

Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Diplomarbeit
im Studiengang Physik
vorgelegt von
Sebastian Kuhn
aus Neuendettelsau
2002

Hochgeschwindigkeitsmessungen
am Staubbeschleuniger
mit der CDA - Flugsatzzeinheit

Die Diplomarbeit wurde von Sebastian Kuhn ausgeführt am
Max-Planck-Institut für Kernphysik Heidelberg
unter der Betreuung von
Herrn Prof. Eberhard Grün

Hochgeschwindigkeitsmessungen am Staubbeschleuniger mit der CDA - Flugersatzeinheit: Zur Kalibration des Cosmic Dust Analyzer Detektors an Bord der Raumsonde Cassini werden mit einem 2 MV Beschleuniger Projektilen bekannter Größe und chemischer Zusammensetzung auf die Flugersatzeinheit des Detektors geschossen. Um eine bessere Kalibration zu erhalten, sollen neue Materialien, welche für die Beschleunigung geeignet sind, gefunden werden. Weiterhin sollen erste Massenspektren schnellster Teilchen aus Aluminium, polyprrolbeschichtetem Polystyren und Polyprrol-Silizium Gemischen bis zu 50 km/s aufgenommen werden. Bei den Spektren dieser schnellen Teilchen zeigen sich erstmals Massenlinien mehrfach ionisierter Atome, im Gegensatz zu bisherigen Messungen für Impaktplasmen.

High speed measurements at the dust accelerator with the CDA - flight spare unit: For the calibration of the Cosmic Dust Analyzer detector on board of the spacecraft Cassini projectiles of known size and chemical composition are shot on the detector's flight spare unit with a 2 MV accelerator. To achieve a better calibration new materials suited for acceleration have to be found. Also first mass spectra of fastest particles of aluminium, polyprrolcoated polystyren and polypyrrol-silica nanocomposites up to 50 km/s are recorded. The spectra of these fast particles show for the first time mass lines of multiply ionized atoms, in contrast to previous measurements.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
1.1	Aufgabenstellung	8
1.2	Aufbau dieser Arbeit	9
2	Geräte	11
2.1	Der Staubdetektor CDA	11
2.1.1	Der Cosmic Dust Analyzer	11
2.1.2	Die Cassini-Huygens-Mission	13
2.2	Der Staubbeschleuniger	14
2.3	Der Teststand	17
2.4	Die Staubquelle	18
2.5	Der Ladungssensitive Detektor	18
3	Messungen	25
3.1	Der ladungssensitive Detektor (LSD)	25
3.1.1	Test der LSDs	25
3.1.2	Kalibration	26
3.2	Vorbereitende Messungen an Projektilmaterialien	28
3.2.1	Messung des spezifischen Widerstandes	28
3.2.2	Aufwirbelungsversuche	28
3.2.3	Staubmaterialien	28
3.3	Messungen am Teststand	35
3.4	Messungen mit dem Cosmic Dust Analyzer (CDA)	35
3.4.1	Messmethode	36
3.4.2	Schüsse mit Aluminium	37
3.4.3	Schüsse mit Latex	38
3.4.4	Schüsse mit Latex mit Silizium	39
4	Ergebnisse der Messungen mit CDA	41
4.1	Latex	41
4.2	Latex mit Silizium	50
4.3	Aluminium	53

5	Diskussion	59
5.1	Folgen für den LSD	59
5.2	Messungen mit CDA	59
5.2.1	Latex	59
5.2.2	Latex mit Silizium	60
5.2.3	Aluminium	60

Literaturverzeichnis

Kapitel 1

Einführung

Ein nicht zu vernachlässigender Teil dessen, was durch unser Sonnensystem fliegt, ist Staub, also Mikrometeoroiden. Diese Partikel haben Größen von wenigen 100 nm bis einigen μm . Staub gibt es in verschiedenen Gruppen: interstellarer, interplanetarer und planetarer Staub (GRÜN, E. & Mitarb., 1994). Entstehen kann er sowohl durch Vulkanismus (planetarer Staub), als auch durch Zusammenstöße und Zersplitterung größerer Körper, beziehungsweise Impakte auf Monden oder Planeten, oder durch Auflösung größerer Meteoroiden und Kometen durch Sonneneinwirkung (interplanetarer Staub). Interstellarer Staub dagegen stammt von außerhalb unseres Sonnensystems, man kennt die Entstehung noch nicht. Als mögliche Prozesse für die Entstehung vermutet man Kondensation in Sternatmosphären oder Teilchen, die aus Akkretionsscheiben stammen. Diese Meteoroiden bewegen sich mit Geschwindigkeiten von circa 30 km/s auf Hyperbelbahnen durch unser Sonnensystem, im Gegensatz zu interplanetarem Staub (z.B. Jupiterstromteilchen), welcher bis zu 400 km/s schnell werden kann. Diese Geschwindigkeiten werden durch Beschleunigung in einem Magnetfeld (z.B. das Magnetfeld des Jupiter) erreicht, da sich die Staubteilchen durch Wechselwirkung mit dem Sonnenwind und ultravioletter Strahlung elektrisch aufladen (DRAINE, B.T. & SALPETER, E.E., 1979).

Daß Staub in unserem Sonnensystem existiert, ist schon seit einigen Jahrhunderten bekannt. Er wurde aufgrund des Zodiakallichtes bemerkt: es entsteht, indem Sonnenlicht am Staub gestreut wird (WHIPPLE, 1978). Aufgrund dieses Zodiakallichtes konnte man auch die ersten Untersuchungen des Staubs vornehmen, indem man aus optischen Spektren Einiges über seine Eigenschaften (Größe, Temperatur, Zusammensetzung) schließen konnte (WEINBERG, J.L. & SPARROW, J.G., 1978). Seit einigen Jahrzehnten nun ist man dazu übergegangen, in situ Messungen vorzunehmen. Hierzu wurden auf verschiedenen Sonden (Galileo, Ulysses, Cassini als Beispiele für Missionen jüngeren Datums) Staubdetektoren angebracht.

