.B.  $^{26}\text{Al}$ , nachgewiesen werden. Der Nachweis durch stabile Nuklide ist bislang nur in Mondgesteinen gelungen, da es nicht der Reibung der Erdatmosphäre beim Durchflug ausgesetzt war (Ablation). Untersuchungen am Meteoriten „Salem“ zeigten bezüglich  $^{26}\text{Al}$  eine klare SCR-Signatur [NIS90], ein Einfluss auf die Neon-Isotope konnte jedoch nicht nachgewiesen werden, was durch den Verlust der sensitiven Bereiche durch Ablation erklärt werden kann [REE92]. Auch eine mehrstufige Bestrahlung kann die Ursache dafür sein (vgl. Kapitel 8.5.5).

Einige Voraussetzungen müssen erfüllt werden um anhand von Tiefenprofile bezüglich Neon-Isotopen einen SCR-Beitrag nachzuweisen: (1) Kleine Meteorite erfahren durch ihr günstigeres Volumen-Oberflächen-Verhältnis eine verminderte Ablation. (2) Die Probe sollte aus dem Oberflächenbereich des Meteoroiden stammen (dies ließe sich erst nach der Analyse eines Tiefenprofils klären). (3) Getrappte Edelgaskomponenten sollten niedrig sein, da deren Korrektur bei einem vorhandenen SCR-Beitrag nicht möglich ist. (4) Terrestrische Kontamination sollte minimal sein (siehe (3)). (5) Eine möglichst kurze Bestrahlung im Asteroidengürtel wäre von Vorteil. Dies würde sich in niedrigen Absolutkonzentrationen der kosmogenen Edelgase zeigen. (6) Ein Hinweis durch  $^{26}\text{Al}$ -Daten auf SCR-Effekte sollte vorhanden sein.

Diese Voraussetzungen werden von einigen kleinen Meteoriten aus der Antarktis erfüllt. Ein hohes  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  deutet auf einen sehr kleinen Meteoroiden und / oder auf eine SCR-Signatur hin. In Abbildung 35 und 36 sind die reinen GCR-Modelle [LEY00] für verschiedene Größen von Meteoroiden wiedergegeben (vgl. Kapitel 5.3). Die durchgezogene Linie stellt die empirische Korrelation von Eugster dar. Zusätzlich sind die experimentellen Daten der fünf untersuchten Meteoriten eingetragen. Die experimentell bestimmten Konzentrationen von  $^{21}\text{Ne}$  ergeben, mit den von Eugster vorgeschlagenen Produktionsraten, die berechneten Bestrahlungsalter [EUG88]. Folglich stimmen diese Produktionsraten mit der Korrelation nach Eugster überein. Das reine GCR-Modell unterschätzt jedoch die Produktionsraten. Wie in Kapitel Modellrechnungen aufgezeigt, muss für diese kleinen Körper ein SCR-Beitrag vorhanden sein (vgl. Abb. 15 und 16 in Kapitel 5.3).



**Abbildung 35:** Modellrechnungen für die Produktionsrate von  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion von Größe und Position in bestrahlten H-Chondriten. Berechnung für reine GCR-Bestrahlung [LEY00]. Die durchgezogene Linie stellt die Korrelation nach Eugster dar. Die experimentelle Daten stammen aus Bulk-Analysen.



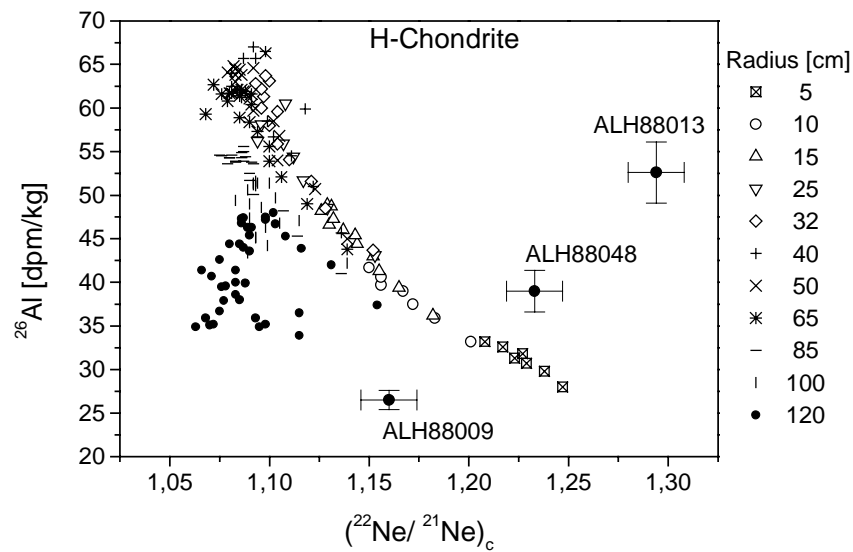
**Abbildung 36:** Modellrechnungen für die Produktionsrate von  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion von Größe und Position in bestrahlten L-Chondriten. Berechnung für reine GCR-Bestrahlung [LEY00]. Die durchgezogene Linie stellt die Korrelation nach Eugster dar. Die experimentelle Daten stammen aus Bulk-Analysen.

## 8.1 Daten der $^{26}\text{Al}$ -Aktivitäten

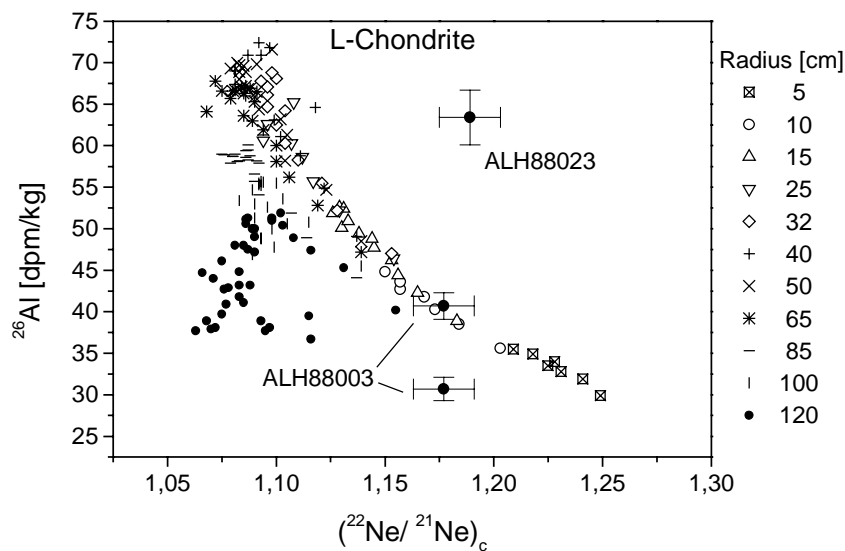
Experimentell werden  $^{26}\text{Al}$ -Aktivitäten auf zwei Arten bestimmt. Mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie AMS (accelerator mass spectrometry) werden Probenmengen von 10 bis 100 mg (Steinmeteorit) auf deren Aktivität untersucht. Diese Untersuchungsmethode ist nicht zerstörungsfrei, liefert jedoch aufgrund der hohen Empfindlichkeit exakte Daten. Sie weisen zum jetzigen Zeitpunkt eine systematische Unsicherheit von 15% auf.

Die zweite Möglichkeit  $^{26}\text{Al}$ -Aktivitäten zu bestimmen ist die  $\gamma$ - $\gamma$ -Koinzidenztechnik. Dabei wird die beim  $\beta^+$ -Zerfall auftretende Vernichtungsstrahlung registriert. Diese zerstörungsfreie Messmethode hat den Nachteil, dass durch die niedrige Nachweisempfindlichkeit Probenmengen von 10 bis 100 g (Steinmeteorit) benötigt werden. Dadurch ergibt sich ein integraler Wert, welcher zur Aussage über Aktivitäten als Funktion der Abschirmtiefe wenig nützlich ist (bei kleinen Meteoriten) und nur eine untere Grenze angibt. Daraus resultiert, dass gemessene  $^{26}\text{Al}$ -Aktivitäten im Vergleich zu Modelldaten sehr stark überhöht sein müssen, um einen Hinweis auf einen SCR-Beitrag zu leisten. Die hier gezeigten Daten entstammen bei  $\gamma$ - $\gamma$ -Koinzidenzmessungen der gesamten  $^{26}\text{Al}$ -Probe. Proben für die AMS-Messungen wurden aus diesen  $^{26}\text{Al}$ -Probe entnommen, wobei deren genaue Position nicht bekannt ist, aber nahe den Proben der Edelgas-Analysen liegen.

Bei einem Vergleich von experimentell bestimmten Daten und Modelldaten ist darauf zu achten, dass die Aktivitäten in Sättigung sind (vgl. Kapitel 5.1). Bei den hier bestimmten Bestrahlungsaltern ( $> 8$  Ma) ist dies bei einer Halbwertszeit des  $^{26}\text{Al}$  von 0,705 Ma gegeben. In Abbildung 37 und 38 sind die experimentell bestimmten  $^{26}\text{Al}$ -Aktivitäten [NEU96] zusammen mit den Modellrechnungen für reine GCR-Bestrahlung für H- und L-Chondrite dargestellt. Die Neon-Daten entstammen dieser Arbeit. Die angegebenen Unsicherheiten [NEU96] entsprechen, wie oben geschildert, in dieser Abbildung nicht den wahren Fehlern. Die Probenlokationen sind in der Diskussion der jeweiligen Meteorite aufgeführt.



**Abbildung 37:** Modellrechnungen für die Aktivität von  $^{26}\text{Al}$  als Funktion von Größe und Position in bestrahlten H-Chondriten. Berechnung für reine GCR-Bestrahlung [LEY00]. Der experimentelle Wert für ALH88009 stammt aus einer  $\gamma\gamma$ -Koinzidenzmessungen, die anderen aus AMS-Messungen.



**Abbildung 38:** Modellrechnungen für die Aktivität von  $^{26}\text{Al}$  als Funktion von Größe und Position in bestrahlten L-Chondriten. Berechnung für reine GCR-Bestrahlung [LEY00]. Der höhere experimentelle Wert für ALH88003 stammt aus einer  $\gamma\gamma$ -Koinzidenzmessungen; der niedrigere, wie auch der Wert für ALH88023, stammen aus AMS-Messungen.

## 8.2 Tiefenprofile in verschiedenen Meteoriten

Beiträge zur Produktion von Neonisotopen durch SCR sind nur wenige Zentimeter unter der Oberfläche von Meteoroiden zu finden (vgl. Abb. 11). Abhängig von Ort und Zeitraum der kosmischen Bestrahlung und von der Größe der Ablation, können durch einen SCR-Effekt erzeugte Isotopen-Anomalien in Tiefenprofilen nachgewiesen werden. Diese Tiefenprofile sollten auf einer möglichst kleinen Skala analysiert werden. Die Laser-Extraktionstechnik bietet diese Möglichkeiten. An einer Querschnittsscheibe eines Meteoriten kann, senkrecht zur Kruste, Material in verschiedenen Tiefen extrahiert und dessen Isotopenzusammensetzung analysiert werden. Die Laser-Spots mit einem Durchmesser von ca. 0,5 mm erlauben Tiefenprofilschritte in dieser Größenordnung. Je Laser-Spot werden nur ca. 0,3 mg Masse verdampft. Dies ist zu wenig um bei der massenspektrometrischen Analyse eindeutige Signale jenseits des Untergrundsignals zu erhalten. Abhängig vom Bestrahlungsalter und der chemischen Zusammensetzung, sollten die zu untersuchenden Gasmengen in etwa chondritische Probenmengen von 1-3 mg entsprechen. Eine allen Tiefenprofilen vorangegangene Bulk-Analyse der Meteorite, ergab die jeweiligen Konzentrationen an Edelgasisotopen. Aus diesen konnte abgeschätzt werden, wie viele Laserspots nötig waren, um die entsprechende minimale Gasmenge zu extrahieren. In den untersuchten Meteoriten wurden vier bis acht Spots je Tiefenschritt gesetzt. Die Nutzung mehrere paralleler Spots birgt weiterhin den Vorteil, dass eventuelle laterale chemische Inhomogenitäten auf dieser Größenskala gemittelt werden.

Es zeigte sich jedoch, dass die räumlichen Inhomogenitäten zu ausgeprägt sind, um eine exakte Massenabschätzung und damit einer Konzentrationsbestimmung durchführen zu können (vgl. Kapitel 7.6). Dadurch wurde das Hauptaugenmerk auf die Isotopenverhältnisse gelenkt, welche unabhängig von der extrahierten Masse sind. Da der Nachweis von SCR-Effekten im Mittelpunkt des Interesses stand, lag der Schwerpunkt auf der Analyse von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ .

Bei der Auswahl der Meteorite versprochen vor allem ALH88013 und ALH88023 durch ihre relativ hohe  $^{26}\text{Al}$ -Aktivität einen eventuellen Erfolg bei der Suche nach SCR-Effekten.

Die folgenden Kapitel geben die Analyseergebnisse und die Interpretationen der fünf untersuchten Meteorite wieder. Das jeweilige Kapitel ist so aufgebaut, dass zunächst die gemessenen  $^{26}\text{Al}$ -Aktivitäten mit den Modellen verglichen werden. Einer Beschreibung der Position der einzelnen Proben im jeweiligen Meteorit folgen die erzielten Edelgasdaten aus Laser- und Bulk-Analysen. Die Kapitel schließen mit einer Interpretation der Daten.

Tabelle 13 stellt die Basisdaten der fünf untersuchten Chondrite zusammen. Die Fundmasse und der Meteoriten-Typ sind aus der Meteoriten-Datenbank „Metbase“ entnommen [MET99], die  $^{26}\text{Al}$ -Daten stammen aus der Arbeit von Neupert [NEU96], wobei die mit  $^{\S}$  gekennzeichneten Daten sich auf  $\gamma\text{-}\gamma$ -Koinzidenzmessungen beziehen. Die bei den Fundmassen in Klammern angegebenen Zahlen sind errechnete Radien. Hierbei wurde von einer Kugelgestalt und einer mittleren Dichte von  $3,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  ausgegangen. Ebenfalls geht die Annahme ein, dass der Meteorit in einem Stück gefallen ist und nicht nur einen Bruchteil eines größeren Körpers darstellt. Die Neondaten beziehen sich auf Bulk-Messungen der jeweiligen Meteorite. Bei den gemessenen Konzentrationen ist die Unsicherheit etwa 5%, bei den errechneten Bestrahlungsaltern  $T_{21}$  kleiner 15% aus, wogegen die Verhältnisse mit einer Unsicherheit kleiner 1% ermittelt werden. Die Lokationen der Bulk-Messungen werden in den jeweiligen Kapiteln aufgezeigt.

Name des Meteorits	Typ	Fundmasse [kg] (Radius) [cm]	$^{26}\text{Al}$ [dpm/kg]	$^{21}\text{Ne}$ [ $10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$ ]	$T_{21}$ [Ma] (nach Eugster)	$(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_c$
ALH88003	L4	0,341 (2,9)	$40,7 \pm 1,6^{\S}$ $30,7 \pm 1,4$	$4,58 \pm 0,23$	$17,9 \pm 2,7$	$1,177 \pm 0,003$
ALH88009	H5	0,152 (2,2)	$26,5 \pm 1,1^{\S}$	$8,22 \pm 0,41$	$32,2 \pm 4,8$	$1,159 \pm 0,002$
ALH88013	H4	0,089 (1,8)	$52,6 \pm 3,5$	$1,66 \pm 0,08$	$9,63 \pm 1,44$	$1,295 \pm 0,003$
ALH88023	L6	0,044 (1,44)	$63,4 \pm 3,3$	$6,16 \pm 0,31$	$24,8 \pm 3,7$	$1,189 \pm 0,003$
ALH88048	H6	0,021 (1,1)	$39,0 \pm 2,4$	$1,66 \pm 0,04$	$8,30 \pm 1,2$	$1,234 \pm 0,004$

**Tabelle 13:** Basisdaten der fünf untersuchten Meteorite. Die in Klammern angegebenen Radien beziehen sich auf eine Kugelgestalt und eine mittlere Dichte von  $3,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Die mit  $^{\S}$  gekennzeichneten  $^{26}\text{Al}$ -Daten [NEU96] stammen aus  $\gamma\text{-}\gamma$ -Koinzidenzmessungen, die nicht gekennzeichneten aus AMS-Analysen.