Diese Messungen werden durchgeführt, um mehr über den Staub zu erfahren, da dieser nicht nur in unserem Sonnensystem existiert, sondern auch anderswo im All (BECKWITH, S.V.W. & Mitarb., 1990). Zum Beispiel ist Staub bei der Sternentstehung von Bedeutung, da er Wärme aufnimmt und im infraroten Bereich abstrahlt, dadurch zur Kühlung des Protosterns beiträgt. Vor allem aber wird postuliert, daß Planeten aus akkretierendem Staub

entstehen (FAHR, H.J. & WILLERDING, E.A., 1998). Kometen gelten als Reste dieser Entstehungsphase und ihr Staub kann daher Hinweise auf die Entstehung und Entwicklung unseres eigenen Sonnensystems geben. Ebenso ist natürlich der interstellare Staub von besonderem Interesse: unterscheidet er sich vom interplanetaren Staub, oder gleichen sich beide Gattungen, außer in Geschwindigkeit und Ursprung? Eine ähnliche Problematik stellt sich beim planetaren Staub: Welche Unterschiede bestehen zum interplanetaren Staub? Doch hier kommen noch Fragestellungen dazu: Ist der planetare Staub eine mögliche Quelle für den interplanetaren Staub, wie weit ist seine Ausdehnung von seiner Quelle (Planet/Mond)?

Ein Gerät, welches diese Fragestellungen untersuchen soll, ist der Staubdetektor CDA (Chemical Dust Analyzer, s. Kapitel 2.1), welcher auf der Cassini-Huygens Raumsonde montiert ist. Es handelt sich hierbei um einen Einschlagionisationsdetektor mit integriertem Flugzeitmassenspektrometer. Wenn ein Projektil mit hoher Geschwindigkeit auf ein Target trifft, so läuft direkt nach dem Impakt eine Schockwelle durch das Projektil und das Target. Hierbei kommt es zu Ionisationsprozessen (DRAPATZ, S. & MICHEL, K.W., 1974). Die hierbei entstehenden Ionen werden mit dem Flugzeitmassenspektrometer untersucht. Zur weiteren Kalibration dieses Gerätes wird mit dem Heidelberger Staubbeschleuniger Material bekannter chemischer Zusammensetzung, Größe und Geschwindigkeit auf die Flugersatzeinheit (flight spare unit, FS) des CDA geschossen. Allerdings ist es sehr schwierig, ähnliche Geschwindigkeiten, wie im Sonnensystem detektiert wurden, zu erreichen. Die Geschwindigkeit ist nämlich abhängig von dem Verhältnis Ladung zu Masse ($\frac{q}{m}$) und von der Beschleunigungsspannung. Mikrometergroße Teilchen erreichen mit dem Heidelberger 2 MV Beschleuniger eine Geschwindigkeit von ca 2 - 10 km/s.

1.1 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist nun, neue Projektilmaterialien für den Heidelberger 2 MV Beschleuniger zu beschaffen und diese auf ihre Möglichkeiten zur Beschleunigung hin zu testen, sowie anschließend mit diesen Materialien erste Messungen durchzuführen. Kriterien für diese neuen Projektilmaterialien sind zum Einen, daß diese Teilchen möglichst hohe Geschwindigkeiten erreichen sollen. Um größere Geschwindigkeiten zu erreichen, muß das Ladungs-Masse Verhältnis erhöht werden. Dies wird bei kleinsten Teilchen erreicht (einige 10 nm). Problematisch ist dabei der Teilchennachweis bei den daraus resultierenden sehr geringen Absolutladungen. Hierzu soll in dieser Arbeit der ladungssensitive Detektor, welcher Teilchen mit kleinen absoluten Ladungen nachweisen soll, für die Verwendung am Heidelberger 2 MV Beschleuniger getestet werden. Das andere Kriterium für die Materialien, welche in dieser Arbeit untersucht werden sollen, ist das Vorhandensein von Silizium in diesen Materialien. Silizium wird in den Mikrometeoroiden als einer ihrer Bestandteile erwartet, jedoch wurden im Labor noch keine Spektren mit Materialien, welche Silizium enthalten, erstellt.

1.2 Aufbau dieser Arbeit

Zunächst sollen in dieser Arbeit die Geräte, die vor allem verwendet wurden, kurz beschrieben werden. Es handelt sich hierbei um den Cosmic Dust Analyzer (CDA), mit dessen flight spare unit die Massenspektren aufgenommen wurden, um den Heidelberger 2 MV Beschleuniger, mit dessen Hilfe die Projektilmaterialien auf Geschwindigkeiten von 5 - 50 km/s beschleunigt wurden, sowie um den ladungssensitiven Detektor, welcher verwendet werden sollte, um Projektilmaterialien mit kleinsten Absolutladungen nachzuweisen.

Anschließend werden die Meßmethoden, sowie die Messungen selber beschrieben. Hierbei wird zunächst der ladungssensitive Detektor untersucht und auf seine Verwendbarkeit am Beschleuniger hin getestet. Nachdem dann die neuen Projektilmaterialien einigen Untersuchungen unterzogen wurden, soll kurz beschrieben werden, wie die Spektren der einzelnen Materialien mit dem Cosmic Dust Analyzer erzielt wurden.

In Kapitel 4 werden dann einige Ergebnisse präsentiert, vor allem eine Auswahl der gewonnenen Spektren. Genauso sollen hier einige erste Ergebnisse von Untersuchungen der gesamten Datensätze gezeigt werden.

Zum Schluß werden dann noch die Ergebnisse, über die in Kapitel 4 berichtet wurde diskutiert und es soll dabei versucht werden, Konsequenzen aus diesen ersten Messungen gezogen zu werden.

Kapitel 2

Geräte

In diesem Kapitel sollen kurz die verwendeten Geräte und Instrumente in ihrer Funktionsweise beschrieben werden. Im Einzelnen wird zunächst der Staubdetektor CDA beschrieben, mit dessen Flugsatzzeinheit die Massenspektren aufgenommen wurden. Anschließend soll kurz der ladungssensitive Detektor, mit dessen Hilfe versucht wurde, Teilchen kleinster Absolutladungen nachzuweisen, dargestellt werden. Als weiterer wichtiger Bestandteil der Messungen soll danach der Aufbau des Heidelberger 2 MV Beschleunigers, und dabei auch der Aufbau des Teststandes und der Staubquelle, geschildert werden. All diese Einheiten dienen der Beschleunigung der untersuchten Materialien.

2.1 Der Staubdetektor CDA

In diesem Abschnitt wird das am Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik entwickelte Flugzeitmassenspektrometer CDA und die Cassini-Huygens Mission, auf der es angebracht ist, vorgestellt.