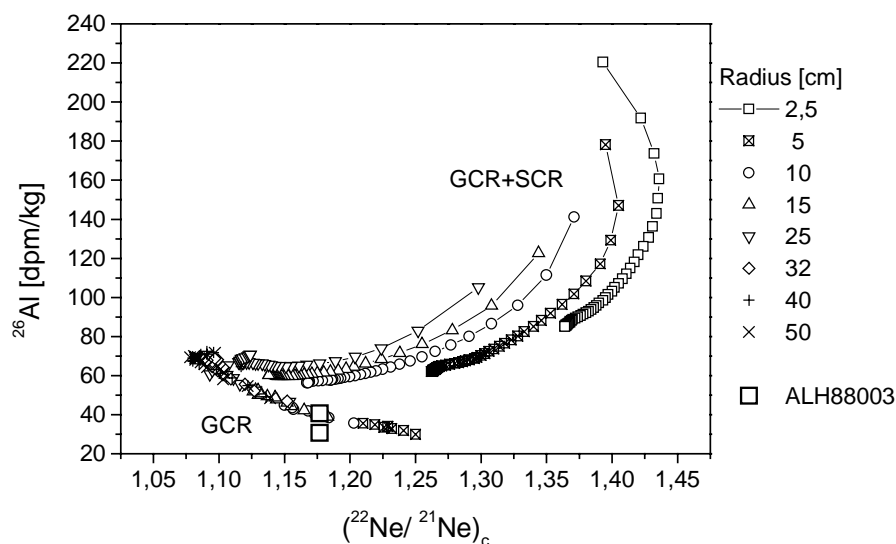
### 8.3 Fehlerbetrachtung

Für Bulk-Analysen, mit typischen Probenmengen von 100-150 mg, sind die maximalen Unsicherheiten von Scherer [SHE98] abgeschätzt worden. Die Konzentrationen der Edelgase Helium, Neon und Argon werden mit einer Unsicherheit kleiner 5%, die Verhältnisse der Konzentrationen werden mit einer Unsicherheit von weniger 1% bestimmt. Für die Berechnung der Bestrahlungsalter nach der empirischen Beziehung von Eugster wird eine Unsicherheit von 15% angegeben.

Bei den hier durchgeführten Laser-Analysen, mit Probenmengen von 1-5 mg werden die Unsicherheiten wie folgt abgeschätzt: Die Unsicherheiten der Verhältnisse der Konzentrationen ergibt sich aus den Einzelfehlern der statistischen Schwankungen der Signale eines Messzyklus, dem Fehler des Untergrundsignals und dem Fehler bei der Korrektur der doppelt geladenen Gase. Die Gesamt-Unsicherheit von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  wurde im einzelnen bestimmt und ist im Mittel kleiner als 1,5%. Bei der Bestimmung der Konzentrationen ist zudem die Unsicherheit aus den Eichungen und die Unsicherheit aus der Abschätzung der verdampften Probenmenge zu berücksichtigen. Die Unsicherheit bei der Bestimmung der Helium-, Neon- und  $^{40}\text{Ar}$ -Konzentrationen wird auf maximal 10% geschätzt. Die Unsicherheit für die leichten Argonisotope wird auf maximal 20% geschätzt.

## 8.4 Der Meteorit ALH88003

Der L-Chondrit ALH88003 ist mit einer Fundmasse von 341 g der Schwerste der untersuchten Meteorite. Ein Vergleich des gemessenen  $^{26}\text{Al}$  und  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  mit den Modelldaten für GCR und SCR lässt auf einen präatmosphärischen Radius von  $\leq 10$  cm schließen: Abbildung 39 zeigt einen Vergleich der gemessenen mit den modellierten  $^{26}\text{Al}$ -Aktivitäten. Der aus der  $\gamma$ - $\gamma$ -Koinzidenzmessungen stammende Wert ist höher als der aus der AMS-Messung stammende; dies ist auf die angesprochenen Fehlerquellen zurückzuführen. Es ist kein Hinweis auf SCR zu erkennen.



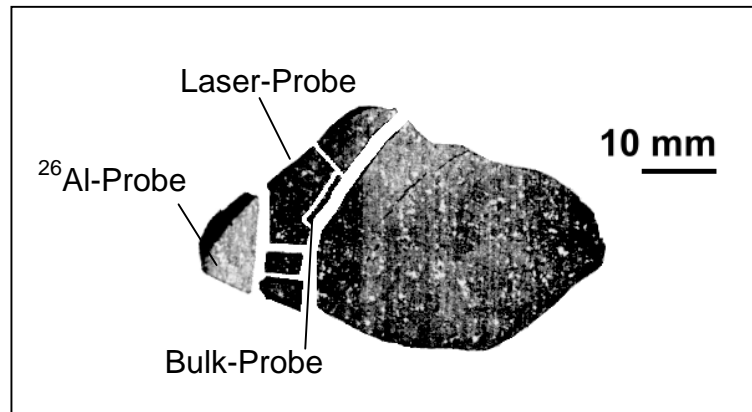
**Abbildung 39:** Vergleich der experimentell bestimmten  $^{26}\text{Al}$ -Aktivitäten mit den Modellrechnungen bezüglich GCR und SCR-Bestrahlung im Abstand von 1 AU zur Sonne.



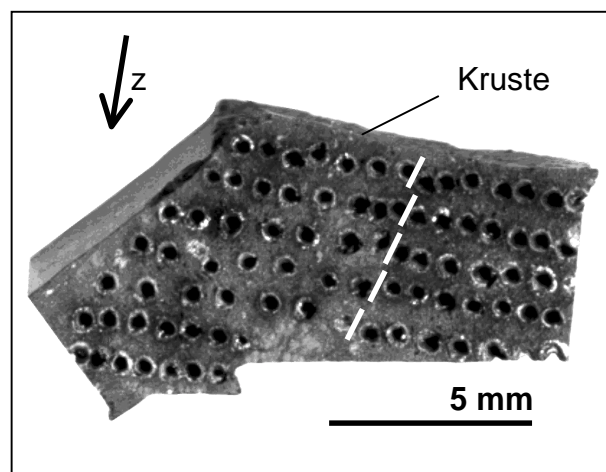
### 8.4.1 Probenlokation

Abbildung 40 zeigt die Positionen der Probenentnahmen innerhalb der Querschnittsscheibe.

Abbildung 41 stellt die Laser-Probe nach der Laser-Extraktion dar.



**Abbildung 40:** Querschnittsscheibe des Meteoriten ALH88003. Die exakte Lokation der auf <sup>26</sup>Al untersuchten Probe mittels AMS liegt in der <sup>26</sup>Al-Probe.



**Abbildung 41:** Laser-Probe mit zwei parallelen Tiefenprofilen mit jeweils sieben Laser-Spots. Das linke Profil erstreckt sich bis in eine Tiefe von 6,5 mm, das rechte bis in eine Tiefe von 4,5 mm.

## 8.4.2 Parameter der Extraktion

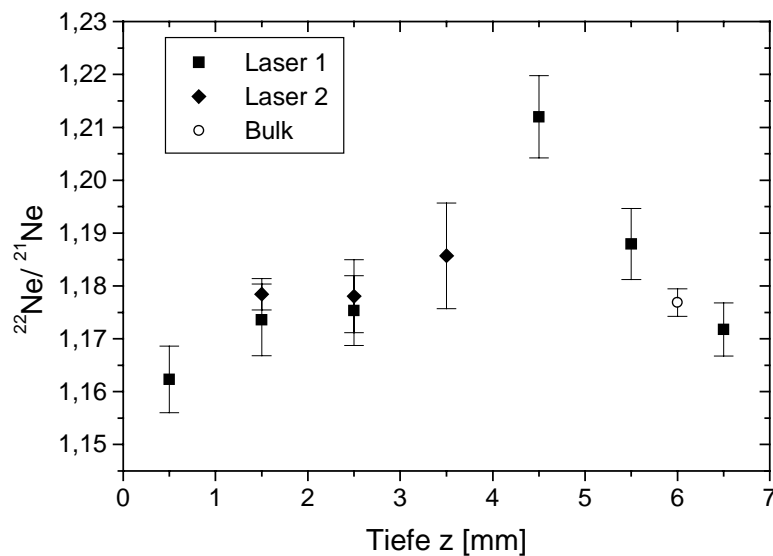
Ausgehend von der Kruste des Chondriten wurden zwei parallele Tiefenprofile mit je sieben Laser-Spots analysiert. Beim linken Profil (Laser 1) wurde im zweiten Tiefenschritt der erste Spot nicht berücksichtigt. Ebenfalls wurde der gesamte erste und vierte Tiefenschritt bei 0,5 und 3,5 mm nicht berücksichtigt.

Die Puls-Modi waren: Pulsrate 50, Puls-On-Zeit 0,1 s, Puls-Off-Zeit 1 s.

Aus den gemittelten Daten aller Tiefenschritte wurde im Vergleich zu der  $^{21}\text{Ne}$ -Konzentration der Bulk-Analyse die mittlere Masse je Laser-Spot errechnet: Sie beträgt  $0,263 \pm 0,055$  mg je Spot.

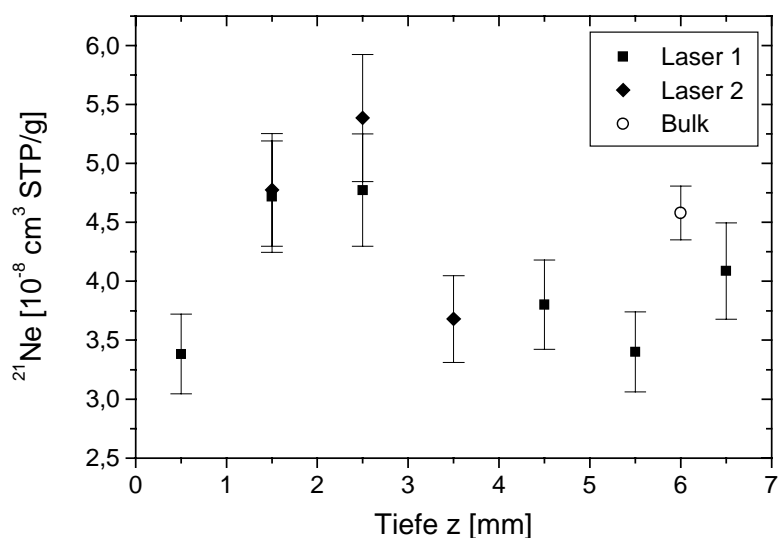
## 8.4.3 Edelgasdaten

Abbildung 42 stellt den Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  in Abhängigkeit von der Tiefe dar. Der Verlauf zeigt ein Maximum bei einer Tiefe von 4,5 mm (vgl. Abb. 17 und 18 in Kapitel 5.3).



**Abbildung 42:** Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe mit einem Maximum bei  $z=4,5$  mm.

Abbildung 43 zeigt die Konzentrationen von  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe. Die Werte beider Profile streuen um einen Mittelwert, welcher dem der Bulk-Analyse entspricht (vgl. Abb. 11 in Kapitel 5.2).



**Abbildung 43:** Konzentrationen von  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe. Die Werte der Laser-Analyse streuen um einen Mittelwert, welcher dem der Bulk-Untersuchung entspricht.

In Tabelle 14 sind alle aus den zwei Laser-Analysen und der Bulk-Messung ermittelten Konzentrationen der Edelgase wiedergegeben.

Tiefe [mm]	$^3\text{He}$	$^4\text{He}$	$^{20}\text{Ne}$	$^{21}\text{Ne}$	$^{22}\text{Ne}$	$^{36}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}$
<b>Laser:</b>								
0,5	37 ± 4	450 ± 50	3,5 ± 0,4	3,4 ± 0,3	3,9 ± 0,4	4,7 ± 0,9	1,7 ± 0,3	1380 ± 140
1,5	53 ± 5	740 ± 70	5,2 ± 0,5	4,7 ± 0,5	5,5 ± 0,6	6,7 ± 1,3	2,6 ± 0,5	1390 ± 140
2,5	54 ± 5	790 ± 80	5,4 ± 0,5	4,8 ± 0,5	5,6 ± 0,6	3,6 ± 0,7	1,3 ± 0,3	1180 ± 120
4,5	48 ± 5	520 ± 50	4,1 ± 0,4	3,8 ± 0,4	4,6 ± 0,5	4,8 ± 0,9	1,8 ± 0,4	1540 ± 150
5,5	46 ± 5	510 ± 50	3,8 ± 0,4	3,4 ± 0,3	4,0 ± 0,4	4,5 ± 0,9	1,4 ± 0,3	1560 ± 160
6,5	48 ± 5	630 ± 60	4,4 ± 0,4	4,1 ± 0,4	4,8 ± 0,5	3,8 ± 0,7	1,8 ± 0,4	1790 ± 180
1,5	67 ± 7	730 ± 70	5,0 ± 0,5	4,8 ± 0,5	5,6 ± 0,6	4,4 ± 0,9	1,3 ± 0,3	1150 ± 120
2,5	68 ± 7	830 ± 80	6,0 ± 0,6	5,4 ± 0,5	6,3 ± 0,6	6,4 ± 1,3	2,2 ± 0,4	1280 ± 130
3,5	45 ± 5	620 ± 60	4,3 ± 0,4	3,7 ± 0,4	4,4 ± 0,4	5,1 ± 1,0	1,8 ± 0,4	1520 ± 150
<b>Bulk:</b>								
5,0	33,6 ± 1,7	444 ± 22	4,49 ± 0,22	4,58 ± 0,23	5,39 ± 0,27	4,30 ± 0,22	1,47 ± 0,07	1420 ± 70

**Tabelle 14:** Edelgaskonzentrationen in der Einheit  $[10^{-8} \cdot \text{cm}^3 \text{STP} \cdot \text{g}^{-1}]$  der Tiefenprofile und der Bulk-Probe.

#### 8.4.4 Diskussion

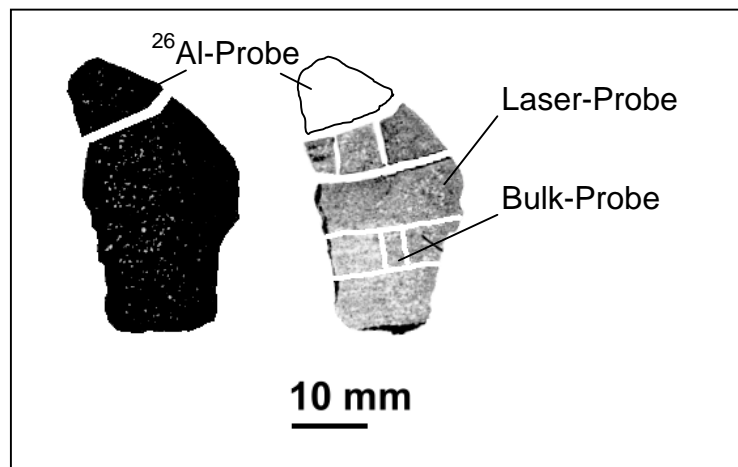
Die  $^{26}\text{Al}$ -Daten des L-Chondriten „ALH88003“ deuten nicht auf einen SCR-Beitrag zur Produktion durch kosmische Strahlung hin. Aus einem Vergleich der experimentellen Daten mit den Modelldaten ergibt sich ein präatmosphärischer Radius von  $\approx 10$  cm. Geht man von einer Kugelgestalt des Körpers und einem Ein-Körper-Fall (vgl. Kapitel 8.2) aus, so ergibt dies im Vergleich mit der Fundmasse einen Ablationsverlust von ca. 98%. Die durchgeführten Edelgasanalysen deuten nicht auf einen SCR-Beitrag hin. Zwar ist beim Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe eine leichte Erhöhung bei 4,5 mm zu erkennen, jedoch sollte, bei Vorhandensein eines SCR-Beitrages, ein stetiges Abfallen des Verhältnisses als auch ein Abfall der  $^{21}\text{Ne}$ -Konzentration mit der Tiefe zu beobachten sein. Hier muss angemerkt werden, dass der Nullpunkt der Tiefenprofile bezüglich des präatmosphärischen Radius nicht festliegt. Ausgangspunkt der Profile ist jeweils die Fusionskruste, deren tatsächliche Position im präatmosphärischen Körper nicht bekannt ist. Da die Gestalt des Meteoroiden nicht bekannt ist, könnten auch unterschiedliche Abschirmbedingungen, senkrecht zur Querschnittsscheibe, zur Erhöhungen oder Erniedrigung von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  in einem Tiefenprofil beitragen. Der Verlauf von  $^{21}\text{Ne}$  in Abhängigkeit von der Tiefe zeigt keinerlei Auffälligkeiten. Die Werte streuen stark um einen Mittelwert, welcher dem der Bulk-Analyse entspricht. Eine Zusammenfassung aller Daten ergibt, dass ein Vorhandensein eines SCR-Beitrags nicht eindeutig gezeigt werden kann.

## 8.5 Der Meteorit ALH88009

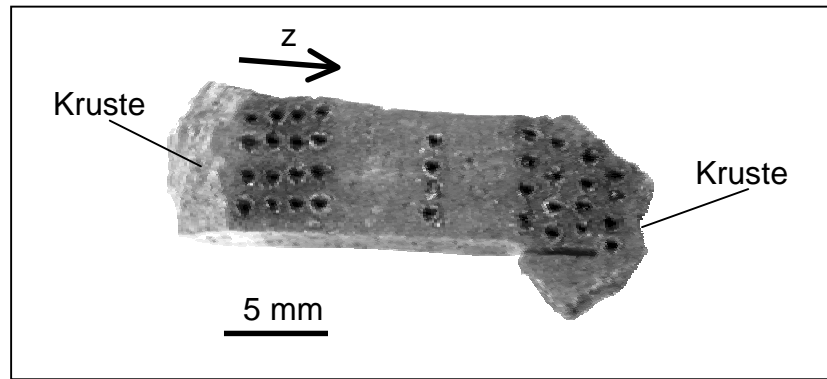
Der H-Chondrit „ALH88009“ ist mit einer Fundmasse von 152 g der Zweitschwerste der untersuchten Meteorite. Ein Vergleich des gemessenen  $^{26}\text{Al}$  und  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  mit den Modelldaten, lässt auf einen präatmosphärischen Radius von  $\approx 10$  cm schließen (vgl. Abb. 14 und 37). Der  $^{26}\text{Al}$ -Wert stammt aus einer  $\gamma$ - $\gamma$ -Koinzidenzmessung, deren integrative Bestimmung der Aktivität keine Aussage auf einen SCR-Beitrag zulässt.

### 8.5.1 Probenlokation

Abbildung 44 zeigt die Positionen der Probenentnahmen innerhalb der Querschnittsscheibe und Abbildung 45 die Laser-Probe nach der Laser-Extraktion. Die Laser-Probe hat auf zwei Seiten eine Schmelzkruste, so dass ein Gesamttiefenprofil durch den ganzen Querschnitt möglich war.



**Abbildung 44:** Querschnittsscheibe des Meteoriten ALH88009. Die  $^{26}\text{Al}$ -Probe diente vollständig der Untersuchung mittels  $\gamma$ - $\gamma$ -Koinzidenztechnik.



**Abbildung 45:** Laser-Probe mit zwei antiparallelen Tiefenprofilen mit jeweils vier Laser-Spots und einem mittigliegenden weiteren Tiefenschritt bei einer Entfernung von 7,5 mm. Die Darstellung entspricht der Rückseite aus Abbildung 44 .

### 8.5.2 Parameter der Extraktion

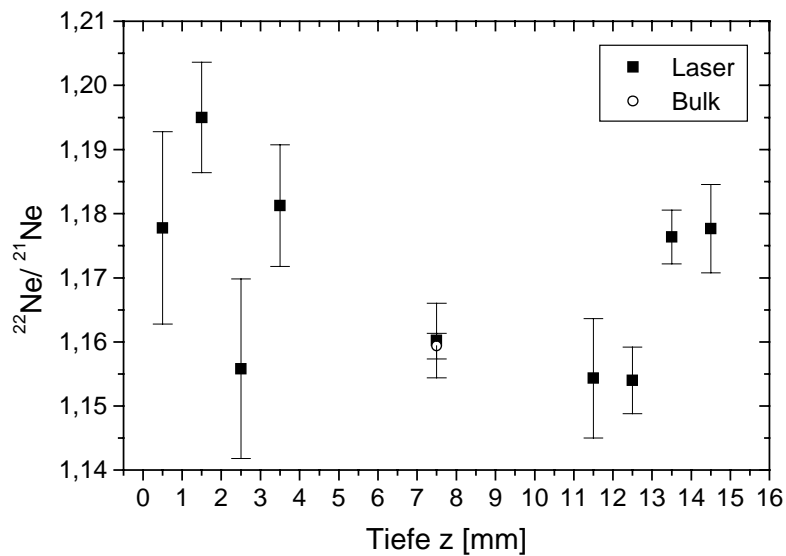
Ausgehend von den Krusten des Chondriten wurden zwei antiparallele Tiefenprofile mit je vier Laser-Spots analysiert. In der Mitte der Laser-Probe wurde ein weiterer Tiefenschritt analysiert, welcher von beiden Krusten eine Entfernung von 7,5 mm hat. Der Abstand beider Schmelzkrusten voneinander beträgt 15 mm.

Die Puls-Modi waren: Pulsrate 50, Puls-On-Zeit 0,1 s, Puls-Off-Zeit 2 s.

Aus den Daten der Tiefenschritte bei 2,5 ; 7,5 ; 11,5 und 12,5 mm wurde im Vergleich zu der  $^{21}\text{Ne}$ -Konzentration der Bulk-Analyse (7,5 mm), die mittlere Masse je Laser-Spot errechnet, sie beträgt  $0,342 \pm 0,051$  mg je Spot.

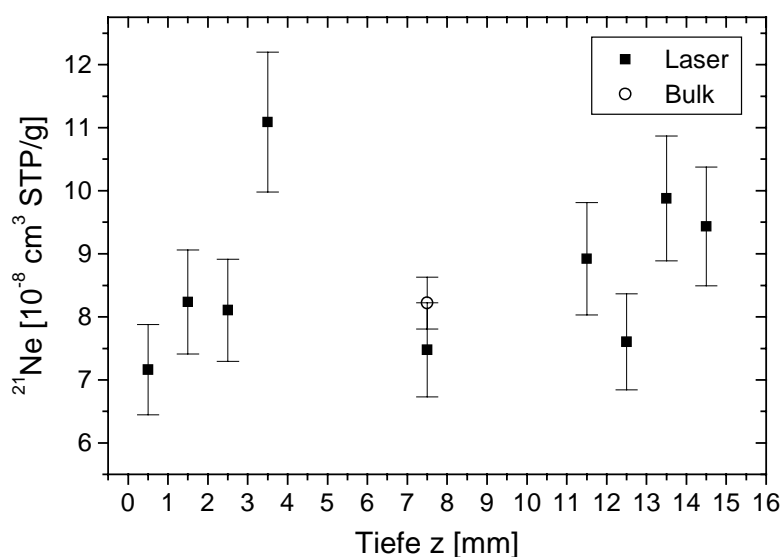
### 8.5.3 Edelgasdaten

Abbildung 46 stellt den Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  mit der Tiefe dar. Die Position der rechten Kruste liegt bei  $z=15$  mm. Der Verlauf beider Profile zeigt eine Erhöhung in Krustennähe und ein Minimum im Inneren des Meteoriten, welches mit dem ermittelten Bulk-Wert übereinstimmt (vgl. Abb. 17 und 18 in Kapitel 5.3)



**Abbildung 46:** Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe. Die Positionen der Krusten liegen bei  $z=0$  und  $15$  mm.

Abbildung 47 zeigt die Konzentrationen von  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe. Der Mittelwert der Positionen 2,5 ; 7,5 ; 11,5 und 12,5 mm entspricht dem Wert der Bulk-Analyse. Ein Ansteigen der Konzentrationen zur rechten Kruste hin ist zu erkennen (vgl. Abb. 11 in Kapitel 5.2).



**Abbildung 47:** Konzentrationen von  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe. Der Mittelwert der Laser-Analyse bei 2,5 ; 7,5 ; 11,5 und 12,5 mm entspricht dem der Bulk-Untersuchung.

In Tabelle 15 sind alle aus den zwei Laser-Analysen und der Bulk-Messung ermittelten Konzentrationen der Edelgase wiedergegeben.

Tiefe [mm]	$^3\text{He}$	$^4\text{He}$	$^{20}\text{Ne}$	$^{21}\text{Ne}$	$^{22}\text{Ne}$	$^{36}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}$
Laser:								
0,5	60 ±6	2270 ±230	11,9 ±1,2	7,2 ±0,7	8,4 ±0,8	8,6 ±1,7	3,1 ±0,6	7630 ±760
1,5	82 ±8	1930 ±190	12,2 ±1,2	8,2 ±0,8	9,8 ±1,0	12,1 ±2,4	2,8 ±0,6	9650 ±960
2,5	81 ±8	2830 ±280	8,7 ±0,9	8,1 ±0,8	9,4 ±0,9	6,8 ±1,3	2,7 ±0,5	6810 ±680
3,5	95 ±9	4430 ±440	11,5 ±1,2	11,1 ±1,1	13,1 ±1,3	7,4 ±1,5	2,3 ±0,5	9220 ±920
14,5	98 ±10	10170 ±1020	6,8 ±0,7	9,4 ±0,9	11,1 ±1,1	10,1 ±2,0	3,1 ±0,6	8830 ±880
13,5	102 ±10	7040 ±700	10,0 ±1,0	9,9 ±1,0	11,6 ±1,2	9,2 ±1,8	2,8 ±0,6	9180 ±920
12,5	83 ±8	2900 ±290	8,2 ±0,8	7,6 ±0,8	8,8 ±0,9	5,9 ±1,2	2,3 ±0,5	8130 ±810
11,5	94 ±9	3690 ±370	9,5 ±1,0	8,9 ±0,9	10,3 ±1,0	8,1 ±1,6	3,9 ±0,8	7830 ±780
7,5	76 ±8	3550 ±360	7,9 ±0,8	7,5 ±0,7	8,7 ±0,9			
Bulk:								
7,5	51,7 ±2,6	1940 ±100	8,22 ±0,41	8,22 ±0,41	9,53 ±0,48	3,71 ±0,19	1,78 ±0,09	5990 ±300

**Tabelle 15:** Edelgaskonzentrationen in der Einheit [ $10^{-8} \cdot \text{cm}^3 \text{STP} \cdot \text{g}^{-1}$ ] der Tiefenprofile und der Bulk-Probe.



### 8.5.4 Diskussion

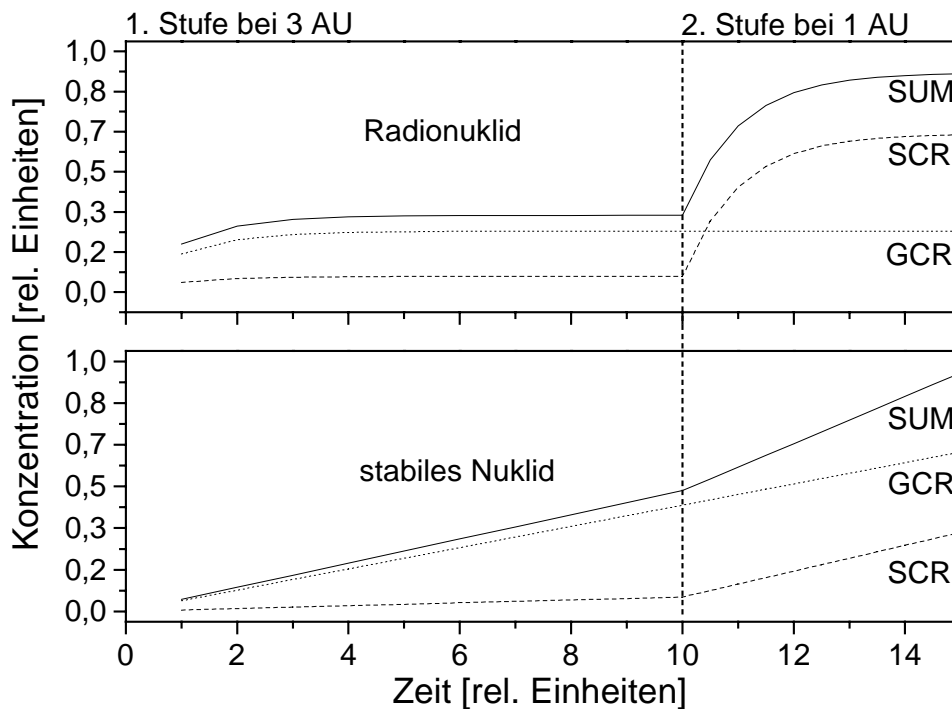
Die  $^{26}\text{Al}$ -Daten des H-Chondriten „ALH88009“ deuten nicht auf einen SCR-Beitrag zur Produktion durch kosmische Strahlung hin. Da dieser Wert aus einer  $\gamma$ - $\gamma$ -Koinzidenzmessung stammt, kann ein SCR-Beitrag aber nicht ausgeschlossen werden.

Aus einem Vergleich der experimentellen Daten mit den Modelldaten ergibt sich ein präatmosphärischer Radius von  $\approx 10$  cm. Geht man von einer Kugelgestalt des Körpers aus, so ergibt dies im Vergleich mit der Fundmasse einen Ablationsverlust von ca. 99,0%. Die durchgeführten Edelgasanalysen deuten auf einen SCR-Beitrag hin. Beim Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  mit der Tiefe ist an beiden Krustenseiten eine Erhöhung vorhanden. Dies alleine deutet noch nicht auf einen SCR-Beitrag hin. Ein Minimum bei  $z = 7,5$  mm markiert die Mitte des Profils. Der  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Wert an dieser Position wird von der Bulk-Messung bestätigt.

Der Verlauf von  $^{21}\text{Ne}$  mit der Tiefe zeigt eine Erhöhung der Konzentrationen auf der rechten Seite ( $z \geq 11,5$  mm). Auf der linken Seite des Profils ( $z \leq 3,5$  mm) ist nur ein Wert erhöht, was durch einen Verlust durch Wärmeeinwirkung, infolge von Reibung in der Atmosphäre, erklärt werden kann. Zusammen mit den erhöhten  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Werten dieser Positionen wird daraus auf einen vorhandenen SCR-Beitrag geschlossen (vgl. Kapitel 5.2 und 5.3, Abb. 11 und 17). Die Probe stammt aus dem Zentralbereich des präatmosphärischen Meteoroiden, da der Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  mit der Tiefe eine Erhöhungen an beiden Enden des Profils aufweist. Ein SCR-Beitrag ist vorhanden und kann quantitativ abgeschätzt werden.