2.1.1 Der Cosmic Dust Analyzer

Das Flugzeitmassenspektrometer Cosmic Dust Analyzer (CDA, Abb. 2.1) dient der Bestimmung der physikalischen Eigenschaften (Masse, Geschwindigkeit, Ladung), der chemischen Zusammensetzungen und der Flugbahnen von Staubteilchen ($0.1 \dots 10 \mu\text{m}$) in unserem Sonnensystem. Hierbei werden die Staubströme im Sonnensystem und ihre Quellen erkundet. Insbesondere ist die Unterscheidung von interplanetaren und interstellaren Teilchen, sowie der eventuelle Nachweis von Ejekta-Teilchen von Meteoriteneinschlägen auf planetare Körper (Monde) und Teilchen, die aufgrund von vulkanischer Aktivität in das Weltall gelangen, interessant. Weiterhin ist die Wechselwirkung der Teilchen mit Magnetfeldern und Sonnenwind von Interesse.

Die prinzipielle Funktionsweise von CDA ist in Abbildung 2.2 links dargestellt. Die Staubteilchen werden über die Wechselwirkung mit dem Sonnenwind und ultravioletter Strahlung aufgeladen (DRAINE, B.T. & SALPETER, E.E., 1979). Wenn nun ein geladenes



Abbildung 2.1: Aufnahme des CDA

Teilchen in den Detektor eindringt, so entsteht auf zwei inneren, geneigten Gittern eine komplementäre Influenzladung (siehe Abb. 2.2 rechts, QP). An diese Gitter sind ladungsempfindliche Verstärker gekoppelt, die die Ladung messen. Die Influenzgitter sind nach außen durch zusätzliche, geerdete Gitter gegen Störungen abgesichert. Aus der Form des Ladungssignals lassen sich Ladung, Geschwindigkeit und Eintrittswinkel des Teilchens bestimmen (SRAMA, 1999). Hieraus können Rückschlüsse auf Staubströme im Sonnensystem gewonnen werden. Nachdem das Teilchen die Gitter durchquert hat, trifft es schließlich auf ein Gold- oder aber auf ein zentrales Rhodiumtarget. Trifft es auf das Goldtarget (Impact Ionization Detector), so wird die Gesamtladung der beim Einschlag entstehenden Plasmawolke und die Anstiegszeit des Ladungssignals gemessen (siehe Abb. 2.2 rechts, QE). Im zentralen Teil des Goldtargets befindet sich das ‘Chemical Analyzer Target’ (CAT) aus Rhodium. Schlägt ein Staubteilchen hier ein, so entsteht eine Plasmawolke. Da das CAT auf +1000 V Potential liegt, wird die Plasmawolke getrennt und die Ionen werden durch die Potentialdifferenz zwischen dem CAT und einem in 3 mm Abstand vorgelagerten, ge-

erdeten Gitter, beschleunigt. Ein weiteres Ionengitter, welches auf -350 V Potential liegt, fokussiert die Ionen in Richtung des Multipliers. Hier nun entstehen durch den Aufschlag der Ionen auf die erste Dynode des Multipliers Elektronen, welche an den weiteren Dynoden vervielfacht werden. Die Anzahl der Elektronen an der letzten Dynode wird durch einen proportionalen Strom gemessen (siehe Abb. 2.2 rechts, QM). Nach dem Energiesatz kann aus der Zeitdifferenz t des Staubeinschlags auf dem CAT und der Ankunft der Ionen am Multiplier die Masse eines Ions m_{Ion} berechnet werden. Gleichung 2.1 gibt diesen Sachverhalt vereinfacht für eine Beschleunigung, welche vollständig direkt am Einschlagsort geschieht, wieder. Dieses Prinzip gibt dem Instrument den Namen Flugzeitmassenspektrometer.

$$\begin{aligned} q_{Ion} \cdot U &= \frac{1}{2} m_{Ion} v_{Ion}^2 \\ \implies m_{Ion} &= \frac{2q_{Ion}U}{d^2} \cdot t^2 \end{aligned} \quad (2.1)$$

U bezeichnet das beschleunigende Potential (hier: 1350 V), q_{Ion} ist die Ionenladung (normalerweise einfach geladen, $1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$), d die Distanz vom CAT zum Multiplier und t die Zeit, die das Ion benötigt, um d zurückzulegen.

Tiefergehende Informationen zum Instrument und seinen technischen Daten finden sich im WWW unter <http://www.mpi-hd.mpg.de/dustgroup/cassini/>.

2.1.2 Die Cassini-Huygens-Mission

Das oben vorgestellte Instrument CDA ist Teil der Raumsonde Cassini, die in unserem Sonnensystem zum Planeten Saturn unterwegs ist. Cassini ist am 15.10.1997 gestartet und wird voraussichtlich im Juli 2004 ihr Ziel erreichen. Dort soll der Saturn und seine interplanetare Umgebung erforscht werden. Eine spezielle Tochtersonde (Huygens) wird über Titan, dem größten Saturnmond, abgeworfen und erforscht seine Atmosphäre und Oberfläche. Aufgrund ihres hohen Gewichts (5.6 t) kann Cassini nur mit Hilfe von sogenannten Swingby-Manövern an Venus, Erde und Jupiter zum Saturn gelangen. Dabei wird das Schwerefeld dieser Planeten zur Beschleunigung ausgenutzt (gravity assist). Die Flugroute durch das Sonnensystem ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Da die Flugbahn von Cassini auch am Jupiter vorbeiführt, bestand die Möglichkeit zur simultanen Messung des Staubs im Jupitersystem mit dem Staubdetektor auf der Raumsonde Galileo. Hierbei wurden bessere Aufschlüsse über Teilchengrößen und -geschwindigkeiten für Teilchen die durch vulkanische Aktivitäten vom Jupitermond Io stammen, erhalten (GRAPS & Mitarb., 2001). Weitere Informationen zur Mission sowie den wissenschaftlichen Instrumenten und Zielsetzungen befinden sich im WWW unter <http://saturn.jpl.nasa.gov/cassini/index.shtml>.