### 8.5.5 Ortsabhängige Bestrahlung

Da die GCR über den Bereich des inneren Sonnensystems als isotrop angenommen wird [LEY97], ist die Produktion durch GCR an einer bestimmten Stelle im Meteoroiden nur von der Bestrahlungsdauer abhängig. Bei der SCR verhält es sich anders. Hier ist der Fluss der solaren kosmischen Teilchen eine Funktion des Ortes [HAM88, REE95]. Man stellt sich dabei eine mehrstufige Bestrahlung so vor, dass der Meteoroid im Asteroidengürtel (3 AU) eine primäre Bestrahlung erfährt und auf seinem Weg zur Erde einer zweiten Bestrahlung ausgesetzt ist. Das einfachste Modell dafür ist eine zweistufige Bestrahlung wie sie in Abbildung 48 dargestellt ist. Tatsächlich ist der Übergang zwischen den beiden Stufen nicht abrupt, sondern kontinuierlich.



**Abbildung 48:** Verlauf der Konzentration bei einer zweistufigen Bestrahlung durch GCR und SCR für stabile Nuklide und Radionuklide für einen kleinen Meteoroiden ( $r=2,5\text{ cm}$ ) bei mittlerer Abschirmung ( $R=3,5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) (vgl. Abb. 11). SUM bezeichnet die Summe aus GCR und SCR. Der Verlauf nach dem Fall ist analog zu Abbildung 10.

Ein Körper erhält in der ersten Stufe eine Bestrahlung durch GCR und SCR, wobei der SCR-Anteil in einer Entfernung von 3 AU nur einen kleinen Teil beiträgt, da der SCR-Fluss mit wachsendem Abstand von der Sonne abnimmt ( $\sim R^{-2}$  bis  $R^{-2,5}$ ) [HAM88]. In einer zweiten Stufe, in 1 AU Entfernung, erhält der Körper eine zweite Bestrahlung mit einem höheren SCR-Anteil. Verglichen mit der Flugzeit zur Erde, ist die Aufenthaltszeit im Asteroidengürtel im allgemeinen lange [GLA97, MOR98]. Dadurch ist der Beitrag aus der zweiten Stufe im Allgemeinen gering. Ein SCR-Nachweis ist über Radionuklide leichter, da ein starker Zuwachs der Aktivität der Radionuklide in der zweiten Stufe höher ausfällt als der Zuwachs der stabilen Elemente. Ein Überschuss an Produkten, welcher über den kalkulierten GCR-Werten liegt, kann dann als Beitrag durch SCR gedeutet werden.

Zur quantitativen Abschätzung eines SCR-Beitrags wird zunächst das Bestrahlungsalter nach der Eugster'schen Produktionsrate bestimmt. Da die Produktionsraten der reinen GCR-Modelle die Produktionsraten der empirischen Korrelation unterschätzen (für  $(^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne})_c > 1,15$ ) wird durch einen zusätzlichen Beitrag durch SCR erklärt. Da für kleine Meteoroiden ( $r \leq 10\text{ cm}$ ) ein SCR-Beitrag bis in maximale Abschirmung vorhanden ist

(vgl. Abb. 16 und 17) wird die empirische Korrelation von Eugster so gedeutet, dass sie die Summe aus GCR und SCR Beiträgen darstellt.

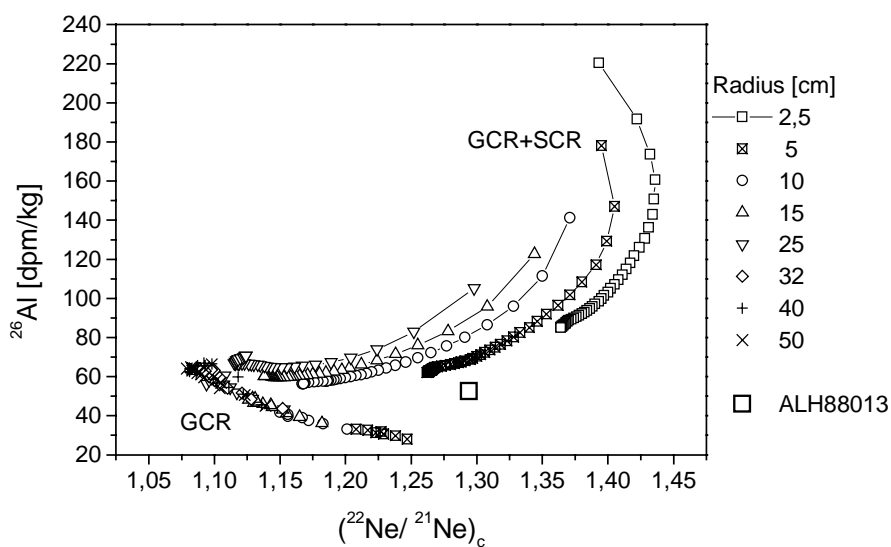
Ausgehend von einer zweistufigen Bestrahlung und dem Bestrahlungsalter nach Eugster werden iterativ die Parameter (Dauer 1. und 2. Stufe, Radius und präatmosphärische Tiefe) geändert, um das zweistufige Modell mit den gemessenen  $^{26}\text{Al}$ -,  $^{21}\text{Ne}$ - und  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Daten abzugleichen.

Der SCR-Beitrag stammt vor allem aus der zweiten Stufe der Bestrahlung in einer Entfernung von 1 AU zur Sonne. Ausgehend von einem präatmosphärischen Radius von 7,5 ; 10 und 12,5 cm und einer maximalen Abschirmung wurden verschiedene zweistufige Bestrahlungsmöglichkeiten berechnet. Die beste Übereinstimmung mit den experimentellen  $^{26}\text{Al}$ -,  $^{21}\text{Ne}$ - und  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Daten ergibt sich für „ALH88009“ bei einer primären Bestrahlung von 13 Ma in 3 AU und einer sekundären Bestrahlung von 21 Ma im Abstand von 1 AU von der Sonne für einen Körper mit einem Radius von 10 cm. Dabei stimmen die Neon-Daten sehr gut mit den Modellrechnungen überein. Die  $^{26}\text{Al}$ -Werte werden vom Modell mit 57,1 dpm/kg berechnet. Dieser Wert ist mit dem integrativ bestimmten  $\gamma$ - $\gamma$ -Koinzidenzwert vereinbar. Der Bestrahlungszeitraum in der ersten Stufe gibt eine untere Grenze an. Die gesamte Bestrahlungszeit von 34 Ma liegt in den Fehlergrenzen des, mittels der empirischen Produktionsrate von Eugster, bestimmten Bestrahlungsalters. Der sekundäre Bestrahlungszeitraum ist größer als der primäre. Dies entspricht nicht dem allgemeinen Bild einer Bestrahlungsgeschichte (s.o.) und stellt eine Ausnahme dar.

Zusammenfassend ergibt sich, dass ein Vorhandensein eines SCR-Beitrags eindeutig gezeigt und abgeschätzt werden konnte.

## 8.6 Der Meteorit ALH88013

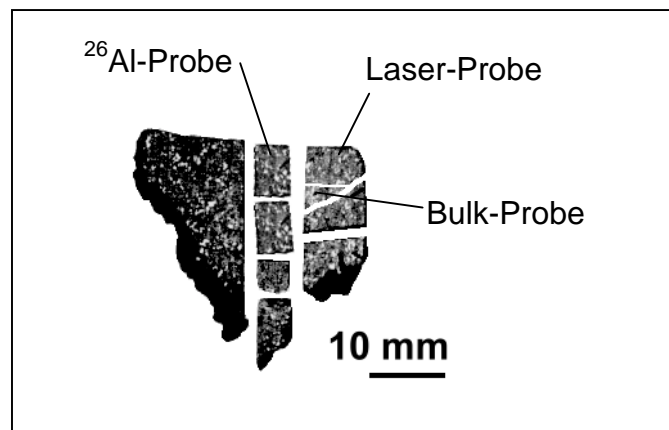
Der H-Chondrit „ALH88013“ ist mit einer Fundmasse von 89 g der Drittschwerste der untersuchten Meteorite. Ein Vergleich des gemessenen  $^{26}\text{Al}$  und  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  mit den Modelldaten lässt auf einen präatmosphärischen Radius von 2,5-5 cm schließen: Abbildung 49 zeigt einen Vergleich der gemessenen mit den modellierten  $^{26}\text{Al}$ -Aktivitäten. Dieser Wert stammt aus einer AMS-Messung. Ein Beitrag durch SCR ist hier deutlich zu erkennen.



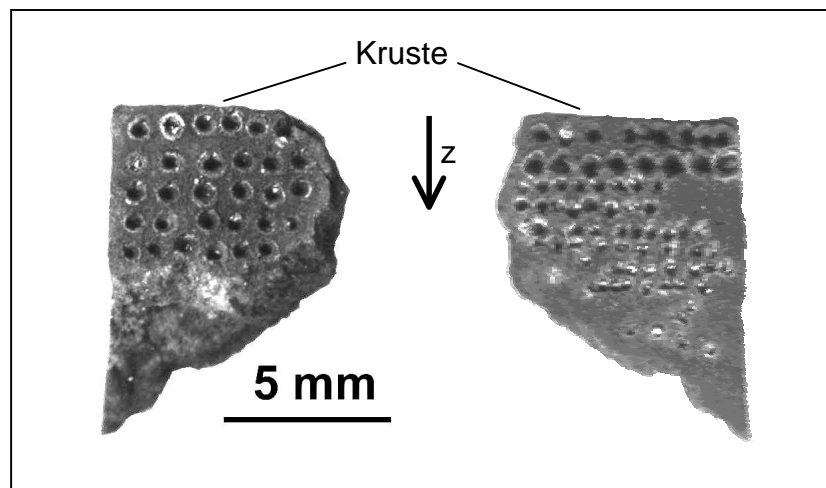
**Abbildung 49:** Vergleich der experimentell bestimmten  $^{26}\text{Al}$ -Aktivität mit den Modellrechnungen bezüglich GCR- und SCR-Bestrahlung im Abstand von 1 AU zur Sonne.

### 8.6.1 Probenlokation

Abbildung 50 zeigt die Positionen der Probenentnahmen innerhalb der Querschnittsscheibe. Abbildung 51 stellt die Laser-Probe nach der Laser-Extraktion dar. Die Laser-Probe wurde von der Vorder- und der Rückseite untersucht, so dass zwei Profile vorliegen.



**Abbildung 50:** Querschnittsscheibe des Meteoriten ALH88013. Die exakte Lokation der auf  $^{26}\text{Al}$  untersuchten Probe (mittels AMS) ist nicht bekannt, entstammt jedoch auch aus der  $^{26}\text{Al}$ -Probe.



**Abbildung 51:** Laser-Probe mit zwei Tiefenprofilen auf beiden Seiten. Die Vorderseite wurde mit jeweils 6 Spots je Tiefenschritt analysiert, die Rückseite zunächst mit jeweils 8 Spots. Ab einer Tiefe von 2,5 mm wurden auf der Rückseite die Puls-Modi geändert.

## 8.6.2 Parameter der Extraktion

Ausgehend von den Krusten des Chondriten wurde je ein Tiefenprofil auf der Vorder- und Rückseite analysiert.

Auf der Vorderseite wurden die Tiefenschritte mit je sechs Spots untersucht.

Die Puls-Modi waren: Pulsrate 50, Puls-On-Zeit 0,1 s, Puls-Off-Zeit 1 s.

Aus dem Mittelwert der Daten aller Tiefenschritte wurde im Vergleich zu der  $^{21}\text{Ne}$ -Konzentration der Bulk-Analyse die mittlere Masse je Laser-Spot errechnet: Sie beträgt für die Vorderseite  $0,309 \pm 0,035$  mg je Spot.

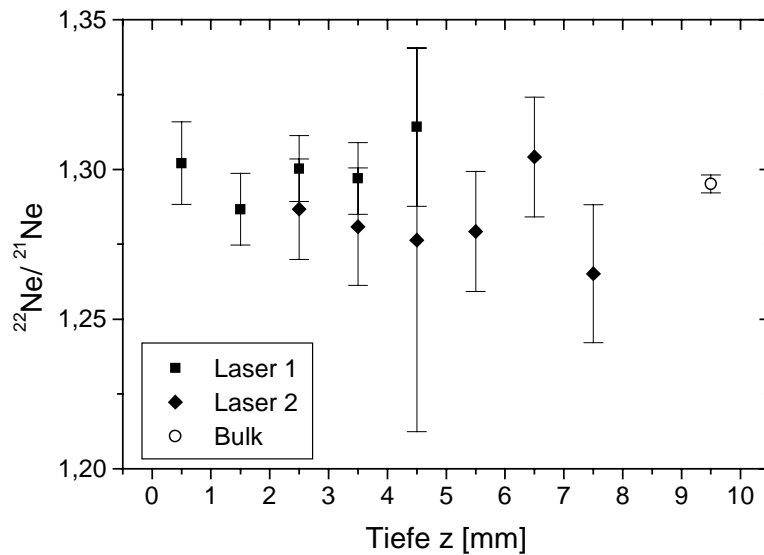
Auf der Rückseite wurden die Tiefenschritte mit je acht Spots untersucht. Die zwei ersten Tiefenschritte sind bedenklich, da die Bestimmung von  $^{22}\text{Ne}$  mit großen Fehlern behaftet war. Sie sollen nicht weiter berücksichtigt werden

Die Puls-Modi waren: Pulsrate 100, Puls-On-Zeit 0,01 s, Puls-Off-Zeit 1 s.

Aus dem Mittelwert der Daten der Tiefenschritte 3-8 wurde im Vergleich zu der  $^{21}\text{Ne}$ -Konzentration der Bulk-Analyse die mittlere Masse je Laser-Spot errechnet: Sie beträgt für die Rückseiteseite  $0,062 \pm 0,020$  mg je Spot.

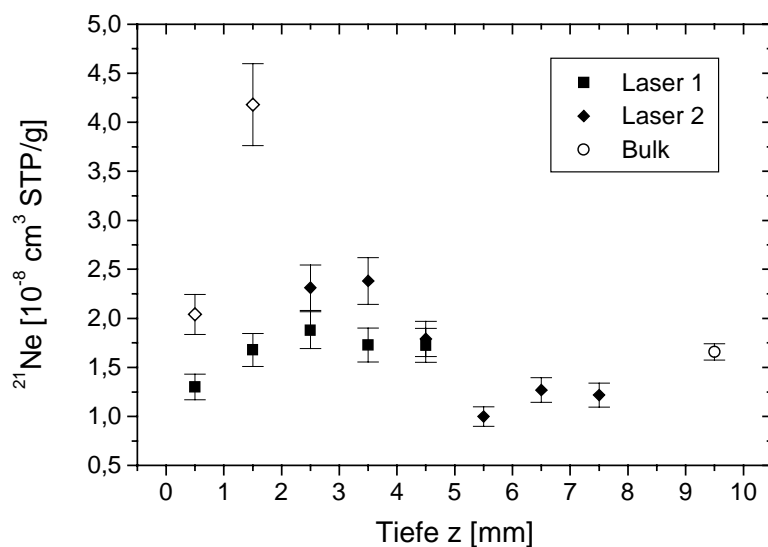
## 8.6.3 Edelgasdaten

Abbildung 52 stellt den Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe dar. Der Verlauf beider Profile zeigt keine Erhöhung in Krustennähe des Meteoriten. Die Daten streuen um einen Mittelwert, der dem der Bulk-Analyse entspricht. Die mit offenen Symbolen gekennzeichneten Laser-Daten sind mit großen Fehlern behaftet, da die Korrektur des  $^{22}\text{Ne}$  bezüglich doppelt geladenem  $\text{CO}_2$  durch große Mengen dieses Gases schwierig war. (vgl. Kapitel 7.8).



**Abbildung 52:** Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe.

Abbildung 53 zeigt die Konzentrationen von  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe. Die Werte beider Profile streuen um einen Mittelwert, welcher dem der Bulk-Analyse entspricht. Die Laserdaten, welche mit offenen Symbolen gekennzeichnet sind, wurden nicht berücksichtigt. Man erkennt eine leichte Erhöhung bei  $z = 3$  mm. (vgl. Abb. 1 in Kapitel 5.2).



**Abbildung 53:** Konzentrationen von  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe. Die Werte der Laser-Analysen streuen um einen Mittelwert, welcher dem der Bulk-Untersuchung entspricht. Die mit offenen Symbolen gekennzeichneten Laser-Daten wurden nicht berücksichtigt.

In Tabelle 16 sind alle aus den zwei Laser-Analysen und der Bulk-Messung ermittelten Konzentrationen der Edelgase wiedergegeben.

Tiefe [mm]	<sup>3</sup> He	<sup>4</sup> He	<sup>20</sup> Ne	<sup>21</sup> Ne	<sup>22</sup> Ne	<sup>36</sup> Ar	<sup>38</sup> Ar	<sup>40</sup> Ar
<b>Laser:</b>								
0,5	9,2 ±0,9	999 ±100	2,4 ±0,2	1,3 ±0,1	1,7 ±0,2	1,2 ±0,2	0,4 ±0,1	4460 ±450
1,5	19 ±2	2520 ±250	2,4 ±0,2	1,7 ±0,2	2,2 ±0,2	0,9 ±0,2	0,4 ±0,1	6360 ±640
2,5	21 ±2	2640 ±260	2,8 ±0,3	1,9 ±0,2	2,4 ±0,2	0,9 ±0,2	0,4 ±0,1	8700 ±870
3,5	18 ±2	2310 ±230	2,8 ±0,3	1,7 ±0,2	2,2 ±0,2	3,6 ±0,7	0,9 ±0,2	7620 ±760
4,5	17 ±2	2800 ±280	2,4 ±0,2	1,7 ±0,2	2,3 ±0,2	1,0 ±0,1	0,5 ±0,1	8590 ±860
2,5	22 ±2	2490 ±250	2,8 ±0,3	2,3 ±0,2	3,0 ±0,3	4,7 ±0,9	2,3 ±0,5	14180 ±1420
3,5	24 ±2	3390 ±340	3,5 ±0,4	2,4 ±0,2	3,1 ±0,3	0,8 ±0,2	1,0 ±0,2	1260 ±130
4,5	16 ±2	1660 ±170	3,5 ±0,4	1,8 ±0,2	2,3 ±0,2	4,0 ±0,8	0,8 ±0,2	7460 ±750
5,5	11 ±1	1050 ±110	1,0 ±0,1	1,0 ±0,1	1,3 ±0,1	1,5 ±0,3	2,9 ±0,6	4880 ±490
6,5	12 ±1	1280 ±130	1,5 ±0,2	1,3 ±0,1	1,7 ±0,2	3,8 ±0,7	0,15 ±0,03	6640 ±660
7,5	12 ±1	1670 ±170	1,4 ±0,1	1,2 ±0,1	1,5 ±0,2	3,1 ±0,6	1,8 ±0,4	5050 ±510
<b>Bulk:</b>								
9,5	10,74 ±0,52	1220 ±61	1,89 ±0,09	1,66 ±0,08	2,15 ±0,11	0,64 ±0,03	0,35 ±0,02	4950 ±250

**Tabelle 16:** Edelgaskonzentrationen in der Einheit [ $10^{-8} \cdot \text{cm}^3 \text{STP} \cdot \text{g}^{-1}$ ] der Tiefenprofile und der Bulk-Probe.



#### 8.6.4 Diskussion

Die  $^{26}\text{Al}$ -Daten des H-Chondriten „ALH88013“ deuten auf einen SCR-Beitrag zur Produktion durch kosmische Strahlung hin. Aus einem Vergleich der experimentellen Daten mit den Modelldaten ergibt sich ein präatmosphärischer Radius von 2,5-5 cm. Geht man von einer Kugelgestalt des Körpers aus, so ergibt dies im Vergleich mit der Fundmasse einen Ablationsverlust von 61-95%. Auch die durchgeführten Edelgasanalysen deuten auf einen SCR-Beitrag hin. Beim Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  mit der Tiefe ist keine Erhöhung zu erkennen. Die Daten der Laser-Analyse streuen um einen Mittelwert, der dem der Bulk-Analyse entspricht. Ein ermittelter  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  -Wert von 1,29-1,30 kann aber nicht alleine durch GCR-Bestrahlung erklärt werden. Ein SCR-Beitrag ist eindeutig vorhanden (vgl. Kapitel 5.3, Abb. 17). Die Probe stammt vermutlich aus dem Zentralbereich des präatmosphärischen Meteoroiden, da der Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  in Abhängigkeit von der Tiefe konstant ist.

Der Verlauf von  $^{21}\text{Ne}$  mit der Tiefe zeigt eine leichte Erhöhung bei  $z = 3$  mm. Betrachtet man diese Erhöhung ohne andere Kenntnisse, so könnte sie als eine SCR-Signatur gedeutet werden, wobei niedrige Konzentrationen in den oberflächennahen Schichten auf den Verlust durch Wärmeeinwirkung, infolge von Reibung in der Atmosphäre zurückgeführt werden kann. Da sich bei dem Verlauf der Verhältnisse keine Erhöhung bei dieser Tiefe zeigt, können diese mit größeren Unsicherheiten behafteten Konzentrationsänderung nicht eindeutig auf einen SCR-Beitrag zurückgeführt werden.

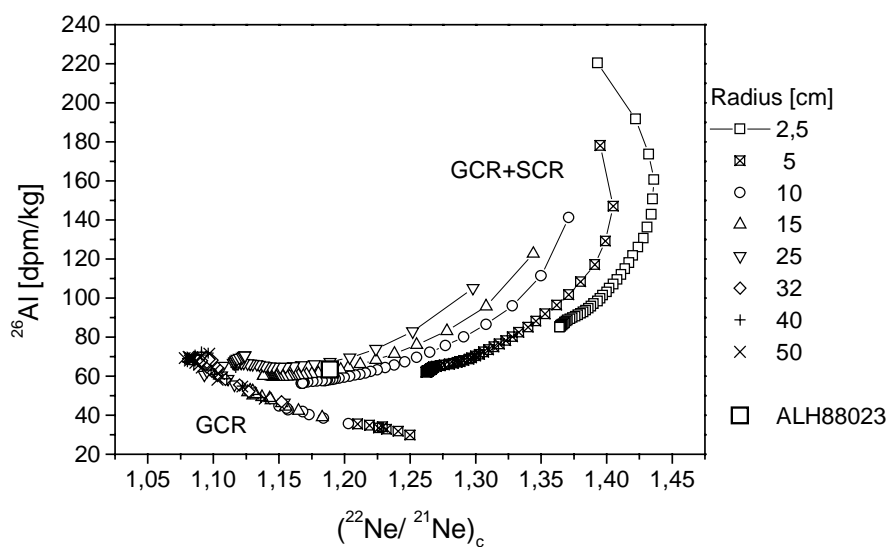
Der vorhandene SCR-Beitrag ergibt sich alleine aus den hohen  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Werten und kann quantitativ abgeschätzt werden. Dazu wird von einem zweistufigen Modell ausgegangen (vgl. Kapitel 8.5.5). Der SCR-Beitrag stammt vor allem aus der zweiten Stufe der Bestrahlung in einer Entfernung von 1 AU von der Sonne. Bei der Bestrahlung in 3 AU ist der SCR-Beitrag um einen Faktor neun niedriger. Ausgehend von einem präatmosphärischen Radius von 2,5 und 5,0 cm und einer maximalen Abschirmung wurden verschiedene zweistufige Bestrahlungsmöglichkeiten berechnet. Die beste Übereinstimmung mit den experimentellen  $^{26}\text{Al}$ -,  $^{21}\text{Ne}$ - und  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Daten ergibt sich für eine primäre Bestrahlung von 7,4 Ma in 3 AU und einer sekundären Bestrahlung von 2,2 Ma im Abstand von 1 AU von der Sonne für einen Körper mit einem Radius von 2,5 cm. Dabei stimmen die Neon-Daten sehr gut mit den Modellrechnungen überein. Die  $^{26}\text{Al}$ -Werte werden vom Modell überschätzt, was bedeutet, dass der Körper größer als 2,5 cm und deutlich kleiner als 5 cm war und das der Bestrahlungszeitraum in der ersten Stufe eine untere Grenze angibt.

Der gesamte Bestrahlungszeitraum von 9,6 Ma liegt in den Fehlergrenzen des, mittels der empirischen Produktionsrate von Eugster, bestimmten Bestrahlungsalters.

Eine Zusammenfassung aller Ergebnisse ergibt, dass ein Vorhandensein eines SCR-Beitrags eindeutig gezeigt und abgeschätzt werden konnte.

## 8.7 Der Meteorit ALH88023

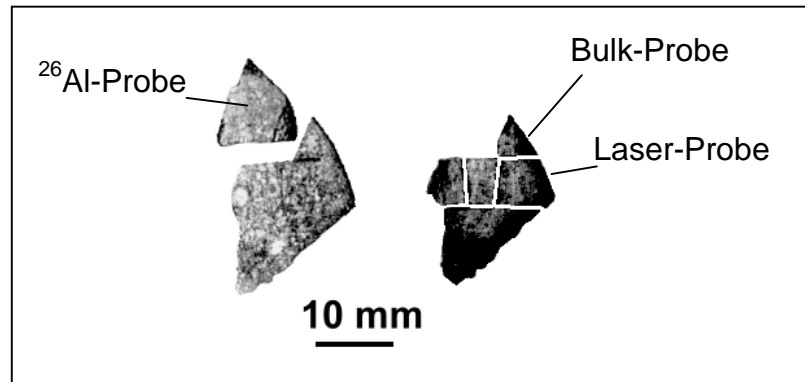
Der L-Chondrit „ALH88023“ hat eine Fundmasse von 44 g. Ein Vergleich des gemessenen  $^{26}\text{Al}$  und  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  mit den Modelldaten lässt auf einen präatmosphärischen Radius von  $\approx 15$  cm schließen: Abbildung 54 zeigt einen Vergleich der gemessenen mit den modellierten  $^{26}\text{Al}$ -Aktivitäten. Dieser Wert stammt aus einer AMS-Messung. Ein Beitrag durch SCR ist hier deutlich zu erkennen.



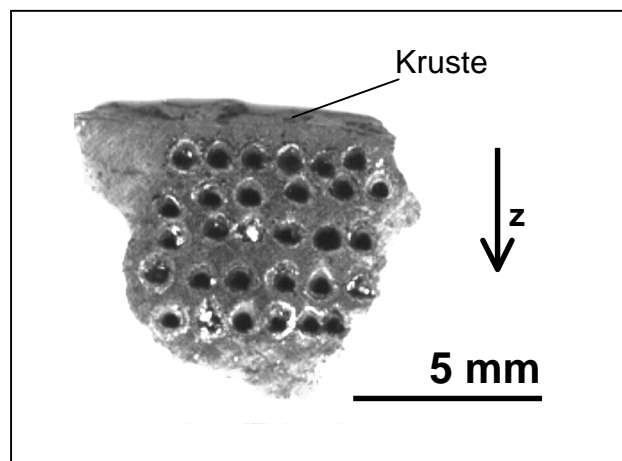
**Abbildung 54:** Vergleich der experimentell bestimmten  $^{26}\text{Al}$ -Aktivitäten mit den Modellrechnungen bezüglich GCR- und SCR-Bestrahlung im Abstand von 1 AU zur Sonne.

### 8.7.1 Probenlokation

Abbildung 55 zeigt die Positionen der Probenentnahmen innerhalb der Querschnittsscheibe und Abbildung 56 die Laser-Probe nach der Laser-Extraktion. Die Laser-Probe hatte eine Stärke von ca. 1,4 mm, wodurch einige Spots die Unterseite der Probe erreichten. Dies führte zu zylindrischen Löchern und damit zu einer größeren Masse je Spot



*Abbildung 55: Querschnittsscheibe des Meteoriten ALH88023.*



*Abbildung 56: Laser-Probe mit einem Tiefenprofil mit jeweils sechs Laser-Spots. Die Laser-Probe ist nur ein Teil der in Abbildung 55 dargestellten Probe.*

## 8.7.2 Parameter der Extraktion

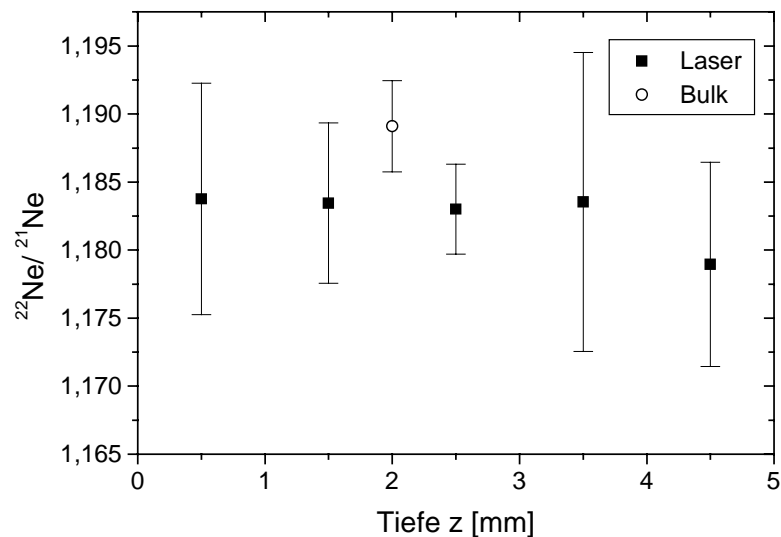
Ausgehend von den Krusten des Chondriten wurde ein Tiefenprofil mit je sechs Laser-Spots analysiert.

Die Puls-Modi waren: Pulsrate 50, Puls-On-Zeit 0,1 s, Puls-Off-Zeit 2 s.

Aus dem Mittelwert der Daten aller Tiefenschritte wurde im Vergleich zu der  $^{21}\text{Ne}$ -Konzentration der Bulk-Analyse die mittlere Masse je Laser-Spot errechnet: Sie beträgt  $0,557 \pm 0,053$  mg je Spot. Diese verhältnismäßig große Masse ist auf die zylindrischen Löcher zurückzuführen.

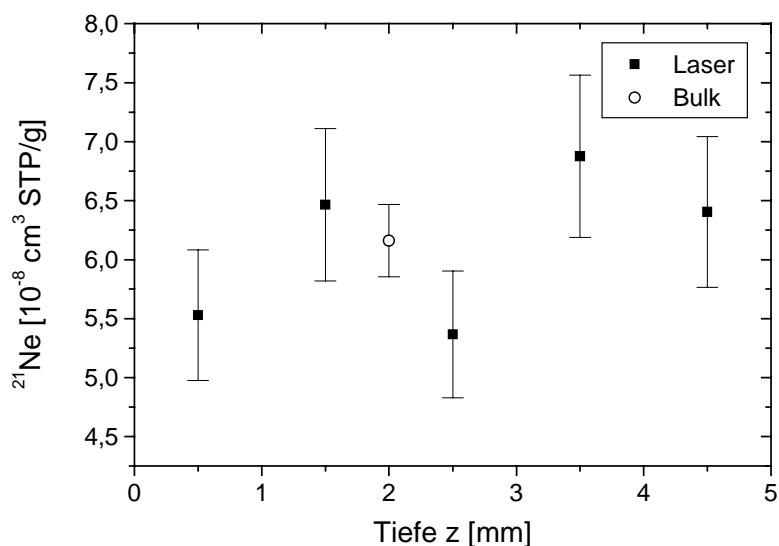
## 8.7.3 Edelgasdaten

Abbildung 57 stellt den Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  in Abhängigkeit von der Tiefe dar. Der Verlauf des Profils zeigt keine Erhöhung in Krustennähe des Meteoriten. Die Laser-Daten streuen innerhalb ihres Fehlers um einen Mittelwert, der dem der Bulk-Analyse entspricht (vgl. Abb. 17 und 18 in Kapitel 5.3).