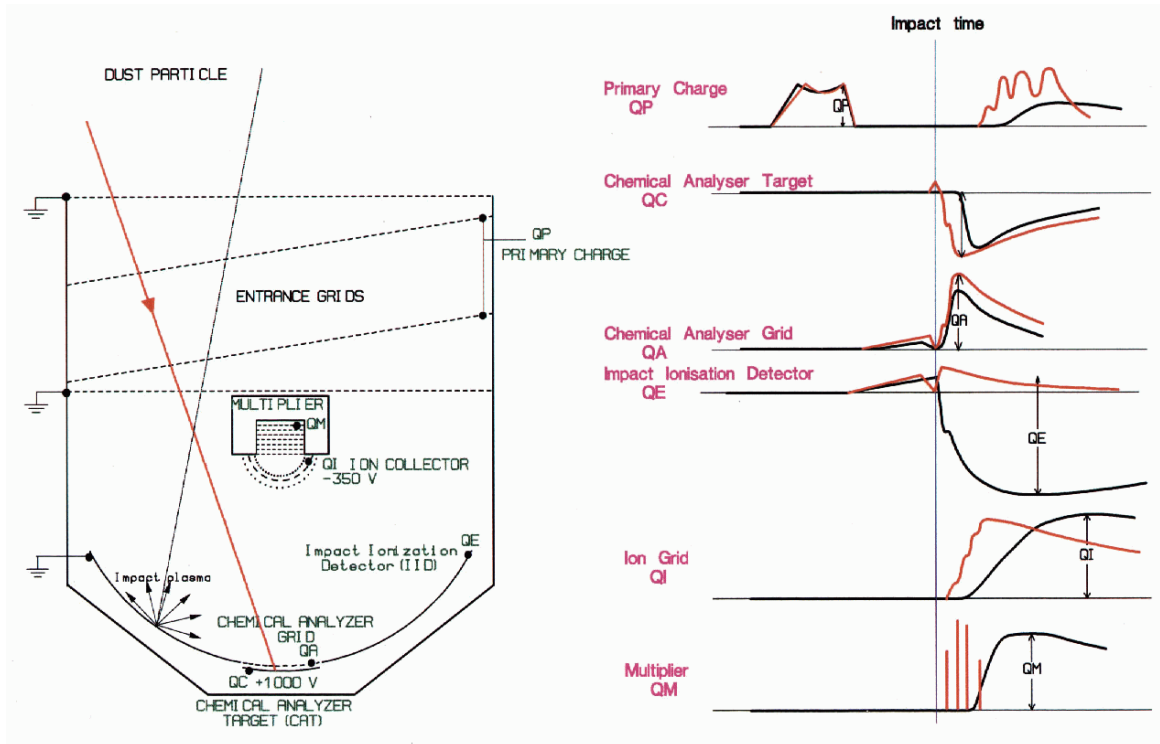


Abbildung 2.2: links: Schematischer Aufbau des CDA; rechts: Signalformen eines Teilchens

2.2 Der Staubbeschleuniger

Zur Kalibration des CDA braucht man zu den im Weltraum erwarteten Mikrometeoriten vergleichbare Einschlagsprojekte. Hierfür wird mit Hilfe des 2 MV Staubbeschleunigers am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg (siehe auch Abb. 2.10) Staub bekannter Größe und bekannter chemischer Zusammensetzung auf die Flugersatzeinheit des CDA geschossen. Bei dem Beschleuniger handelt es sich um ein Van de Graaf-Generator, bei dem die Hochspannung durch elektrostatisch aufgeladene Bänder erzeugt wird.

Zur Vermeidung von Überschlägen bei dieser Hochspannung liegt das 2 MV Terminal in einem Drucktank, welcher mit einem Schutzgas, bestehend aus Schwefelhexafluorid (SF_6) und Stickstoff (N_2), bei 16 bar Druck gefüllt ist. In diesem Drucktank ist auch die Staubquelle (siehe nächster Abschnitt) untergebracht. In der Quelle werden die Teilchen elektrostatisch aufgeladen und aus ihr herausbeschleunigt. Die Teilchen werden nun über Äquipotentialringe, deren Spannung in Abschnitten auf Erdpotential absinkt, das Strahlrohr entlang beschleunigt und erreichen dabei Geschwindigkeiten von einigen km/s.

Dies ist nur möglich (und sinnvoll), wenn das Strahlrohr hochevakuiert ist. Hierzu ist ein Vakuum von 10^{-6} mbar im Strahlrohr nötig. Dazu wird ein 'sauberes' Pumpensystem verwendet, welches aus Hochvakuumpumpen besteht, die auf Öl oder ähnliche verschmutzende Substanzen verzichten: 2 Vorpumpen bringen den Druck auf 10^{-3} mbar, woraufhin Turbomolekular-, Kryopumpen sowie eine Ionengetterpumpe den Druck weiter auf den

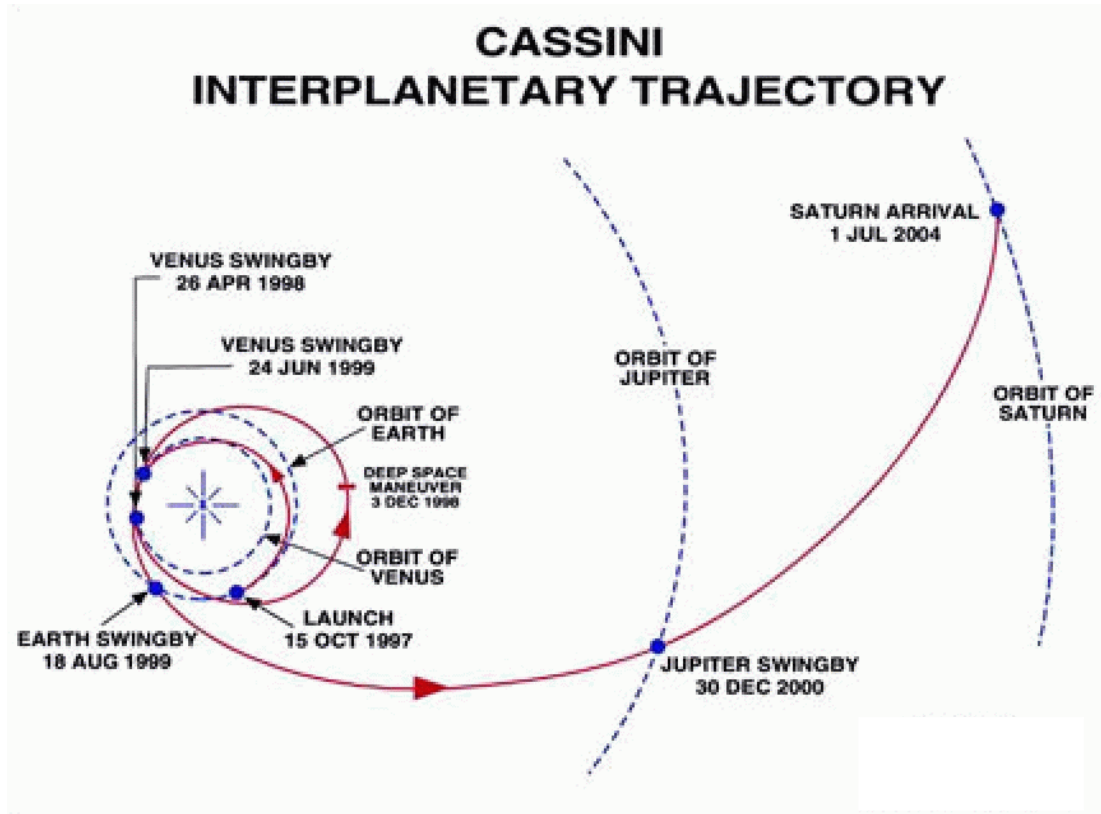


Abbildung 2.3: Flugroute der Sonde Cassini

gewünschten Wert bringen können.

Im Strahlrohr passieren die geladenen Teilchen Influenzröhrchen (zu deren grundsätzlichem Aufbau siehe Abb. 2.4), in denen die influenzierte Ladung und die Laufzeit t_{flug} der Teilchen gemessen werden können. Aus der am Oszilloskop angezeigten Maximalspannung $U_{puls_{max}}$ des Pulses und der Länge des Röhrchens s kann man später die Geschwindigkeit v und die Ladung q der Teilchen berechnen:

$$q = U_{puls_{max}} \cdot S(U). \quad (2.2)$$

$$v = \frac{s}{t_{flug}}. \quad (2.3)$$

Hierbei ist $S(U)$ (in $\frac{Volt}{Colomb}$) die Empfindlichkeit des Ladungsverstärkers, mit dessen Hilfe die influenzierte Ladung als Spannung sichtbar gemacht wird.

Die Influenzröhrchen sind auch ein wesentlicher Bestandteil der Particle Selection Unit (PSU), mit deren Hilfe eine Auswahl der Teilchen nach Ladung und Geschwindigkeit möglich ist. Die PSU besteht aus zwei Influenzröhrchen, einem Kondensatorplattenpaar und einem Computer. Das erste Influenzröhrchen gibt ein Startsignal an den Computer, das zweite Röhrchen ein Stoppsignal. Aus Start- und Stoppsignal (beziehungsweise bei

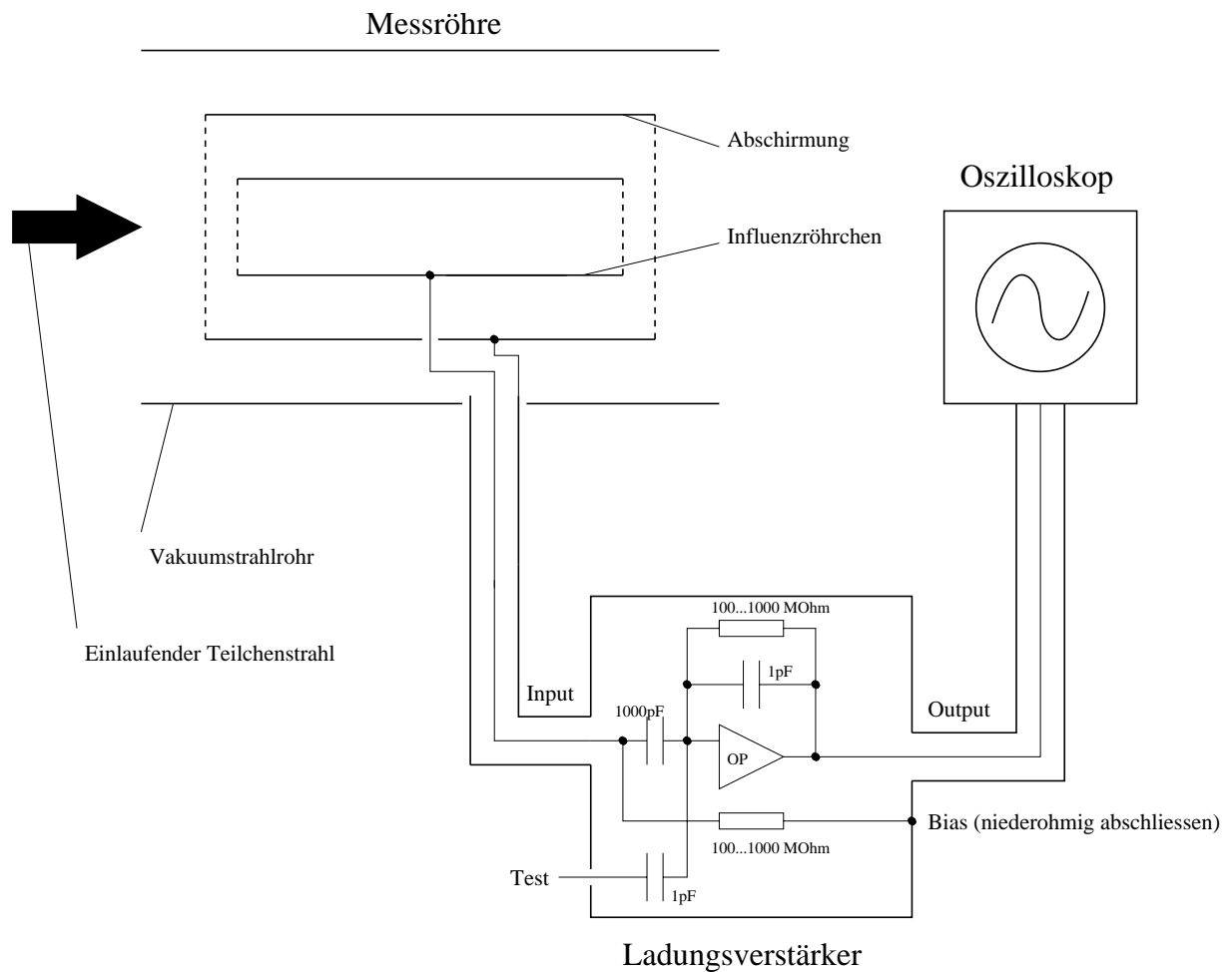


Abbildung 2.4: Aufbau eines Influenzröhrchens, wie es zum Beispiel für den QD Detektor oder in der PSU verwendet wird

Auswahl nach Ladung aus den Amplituden der Signale) kann der Computer die Geschwindigkeit (beziehungsweise die Ladung) des Teilchens ermitteln. Liegt das Teilchen innerhalb des vorher eingestellten Bereiches, so sendet der Computer ein Signal an die Ablenkplatten, so daß diese kurzzeitig 'auf Durchlaß' (beide Platten liegen auf gleichem Potential) schaltet, also die Kondensatoren kurzzeitig entladen werden. Liegt das Teilchen nicht in dem selektierten Bereich, so liegt zwischen den Ablenkplatten ein Feld an und das Teilchen wird von der Flugbahn abgelenkt und fliegt gegen die Rohrwand. Da allerdings die PSU vollkommen von den Signalen der Influenzröhrchen abhängig ist und diese vor allem bei geringen Ladungen nicht ausreichend genaue Daten liefert, sind die von der PSU gelieferten Geschwindigkeiten, wenn sie sehr hoch sind, und Ladungsmessungen, wenn sie sehr klein sind, mit Vorsicht zu genießen.