**Abbildung 57:** Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe. Die Laser-Daten streuen innerhalb ihres Fehlers um einen Mittelwert, der dem der Bulk-Analyse entspricht.

Abbildung 58 zeigt die Konzentrationen von  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe. Die Werte des Profils streuen um einen Mittelwert, welcher dem der Bulk-Analyse entspricht. Man erkennt keine systematische Veränderung der Konzentration bei zunehmender Tiefe (siehe Abb. 11 in Kapitel 5.2).



**Abbildung 58:** Konzentrationen von  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe. Der Mittelwert der Laser-Analyse entspricht dem der Bulk-Untersuchung.

In Tabelle 17 sind die aus der Laser-Analyse und der Bulk-Messung ermittelten Konzentrationen der Edelgase wiedergegeben.

Tiefe [mm]	$^3\text{He}$	$^4\text{He}$	$^{20}\text{Ne}$	$^{21}\text{Ne}$	$^{22}\text{Ne}$	$^{36}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}$
------------	---------------	---------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------

Laser:

0,5	96 ±10	1240 ±120	13,1 ±1,3	5,6 ±0,6	6,6 ±0,7	5,1 ±0,3	0,28 ±0,06	371 ±37
1,5	112 ±11	980 ±100	8,1 ±0,8	6,5 ±0,7	7,7 ±0,8	0,6 ±0,2	0,73 ±0,15	829 ±83
2,5	100 ±10	870 ±90	6,0 ±0,6	5,4 ±0,5	6,4 ±0,6	1,7 ±0,3	1,4 ±0,3	1800 ±180
3,5	111 ±11	1160 ±120	7,2 ±0,2	6,9 ±0,7	8,2 ±0,8	1,1 ±0,2	1,1 ±0,2	1920 ±190
4,5	98 ±10	1120 ±110	6,6 ±0,7	6,5 ±0,6	7,6 ±0,8	1,3 ±0,3	1,2 ±0,2	1770 ±180

Bulk:

2	28,6 ±1,4	277 ±14	6,31 ±0,32	6,16 ±0,33	7,34 ±0,37	0,77 ±0,04	0,89 ±0,04	1510 ±75
---	--------------	------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	-------------

**Tabelle 17:** Edelgaskonzentrationen in der Einheit  $[10^{-8} \cdot \text{cm}^3 \text{STP} \cdot \text{g}^{-1}]$  des Tiefenprofils und der Bulk-Probe.

#### 8.7.4 Diskussion

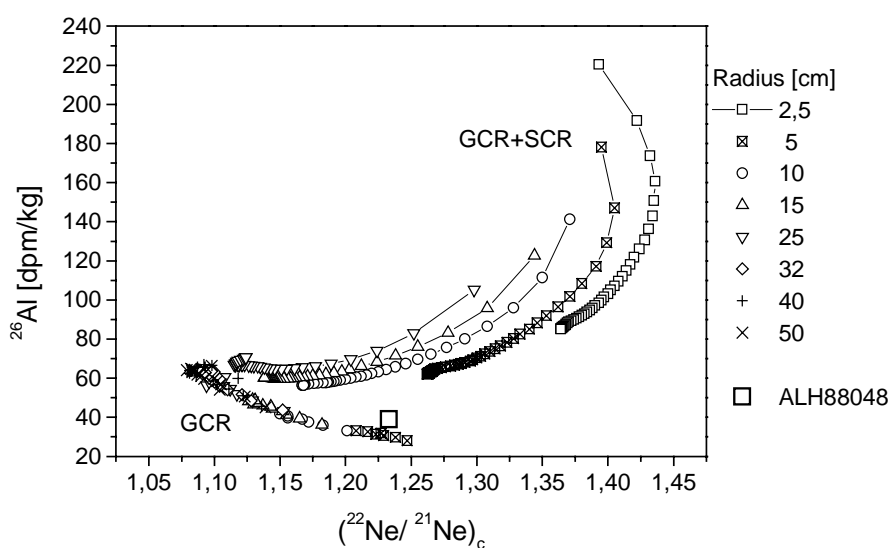
Die  $^{26}\text{Al}$ -Daten des L-Chondriten „ALH88023“ deuten auf einen SCR-Beitrag zur Produktion durch kosmische Strahlung hin. Aus einem Vergleich der experimentellen Daten mit den Modelldaten ergibt sich ein präatmosphärischer Radius von ca. 10-15 cm. Geht man von einer Kugelgestalt des Körpers aus, so ergibt dies im Vergleich mit der Fundmasse einen Ablationsverlust von ca. 99,7-99,9%. Die durchgeführten Edelgasanalysen deuten nicht auf einen SCR-Beitrag hin. Beim Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  mit der Tiefe ist keine Erhöhung zu erkennen. Die Daten der Laser-Analyse streuen um einen Mittelwert, der dem der Bulk-Analyse entspricht. Ein ermittelter  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  -Wert von 1,18-1,19 kann alleine durch GCR-Bestrahlung erklärt werden. Ein SCR-Beitrag ist nicht vorhanden (vgl. Kapitel 5.3, Abb. 17). Die Probe stammt vermutlich aus dem Zentralbereich des präatmosphärischen Meteoroiden, da der Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  mit der Tiefe konstant ist.

Der Verlauf von  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe zeigt keinerlei Auffälligkeiten. Die Werte streuen um einen Mittelwert, welcher dem der Bulk-Analyse entspricht.

Zusammenfassend ergibt sich, dass ein Vorhandensein eines SCR-Beitrags nicht gezeigt werden kann. Der Hinweis aus den  $^{26}\text{Al}$ -Daten auf ein Vorhandensein einer SCR-Signatur ist irreführend. Die  $^{26}\text{Al}$ -Daten unterliegen vermutlich dem in Kapitel 8.1 angesprochen systematischen Fehler bei der Bestimmung mittels AMS.

## 8.8 Der Meteorit ALH88048

Der H-Chondrit „ALH88048“ ist mit einer Fundmasse von 21 g der Leichteste der untersuchten Meteorite. Ein Vergleich des gemessenen  $^{26}\text{Al}$  und  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  mit den Modelldaten lässt auf einen präatmosphärischen Radius von  $\approx 5\text{ cm}$  schließen: Abbildung 59 zeigt einen Vergleich der gemessenen mit den modellierten  $^{26}\text{Al}$ -Aktivitäten. Dieser Wert stammt aus einer AMS-Messung. Innerhalb der angesprochenen Unsicherheiten ist dieser Wert nicht signifikant.

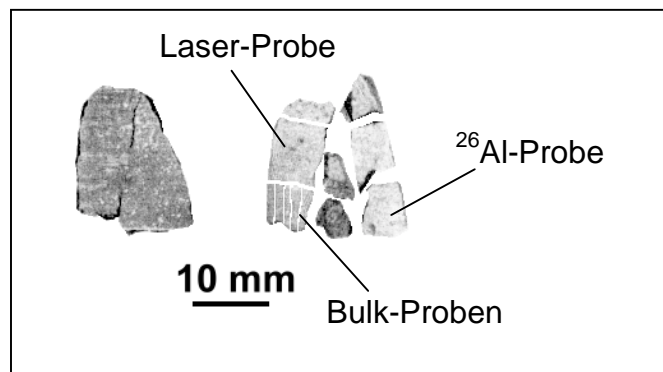


**Abbildung 59:** Vergleich der experimentell bestimmten  $^{26}\text{Al}$ -Aktivitäten mit den Modellrechnungen bezüglich GCR- und SCR-Bestrahlung im Abstand von 1 AU zur Sonne.

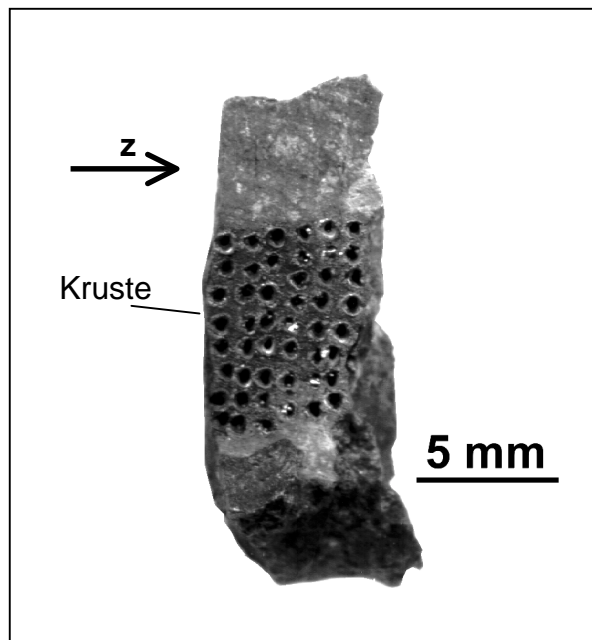


### 8.8.1 Probenlokation

Abbildung 60 zeigt die Positionen der Probenentnahmen innerhalb der Querschnittsscheibe und Abbildung 61 die Laser-Probe nach der Laser-Extraktion.



**Abbildung 60:** Querschnittsscheibe des Meteoriten ALH88048.



**Abbildung 61:** Laser-Probe mit einem Tiefenprofilen mit jeweils acht Laser-Spots. Die Darstellung gibt die Rückseite aus Abbildung 60 wieder.

## 8.8.2 Parameter der Extraktion

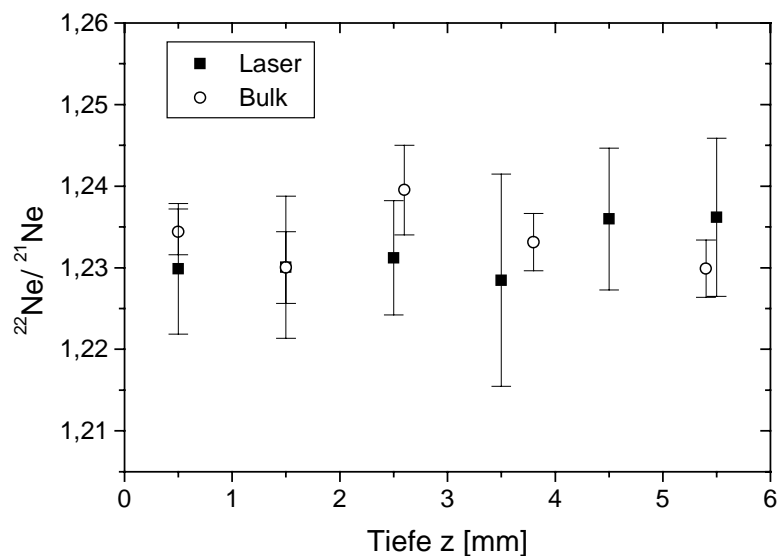
Ausgehend von den Krusten des Chondriten wurde ein Tiefenprofil mit je acht Laser-Spots analysiert. Zusätzlich wurde parallel dazu ein Bulk-Tiefenprofil aufgenommen.

Die Puls-Modi waren: Pulsrate 50, Puls-On-Zeit 0,1 s, Puls-Off-Zeit 1 s.

Aus dem Mittelwert der Daten aller Tiefenschritte wurde im Vergleich zu der  $^{21}\text{Ne}$ -Konzentration der Bulk-Analysen die mittlere Masse je Laser-Spot errechnet: Sie beträgt  $0,364 \pm 0,095$  mg je Spot.

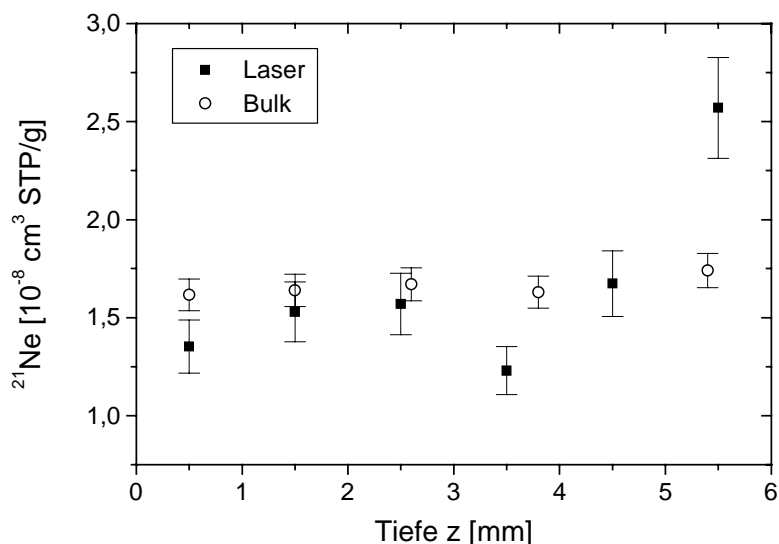
## 8.8.3 Edelgasdaten

Abbildung 62 stellt den Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  mit der Tiefe dar. Der Verlauf des Laser-Profiles als auch der des Bulk-Profiles zeigt keine Erhöhung in Krustennähe des Meteoriten. Die Laserdaten streuen innerhalb ihres Fehlers um einen Mittelwert, der dem der Bulk-Analysen entspricht (vgl. Abb. 17 und 18 in Kapitel 5.3).



**Abbildung 62:** Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe. Die Laser-Daten streuen innerhalb ihres Fehlers um einen Mittelwert, der von den Bulk-Analysen wiedergegeben wird.

Abbildung 63 zeigt die Konzentrationen von  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe. Die Werte des Laser-Profiles streuen, mit Ausnahme des Wertes bei  $z = 5,5$  mm, um einen Mittelwert, welcher dem der Bulk-Analysen entspricht. Man erkennt keine systematisch Veränderung der Konzentration mit der Tiefe (vgl. Abb. 11 in Kapitel 5.2).



**Abbildung 63:** Konzentrationen von  $^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe. Der Mittelwert der Laser-Analyse entspricht dem der Bulk-Untersuchungen.

In Tabelle 18 sind die aus der Laser-Analyse und der Bulk-Messung ermittelten Konzentrationen der Edelgase wiedergegeben.