2.3 Der Teststand

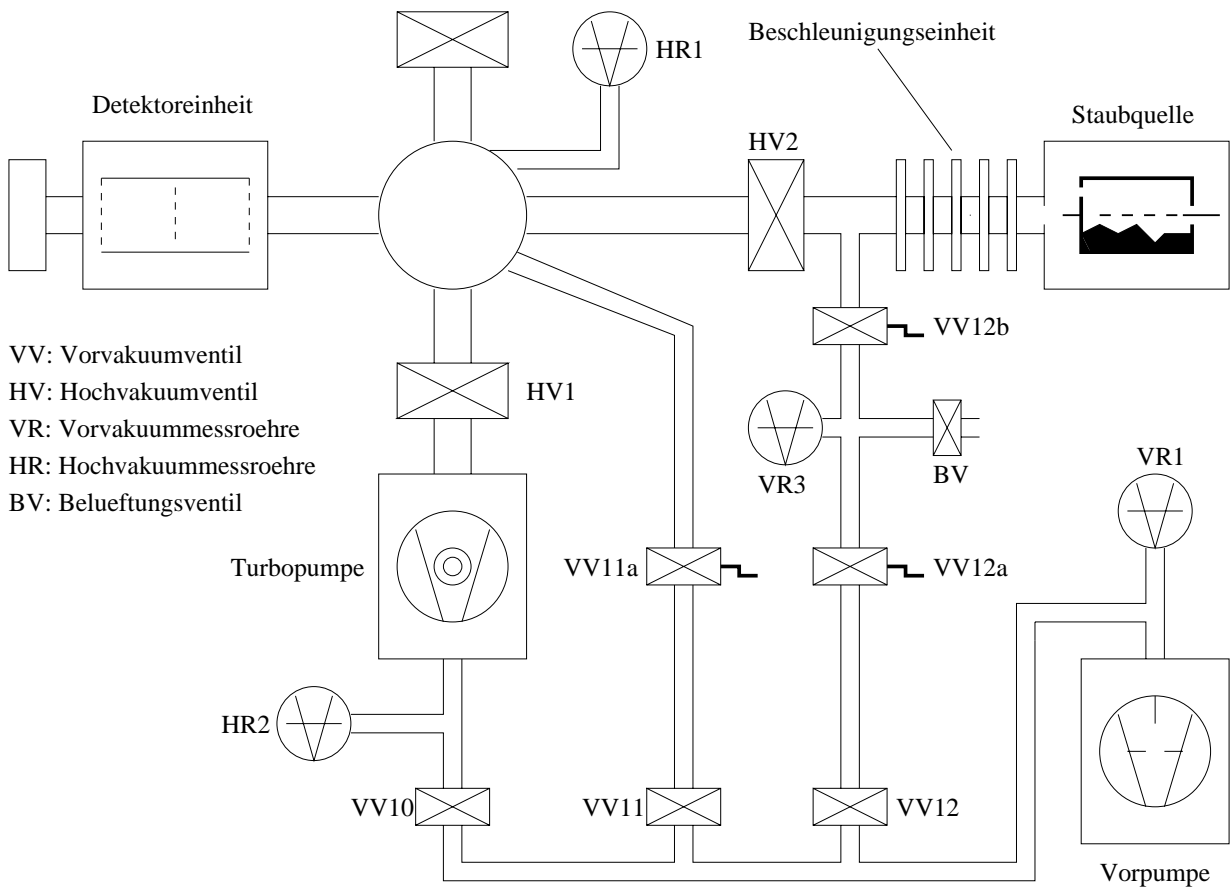


Abbildung 2.5: Schematischer Aufbau des Teststands

Da das Einfüllen der Staubproben in den 2 MV Staubbeschleuniger sehr aufwendig ist, existiert ein Teststand zum Vorbereiten der Proben (hier kann die Quelle vorbereitend ausgasen), sowie zum Test, ob die Proben beschleunigbar sind. Weiterhin sind hier kleinere Experimente, bei denen keine hohen Geschwindigkeiten nötig sind, möglich. Am Teststand ist es nicht nur aus räumlichen Gründen einfacher, die Quelle aufzufüllen oder auszutauschen, sondern es ist auch schneller möglich, nach dem Füllen der Quelle wieder ein ausreichendes Vakuum zu erreichen. So kann man am Teststand über Nacht Vakuum pumpen und am nächsten Tag bereits messen.

Der Teststand besitzt, im Unterschied zum 2 MV Beschleuniger, keinen gesonderten Generator zur Erzeugung einer Beschleunigungsspannung. Die Spannung, die zur Aufladung und Aufwirbelung der Teilchen verwendet wird, wird gleichzeitig als Beschleunigungsspannung verwendet. Damit können bis zu 20 kV als Beschleunigungsspannung verwendet werden, so daß nach dem Energiesatz, $v \sim \sqrt{U_B}$, nur ein Zehntel der Geschwindigkeiten am 2 MV Beschleuniger erreicht werden können. Diese 20 kV fallen in einem 15 cm kurzen

Beschleunigungsrohr über 7 Äquipotentialringe auf Erdpotential ab. Fokussiert wird der Teilchenstrahl durch eine Fokussierspannung, welche am dritten Äquipotentialring anliegt.

Im Teststand sind als Detektoren ein Influenzgitter und ein Influenzröhrchen fest eingebaut. Diese befinden sich im Abstand von ca. 1 m von der Staubquelle. Hinter diese beiden Detektoren können weitere Detektoren oder Experimente aufgebaut werden, zum Beispiel ein LSD oder ein Einschlagionisationsdetektor.