Tiefe [mm]	$^3\text{He}$	$^4\text{He}$	$^{20}\text{Ne}$	$^{21}\text{Ne}$	$^{22}\text{Ne}$	$^{36}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}$
Laser:								
0,5	23 ±2	3200 ±320	2,0 ±0,2	1,4 ±0,1	1,7 ±0,2	0,8 ±0,2	0,37 ±0,07	7000 ±700
1,5	23 ±2	2810 ±280	3,1 ±0,3	1,5 ±0,2	1,9 ±0,2	1,1 ±0,2	0,86 ±0,17	6620 ±660
2,5	24 ±2	2970 ±300	5,5 ±0,5	1,6 ±0,2	1,9 ±0,2	1,6 ±0,3	0,63 ±0,13	6870 ±690
3,5	20 ±2	2140 ±210	1,6 ±0,2	1,2 ±0,1	1,5 ±0,2	1,9 ±0,4	0,47 ±0,09	7710 ±770
4,5	25 ±2	5240 ±520	2,1 ±0,2	1,7 ±0,2	2,1 ±0,2	1,2 ±0,2	0,24 ±0,05	11090 ±1110
5,5	40 ±4	4190 ±420	3,2 ±0,3	2,6 ±0,3	3,2 ±0,3	3,2 ±0,6	1,1 ±0,2	15620 ±1560

Tiefe [mm]	<sup>3</sup> He	<sup>4</sup> He	<sup>20</sup> Ne	<sup>21</sup> Ne	<sup>22</sup> Ne	<sup>36</sup> Ar	<sup>38</sup> Ar	<sup>40</sup> Ar
---------------	-----------------	-----------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------

Bulk:

0,5	10,6 ±0,53	1440 ±70	1,64 ±0,08	1,62 ±0,08	1,20 ±0,06	0,92 ±0,05	0,21 ±0,01	6030 ±300
1,5	11,8 ±0,59	1250 ±60	1,68 ±0,08	1,64 ±0,08	2,02 ±0,10	0,78 ±0,04	0,31 ±0,02	5060 ±250
2,6	12,1 ±0,61	1630 ±80	1,71 ±0,09	1,67 ±0,08	2,07 ±0,10	1,76 ±0,09	0,60 ±0,03	5800 ±290
3,8	10,7 ±0,54	1250 ±60	1,67 ±0,08	1,63 ±0,08	2,01 ±0,10	1,14 ±0,06	0,55 ±0,03	5570 ±280
5,4	11,2 ±0,56	1390 ±70	1,82 ±0,09	1,74 ±0,09	2,14 ±0,11	1,74 ±0,09	0,60 ±0,03	5650 ±280

**Tabelle 18:** Edelgaskonzentrationen in der Einheit [ $10^{-8} \cdot \text{cm}^3 \text{STP} \cdot \text{g}^{-1}$ ] des Tiefenprofils und der Bulk-Proben.

#### 8.8.4 Diskussion

Die  $^{26}\text{Al}$ -Daten des H-Chondriten „ALH88048“ deuten nur leicht auf einen SCR-Beitrag hin. Aus einem Vergleich der experimentellen Daten mit den Modelldaten ergibt sich ein präatmosphärischer Radius von  $\approx 5$  cm. Geht man von einer Kugelgestalt des Körpers aus, so ergibt dies im Vergleich mit der Fundmasse einen Ablationsverlust von ca. 98,9%. Die durchgeführten Edelgasanalysen deuten nicht auf einen SCR-Beitrag hin. Beim Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  mit der Tiefe ist keine Erhöhung zu erkennen.

Die Daten der Laser-Analyse streuen um einen Mittelwert, der dem der Bulk-Analyse entspricht. Ein ermittelter  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Wert von 1,23-1,24 kann für Körper mit präatmosphärischen Radien  $\geq 5$  cm und hohem Ablationsverlust nicht alleine durch GCR-Bestrahlung erklärt werden. Ein SCR-Beitrag ist vorhanden (vgl. Kapitel 5.3, Abb. 17). Die Probe stammt vermutlich aus dem Zentralbereich des präatmosphärischen Meteoroiden, da der Verlauf von  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  in Abhängigkeit von der Tiefe konstant ist.

Der Verlauf von  $^{21}\text{Ne}$  mit der Tiefe zeigt keinerlei Auffälligkeiten. Die Werte streuen um einen Mittelwert, welcher dem der Bulk-Analyse entspricht.

Der vorhandene SCR-Beitrag ergibt sich alleine aus den erhöhten  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Werten und kann quantitativ abgeschätzt werden. Dazu wird von einem zweistufigen Modell ausgegangen (vgl. Kapitel 8.5.5). Der SCR-Beitrag stammt vor allem aus der zweiten Stufe der Bestrahlung in einer Entfernung von 1 AU von der Sonne. Ausgehend von einem präatmosphärischen Radius von 2,5 ; 5,0 und 7,5 cm und einer maximalen Abschirmung wurden verschiedene zweistufige Bestrahlungsmöglichkeiten berechnet. Die größte Übereinstimmung mit den experimentellen  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{21}\text{Ne}$  und  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Daten ergibt sich für eine primäre Bestrahlung von 4,5 Ma in 3 AU und einer sekundären Bestrahlung von 3,8 Ma im Abstand von 1 AU von der Sonne für einen Körper mit einem Radius von 5 cm. Dabei stimmen die Neon-Daten sehr gut mit den Modellrechnungen überein. Die  $^{26}\text{Al}$ -Werte werden vom Modell überschätzt, was bedeutet, dass der Körper größer als 5 cm und deutlich kleiner als 7,5 cm war und das der Bestrahlungszeitraum in der ersten Stufe eine untere Grenze angibt. Der gesamte Bestrahlungszeitraum von 8,3 Ma ist identisch mit dem, mittels der empirischen Beziehung von Eugster, bestimmten Bestrahlungsalter.

Eine Zusammenfassung aller Ergebnisse ergibt, dass ein Vorhandensein eines SCR-Beitrags eindeutig gezeigt und abgeschätzt werden konnte.

## 8.9 Fazit der Tiefenprofile

Es wurden sieben Tiefenprofile an fünf Meteoriten analysiert. Nur bei einem Meteoriten (ALH88009) konnte durch den Verlauf von  $^{21}\text{Ne}$  und  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$  als Funktion der Tiefe eine SCR-Signatur direkt nachgewiesen werden. Zwei weitere Meteorite (ALH88013 und ALH88048) zeigten alleine durch einen hohen  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Wert einen SCR-Beitrag an. Dagegen konnte eine SCR-Signatur anhand des Meteoriten ALH88003 nicht eindeutig gezeigt werden. Bei einem Meteoriten (ALH88023) konnte der Beitrag durch SCR ausgeschlossen werden.

Ein Vergleich eines Laser-Tiefenprofils mit einem Bulk-Profil (ALH88048) zeigte eine sehr gute Übereinstimmung der ermittelten  $^{21}\text{Ne}$ - und  $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ -Werte.

Ausgehend von der Richtigkeit der Modelldaten ist der Beitrag durch SCR errechenbar. Dabei wird von der empirischen Produktionsrate nach Eugster ausgegangen. Sie stellt die Summe aus GCR und SCR-Produktionsraten dar. Damit kann ein zweistufiges Bestrahlungsmodell angewandt werden, um die einzelnen Beiträge zu ermitteln. An Hand dieser Tiefenprofile und der Modelle wurde eine zweistufige Bestrahlung nachgewiesen. Es zeigte sich wie erwartet, dass bei zwei Meteoriten die zweite Bestrahlungsdauer niedriger war als die erste. Bei einem Meteoriten ergab das zweistufige Modell ein umgekehrtes Bild: der zweite Bestrahlungszeitraum war deutlich höher als der erste. Die Gesamtbestrahlungsdauern waren bei allen Meteoriten mit den nach Eugster ermittelten im Rahmen der Unsicherheiten vergleichbar.

Der Parameter  $J_0=55 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  des Modells markiert, im Gegensatz zu anderen Modellen, einen sehr niedrigen Wert (vgl. Kapitel 4.2.2). Das bedeutet, dass der Bestrahlungszeitraum der zweiten Stufe eine obere Grenze darstellt.

Es wurde durch die Anwendung des zweistufigen Modells gezeigt, dass ein SCR-Beitrag in kleinen Meteoriten am ehesten über Radionuklide geschieht. Ein direkter Nachweis durch stabile Nuklide ist für sehr kurze Bestrahlungsalter und / oder einen großen Beitrag aus der zweiten Stufe möglich.

## 9 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Aufbau und der Einsatz einer Laser-Extraktionsanlage dargestellt. Diese neue Anlage stellt eine Erweiterung des Edelgas-Massenspektrometers „Alfred“ dar. Ein Großteil der Arbeit befasste sich mit dem Aufbau und der Abschätzung der Einsatzmöglichkeiten. Erste Untersuchungen waren Tiefenprofile an Meteoriten. Dabei stand die Unterscheidung der zwei Komponenten der kosmischen Strahlung im Mittelpunkt. Es ist erstmalig gelungen einen Beitrag zur Produktion von stabilen Nukliden durch die „solare kosmische Strahlung“ direkt nachzuweisen. Ebenfalls konnten die zwei unterschiedlichen Komponenten gegeneinander abgeschätzt und eine zweistufige Bestrahlung belegt werden. An Hand eines zweistufigen Modells wurde gezeigt, dass der Nachweis eines SCR-Beitrags durch Radionuklide deutlicher ausfallen muss, als der über stabile Nuklide.

Der direkte Nachweis durch die Analyse der Neon-Isotope ist somit bei einer „ungewöhnlichen“ Bestrahlungsgeschichte erfolgt. Die empirischen Produktionsraten (Eugster) wurden so interpretiert, dass sie eine Superposition der Produkte aus galaktischer- und solarer kosmischer Strahlung darstellen, welche von den „theoretischen“ Modellen vorhergesagt werden.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit der Laser-Extraktionsanlage wäre die vollständige Verdampfung von zuvor separierten Einzelkörnern. Dazu müsste die Laser-Anlage an ein empfindlicheres Massenspektrometer (digitale Ionenzählung) angekoppelt werden. Pläne dafür bestehen bereits.

# 10 Anhang

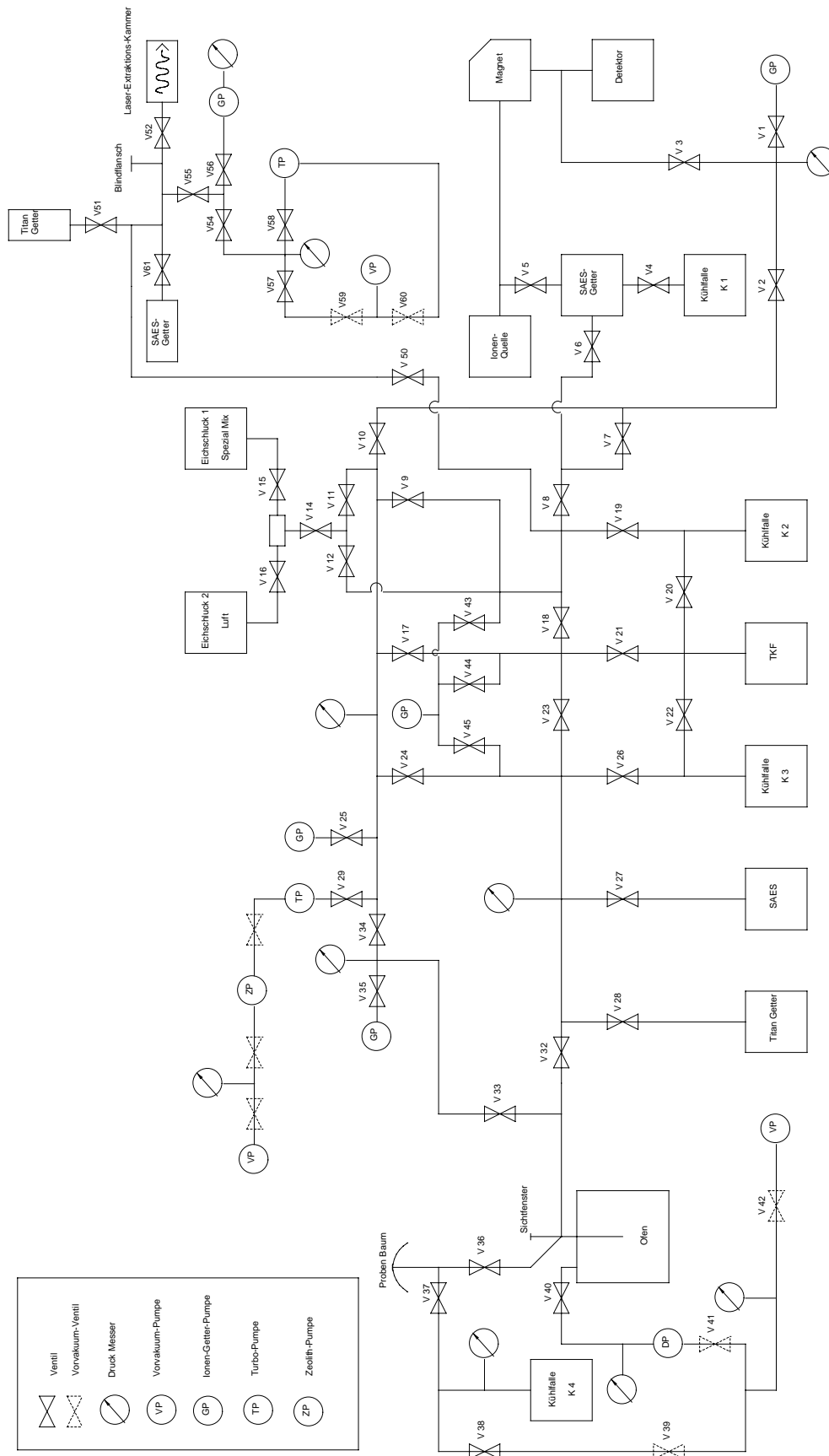
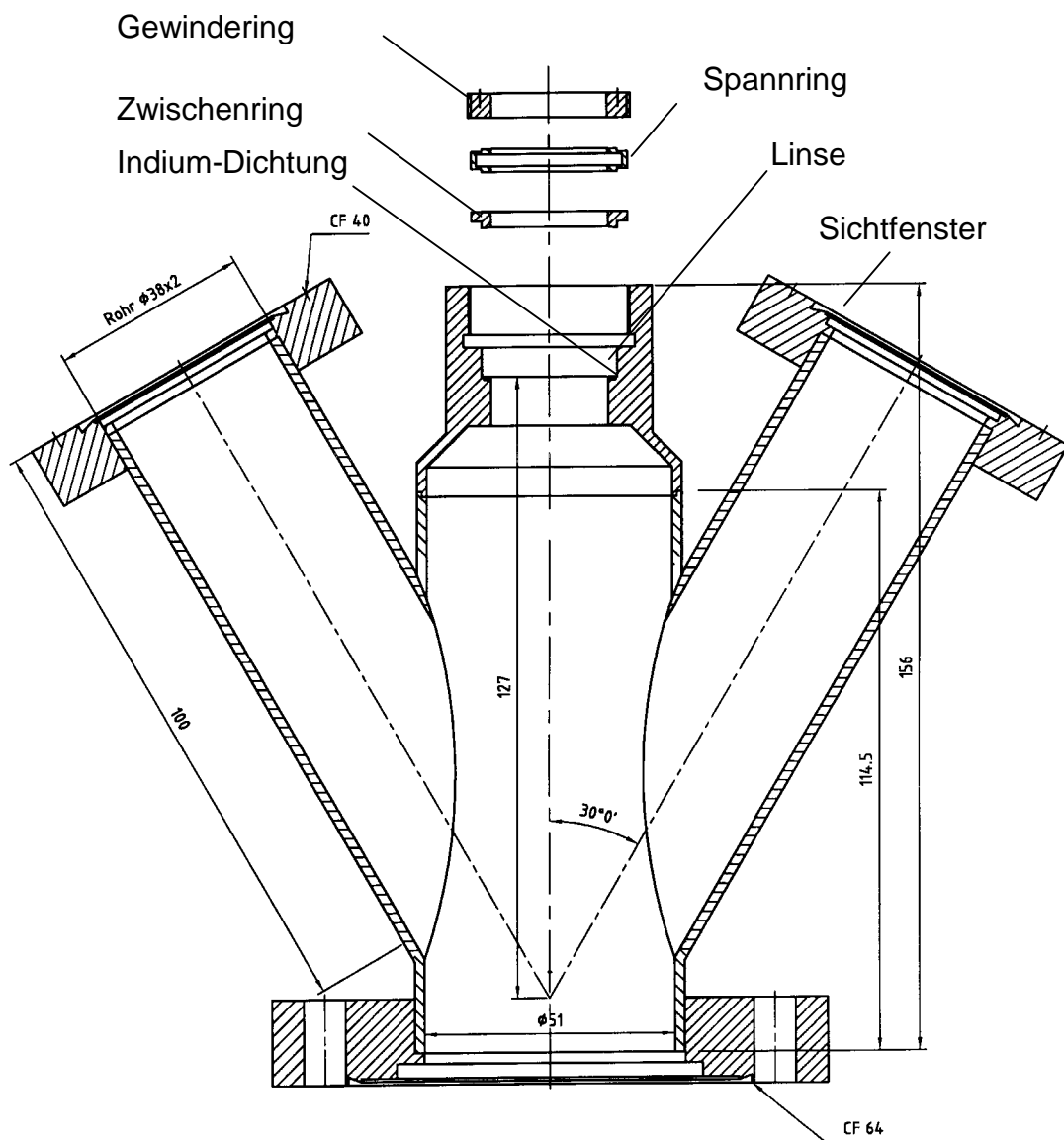


Abbildung 64: Gesamtplan des Edelgas-Massenspektrometers.





**Abbildung 65:** Die Laser-Extraktions-Kammer. Die Abmessungen sind in Millimetern angegeben. Die Bezeichnungen CF40 und CF64 beziehen sich auf die „con-flat“-Baureihe der Firma „Pfeiffer-Vakuum“.

## Laserschuß / Blank

offen: V52, V12, V43, V8, V19, V4, V5, (V1), V3

zu: V61, V51, V50, V18, V6, V9

Pumpen umstellen

(Wasser an, Shutterkühlung, Laser an, Shutter an)<sub>nur bei Schuß</sub>

V61 auf 5 min pumpen

V61 zu, V55 zu

0	Schuss		
	V61 auf		kalter SAES - Getter
	V4, V19 zu	K1, K2 an LN <sub>2</sub>	
30	V43 zu		
	V50, V19 auf		Anfrieren an K2
35	V52 zu		
40	V5 zu, V6 auf		
55	V19 zu, V4 auf		Rest anfrieren an K1
60	(V3) V1 zu	MS Druckmesser aus	
	CONTINUE V5 auf		
63	V6 zu		Messen
	V9 auf		Rest abpumpen
	V50 zu, V55 auf, V52 auf		

Ne + He

0	V6 auf		abpumpen
3	V5 zu, (V3) V1 auf	K1 warm	MS pumpen
10	V12, V9 zu	K1 kalt, K2 warm	
	V19 auf		AKX von K2 nach K1
30	V6 zu	K1 warm	AKX frei
	V9 auf		Rest abpumpen
40	(V3) V1 zu	Heizungen entfernen	
	CONTINUE V5 auf		

AKX

danach:

0 V19 zu, V6 auf

3 V6 zu, (V3) V1 auf, V19, V12 auf

5 V9 zu, V43 auf, V61 zu

Pumpen umstellen

*Abbildung 66: Ablauf der Laser-Messung.*

## 11 Literatur

- [BEN93] Benkert J. P., Baur H., Signer P., Wieler R., He, Ne, and Ar from the solar wind and solar energetic particles in lunar ilmenites and pyroxenes, *J. Geophys. Res. (Planets)* **98**, (1993), 13147-13162.
- [BHA80] Bhandari N., Lal D., Rajan R. S., Arnold J. R., Marti K., Moore C. B., Atmospheric ablation in meteorites: a study based on cosmic ray tracks and neon isotopes, *Nucl. Tracks* **4**; (1980), 213-262.
- [BOD93] Bodemann R., Zur Wechselwirkung der solaren kosmischen Strahlung mit extraterrestrischer Materie-Messung von Wirkungsquerschnitten und Modellrechnungen, *Dissertation Universität Hannover*, (1993).
- [BÜH88] Bühler R., Meteorite: Urmaterie aus dem interplanetaren Raum, Birkhäuser Verlag Basel, (1988).
- [BRO96] Brownlow A. H., Geochemistry, second edition, Prentice Hall, Inc., N.J., (1996).
- [BRU64] Brunnee C., Voshage H., Massenspektrometrie, Karl Thiemig Verlag München, (1964).
- [CAF88] Caffee M. W., Irradiation records in meteorites in *Meteorites and the early solar system*, Hrsg.: Kerridge J. F., Matthews M. S., University of Arizona Press, Tucson, (1988), 205-245.
- [CAS92] Cassidy W. A., Harvey R.P., Schutt J., Delisle G., Yanai K., The meteorite collection sites of Antarctica, *Meteoritics* **27** , (1992), 490-525.
- [COL60] Colgate S., Johnson M. H., Hydrodynamic origin of cosmic rays, *Phys. Rev. Lett.* **5**, (1960), 235-238.

- [DOH78] Dohnanyi J. S., zitiert von [MCG86], (1978).
- [DTV90] Herrmann J., dtv-Atlas zur Astronomie, Deutscher Taschenbuch Verlag, München, (1990).
- [EIC91] Eichler J., Eichler H. J., Laser, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, (1991).
- [EBE66] Eberhardt P., Eugster O., Geiss J., Marti K., Rare gas measurements in 30 stone meteorites, *Z. Naturforsch.* **21a**, (1966), 414-426.
- [EUG88] Eugster O., Cosmic ray production rates for  $^3\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ,  $^{38}\text{Ar}$ ,  $^{83}\text{Kr}$ , and  $^{126}\text{Xe}$  in chondrites based on  $^{81}\text{Kr}$ -Kr exposure ages, *Geochim. Cosmochim. Acta* **52** (1988), 1649-1662.
- [FER49] Fermi E., On the origin of the cosmic radiation, *Phys. Rev.* **75**, (1949), 1169-1174.
- [FRE78] Freundel M., Trennung kleiner Mengen von Argon, Krypton und Xenon aus Gasgemischen zur massenspektrometrischen Analyse, *Diplomarbeit Universität Mainz*, (1978).
- [GLA97] Gladman B. J., Migliorini F., Morbidelli A., Zappalà V., Michel P., Cellino A., Froeschlé C., Levison H. F., Bailey M., Duncan M., Dynamical Lifetimes of Objects Injected into Asteroid Belt Resonances, *Science* **277**, (1997), 197-201.
- [GOS88] Goswami J. N., McGuire R. E., Reedy R. C., Lal D., Jha R., Solar flare and alpha particles during the last three solar cycles, *J. Geophys. Res.* **A93**, (1988), 7195-7205.
- [GÖT84] Götz W., Konstruktion und Inbetriebnahme eines Hochtemperatur-extraktionsofens für Edelgasanalysen, *Diplomarbeit Universität Mainz*, (1984).

- [GRA90a] Graf Th., Signer P., Wieler R., Herpers U., Sarafin R., Vogt S., Fieni C., Pellas P., Bonani G., Suter M., Wölfli W., Cosmogenic nuclides and tracks in the chondrite Knyahinya, *Geochim. Cosmochim. Acta* **54**, (1990), 2511-2520.
- [GRA90b] Graf Th., Baur H., Signer P., A model for the production of cosmogenic nuclides in chondrites, *Geochim. Cosmochim. Acta* **54**, (1990), 2521-2534.
- [HAM88] Hamilton D. C., zitiert in [REE95], *Interplanetary Particle Environment*, **86**, Jet Propulsion Laboratory Publ. 88-28, (1988).
- [HEI88] Heide F., *Kleine Meteoritenkunde*, Springer Verlag., Berlin Heidelberg, New York, (1988).
- [HER91] Herziger G., Wester R., Materialbearbeitung mit Lasern, *Physik in unserer Zeit*, 22. Jahrg., Nr. 5, (1991).
- [HUN69] Huneke J. C., Nyquist L. E., Funk H., Köppel V., Signer P., The thermal release of rare gases from separated minerals of the Mócs meteorite, *Millman (ed.), Meteorite Research*, Reidel Verlag, (1969), 901–921.
- [HUS95] Huss G. R., Lewis R. S., Presolar diamond, SiC, and graphite in primitive chondrites: Abundances as a function of meteorite class and petrologic type, *Geochim. Cosmochim. Acta* **59**, (1995), 115-160.
- [JUL98] Jull A. J. T., Cloudt S., Donahue D. J., Sisterson J. M., Reedy R. C., Masarik J.,  $^{14}\text{C}$  depth profiles in Apollo 15 and 17 cores and lunar rock 68815, *Geochim. Cosmochim. Acta* **62**, (1998), 3025-3036.
- [KER88] Kerridge J. F., Matthews M. S., *Meteorites and the Early Solar System*, Univ. Arizona Press, (1988).

- [KNE95] Kneubühl F. K., Sigrist M. W., Laser, Teubner Verlag Stuttgart, (1995).
- [LEY97] Leya I., Modellrechnungen zur Beschreibung der Wechselwirkung galaktischer kosmischer Teilchenstrahlung mit Stein- und Eisenmeteoriden; Dünntargetbestrahlungen und Dicktargetexperimente, *Dissertation Universität Hannover*, (1997).
- [LEY00] Leya I., Lange H. J., Neumann S., Wieler R., Michel R., The production of cosmogenic nuclides in meteorites by galactic cosmic ray particles, *Meteoritics* **35**, (2000), 259-286.
- [LOE93] Bestimmung de Edelgasgehaltenes antarktischer H-Chondrite und ein Vergleich mit "Modernen Fällern", *Dissertation Universität Mainz*, (1993).
- [LOV93] Love S. G., Brownlee D. E., A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust , *Science* **262**, (1993), 550-553.
- [MAS79] Mason B., Meteorites, *Geological Survey Professional Paper 440 – B -1, chapter B: Cosmochemistry*, (1979).
- [MCG86] McGuire R. E., von Rosenvinge T. T., McDonald F. B., The composition of solar energetic particles, *The Astrophysical Journal*, **301**, (1986), 938-961.
- [MET99] Metbase 4.0, Meteorite Data Retrieval Software by Jörn Koblitz, (1999).
- [MIC89] Michel R., Pfeiffer F., Theis S., Begemann F., Weber H., Signer P., Wieler R., Cloth P., Dragovitsch P., Filges D., Englert P., Production of stable and radioactive nuclides in thick stony targets (R=15 and 25 cm) isotropically irradiated with 600 MeV protons and simulation of the production of cosmogenic nuclides in meteorites, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* **B42**, (1989), 76-100.

- [MIC96] Michel R., Leya I., Borges L., Production of cosmogenic nuclides in meteoroides: accelerator experiments and model calculations to decipher the cosmic ray record, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* **B113**, (1996), 434-444.
- [MIC97] Michel R., Neumann S., Interpretation of cosmogenic nuclides in meteorites on the basis of accelerator experiments and physical model calculations, *Isotopes in the solar system; Proc. of the international conference PRL, Ahmedabad, Indien*, Hrsg.: Goswami J. N., Krishnaswami S., (1997), 207-223.
- [MOE89] Moenke-Blankenburg L., Laser Micro Analysis, *Chemical Analysis* **105**, John Wiley & Sons, New York, (1989).
- [MOR98] Morbidelli A., Gladman B. J., Orbital and temporal distributions of meteorites originating in the asteroid belt, *Meteoritics* **33**, (1998), 999-1016.
- [NES99] Neumann S., Aktivierungsexperimente mit Neutronen mittlerer Energie und die Produktion kosmogener Nuklide in extraterrestrischer Materie, *Dissertation Universität Hannover*, (1999).
- [NES99b] Neumann S., Daten der Modellrechnungen, *pers. Mitteilung*, (1999).
- [NEU96] Neupert U., Langlebige kosmogene Radionuklide in Meteoriten aus heißen und kalten Wüsten – Messung von natürlichen Vorkommen, Dünntargetwirkungsquerschnitten und Dicktargetproduktionsraten zur Rekonstruktion von Bestrahlungsgeschichten, *Dissertation Universität Hannover*, (1996).
- [NIS90] Nishiizumi K., Nagai H., Imamura M., Honda M., Kobayashi K., Kubik P. W., Sharma P., Wieler R., Signer P., Goswami J. N., Sinha N., Reedy R. C., Arnold J. R., Solar cosmic ray produced nuclides in the Salem meteorite, *Meteoritics* **25**, (1990), 392-393.

- [OTT93] Ott U., Interstellar grains in meteorites, *Nature* **364**, (1993), 25-33.
- [OZI83] Ozima M., Podosek F. A., Noble gas geochemistry, Cambridge University Press, Cambridge, (1983).
- [PEP99] Pepin R. O., Becker R. H., Schlutter D. J., Irradiation records in regolith materials. I: Isotopic composition of solar-wind neon and argon in single lunar mineral grains, *Geochim. Cosmochim. Acta* **63**, (1999), 2145-2162.
- [PLA97] Platzner I. T., Modern Isotop mass ratio spectrometry, John Wiley & Sons, New York, (1997).
- [RAO94] Rao M. N., Garrison D. H., Bogard D. D., Reddy R. C., Determination of the flux and energy distribution of energetic solar protons in the past 2 Myr using lunar rock 68815, *Geochim. Cosmochim. Acta* **58**, (1994), 4231-4245.
- [REE92] Reedy R. C., Should there be solar-proton-produced neon observable in Salem ?, *Meteoritics* **27**, (1992), 280.
- [REE94] Reedy R. C., Masarik J., Cosmogenic nuclide depth profiles in the lunar surface, *Lunar Planet. Sci.* **25**, (1994), 1119-1120.
- [REE95] Reedy R. C., Masarik J., Production profiles of nuclides by galactic cosmic ray particles in small meteorides, *LPI Technical Report* **95-02**, (1995), 55-57.
- [SCH93] Schultz L., Planetologie eine Einführung, Birkhäuser Verlag, Basel, (1993).
- [SHE98] Scherer P., Herrmann S., Schultz L., Noble gases in twenty-one Saharan LL-chondrites: Exposure ages and possible pairings, *Meteoritics* **33**, (1998), 259-265.



- [SHR70] S.H.R.E.L.L.D.A.L.F.F. (Shedlovsky J. P., Honda M., Reedy R. C., Evans Jr J. C., Lal D., Lindstrom R. M., Delany A. C. Arnold J. R., Loosli H.-H., Fruchter J. S., Finkel R. C., Pattern of bombardement-produced radionuclides in rock 10017 and in lunar soil, *Proc. of the Apollo 11 Lunar Science Conference 2*, (1970), 1503-1532.
- [SIG60] Signer P., Nier A. O., The distribution of cosmic-ray-produced rare gases in meteorites, *J. Geophys. Res.* **65**, (1960), 2947-2964.
- [SIM83] Simpson J. A., Elemental and isotopic composition of the galactic cosmic rays, *Ann. Rev. Part. Science* **33**, (1983), 323-381.
- [SWI88] Swindle T., Trapped noble gases in meteorites in *Meteorites and the early solar system*, Hrsg.: Kerridge J. F., Matthews M. S., University of Arizona Press, Tucson, (1988), 535-564.
- [VOG99] Vogel N., *pers. Mitteilung*, (1999).
- [WAS74] Wasson J. T., *Meteorites*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, (1974).
- [WAS85] Wasson J. T., *Meteorites, their record of the early solar-system history*, Freemann & Co, (1985).
- [WIE92] Wieler R., Anders E., Baur H., Lewis R. S., Signer P., Characterisation of Q-gases and other noble gas components in the Murchison meteorite, *Geochim. Cosmochim. Acta* **56**, (1992), 2907-2921.
- [WOO79] Wood J. A., *The solar system*, Prentice Hall, Inc., N.J., (1979).