2.4 Die Staubquelle

Ein sehr wichtiger Teil des Staubbeschleunigers ist die Staubquelle, welche die Staubteilchen elektrostatisch aufladen soll. Die Idee zu Staubquellen geht auf Shelton (SHELTON, H. & Mitarb., 1960) zurück, allerdings wurde für diese Arbeit eine Weiterentwicklung von Stübig (STÜBIG, 1999) verwendet. Es handelt sich hierbei um ein kleines zylindrisches Reservoir, in das Staub eingefüllt wird. Das Reservoir wird nun auf ein elektrisches Potential gelegt, so daß die Staubteilchen sich elektrostatisch aufladen, maximal bis zum Potential des Reservoirs. Einige mm über dem Staub befindet sich in der Zylinderachse des Reservoirs eine Wolframnadel, welche gegenüber der Reservoirwand elektrisch isoliert ist. Diese Nadel kann nun auf Bruchteile des Potentials der Reservoirwand gepulst werden. Bei geeigneter Einstellung der Pulshöhe und -dauer wird dadurch der Staub im Reservoir aufgewirbelt. Trifft nun ein Teilchen auf die Spitze der Nadel, so erhält es hier seine endgültige Ladung. Aufgrund des geringen Durchmessers der Nadelspitze (ca. $50 \mu\text{m}$) herrschen hier sehr hohe Feldstärken, so daß das aufgeladene Teilchen von der Spitze zum Blendensystem, welches auf der Bezugsmasse der Beschleunigungsstrecke liegt, beschleunigt wird und dadurch in das Strahlrohr gelangt. Hier wird das Teilchen noch mit einer Fokussiereinheit in den Strahlgang geführt.

2.5 Der Ladungssensitive Detektor

Der ladungssensitive Detektor (LSD) wurde von Herrn Siegfried Auer entwickelt, um die Teilchendetektion am Heidelberger Staubbeschleuniger zu unterstützen. Es handelt sich dabei im Prinzip um ein normales Influenzröhrchen, welches allerdings gegenüber äußerer Störungen besonders gut abgeschirmt wurde. Zur Zeit werden Staubteilchen mit normalen Influenzröhrchen (die geladenen Partikel erzeugen beim Durchflug durch die Röhrchen eine Influenzladung entsprechend ihrer eigenen Ladung) detektiert und durch eine Auswahleinheit (particle selection unit, PSU) selektiert. Diese Methode ist allerdings bei sehr kleinen Ladungen ungenau, da die Influenzröhrchen ein starkes Untergrundrauschen aufweisen. Der LSD sollte die Nachweisschwelle für schwache Ladungen senken.

Der LSD besteht aus einem 28 cm langen Influenzröhrchen aus Messing mit einem Durchmesser von 1 cm. Dieses wird von 2 Messingröhren mit Längen von 31 beziehungsweise 34 cm von äußeren Störungen abgeschirmt. An den offenen Enden der Röhren wird die Öffnung durch ein Stahlnetz gegen elektromagnetische Einflüsse abgeschirmt. Die Röhren

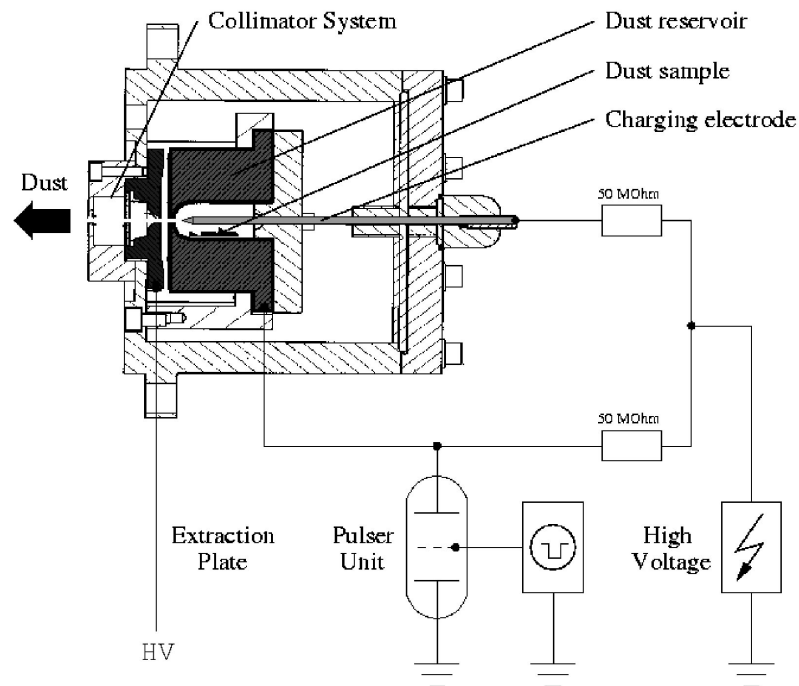


Abbildung 2.6: Schematischer Aufbau der Staubquelle nach Stübig

liegen auf gleichem Potential, elektrisch isoliert. Die Influenzladung wird in Bezug zum Röhrenpotential gemessen. Dieser Aufbau ist in einem Vakuumrohr untergebracht. Damit die Signalweitergabe gegen äußere Störungen besser abgeschirmt ist, müssen die Leitungen zur Signalverarbeitung möglichst kurz sein. Daher ist ein Teil der Verstärkungseinheiten in die beiden Abschirmrohre eingebettet. So wirken sich Störungen erst auf das schon verstärkte Signal aus. Die erste Vorverstärkung wird durch einen Feldeffekttransistor direkt am Influenzröhrchen vorgenommen, also innerhalb beider Abschirmrohre. Die eigentliche Verstärkung entsteht in Verstärkereinheiten zwischen den beiden Abschirmrohren, während ein Endverstärker in einer Einheit außerhalb des Vakuumrohrs dem Signal die endgültige Amplitude gibt (siehe Abb. 2.5).

Das Signal, das ein Teilchen auslöst, wenn es in den LSD eintritt, wird in der zweiten Verstärkereinheit (also zwischen den beiden Abschirmrohren) in zwei verschiedene Kanäle getrennt. Einerseits wird das Signal nun direkt in den Differenzverstärker (MAX 435) geleitet. Dieses Signal bildet den ladungsunempfindlicheren Kanal (Lowsense). Andererseits wird das Signal in einem zweiten Kanal durch einen weiteren Operationsverstärker geleitet, der das Signal verstärkt, so daß dieser Kanal ladungsempfindlicher ist (Highsense). Nun wird auch der Highsense in einen weiteren Differenzverstärker geleitet. Ein- und Ausgangssignal der Differenzverstärker stehen über die folgende Gleichung in Beziehung:

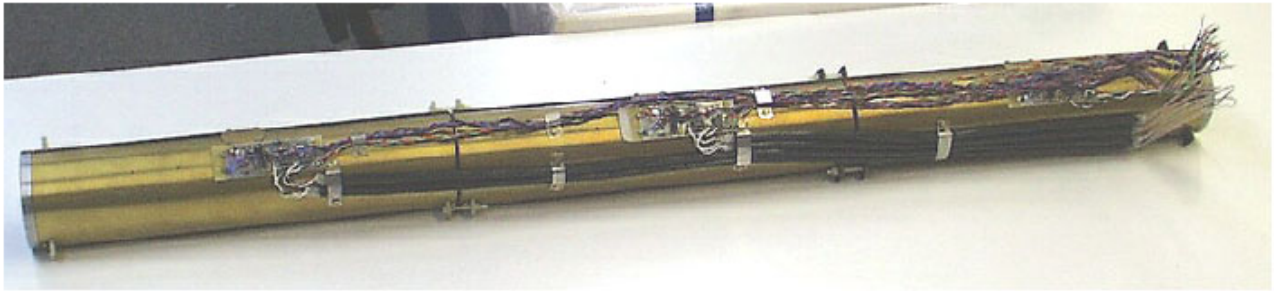


Abbildung 2.7: Aufnahme des großen LSD mit 3 Influenzröhrchen ohne Vakuumrohr

$$U_{aus} = K \cdot \frac{Z_L}{Z_T} \cdot U_{ein} , \quad (2.4)$$

wobei Z_L die Ausgangsimpedanz und Z_T die Eingangsimpedanz des Differenzverstärkers ist, während K ein vom Differenzverstärker vorgegebener Wert (für den verwendeten Differenzverstärker OP 435 beträgt $K=16$ (HO, 2000)). Der Grund für die Aufteilung des Signals liegt darin begründet, daß der Highsense sehr schnell in Sättigung geht und dadurch nur kleinste Ladungen (10^{-17} bis 10^{-15} C) exakt gemessen würden. Da aber der LSD dafür konzipiert wurde, eventuell einmal die Influenzröhrchen, die die PSU unterstützen, zu ersetzen, sollte er einen größeren dynamischen Bereich haben. Mit Hilfe des Lowsense kann der LSD Ladungen bis zu 10^{-12} C bestimmen. Das Verhältnis der Verstärkung der beiden Kanäle kann aus den elektronischen Daten errechnet werden. Man kann hier eine Testeingangsspannung festlegen und die Ausgangsspannung der beiden Kanäle errechnen.

So errechnet sich das Verhältnis zu 182. Das heißt, die Signalverstärkung des Highsense ist 182fach höher, als im Lowsense.

Zur Verfügung standen 2 einzelne LSDs, sowie eine Einheit aus 3 hintereinander gesetzten LSDs. Hierbei sind 3 LSDs in einem einzigen langen Vakuumrohr untergebracht (siehe Abb. 2.7). Die Elektronik ist an jedem einzelnen LSD direkt angebracht, die Signale werden dann im Endverstärker gesammelt. Die 3 High- und die 3 Lowsenskanäle werden durch die gleiche Spannung versorgt. Der Hintergrund hierfür ist, daß dieser dreifache LSD die Influenzröhrchen der PSU ersetzen sollte: der erste LSD gibt ein Startsignal, der dritte ein Stoppsignal, während der zweite eine separate Ladungsmessung ermöglicht.

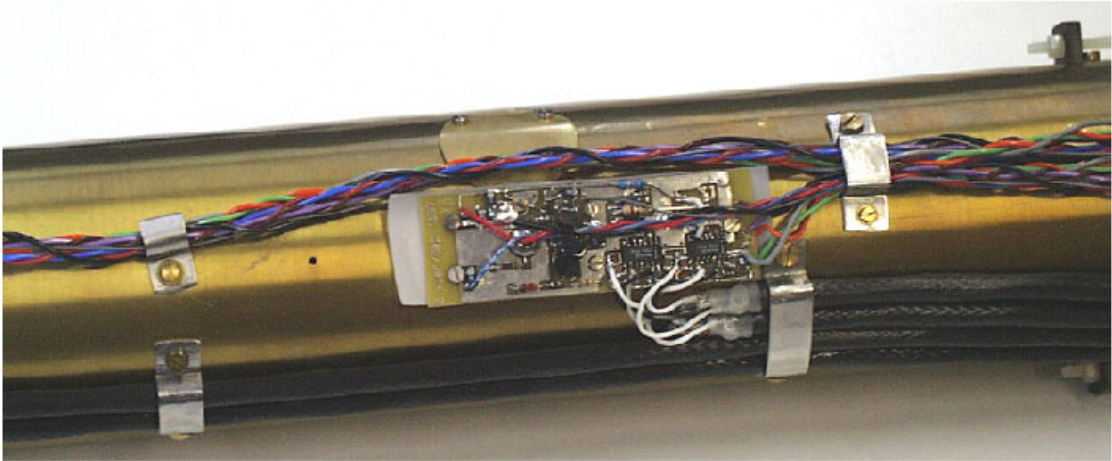


Abbildung 2.8: Aufnahme der Elektronik des LSD

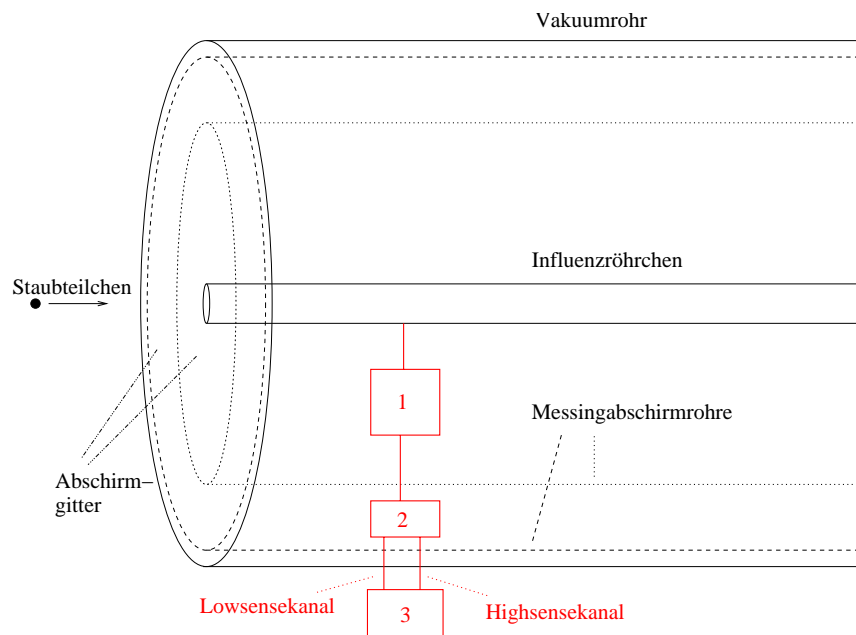


Abbildung 2.9: Schematischer Aufbau des LSD. Die mit 1 und 2 bezeichneten Kästchen stellen die Verstärkungseinheiten im Inneren des Vakuumrohres dar. Das mit 3 bezeichnete Kästchen stellt den Nachverstärker für die beiden Kanäle dar.

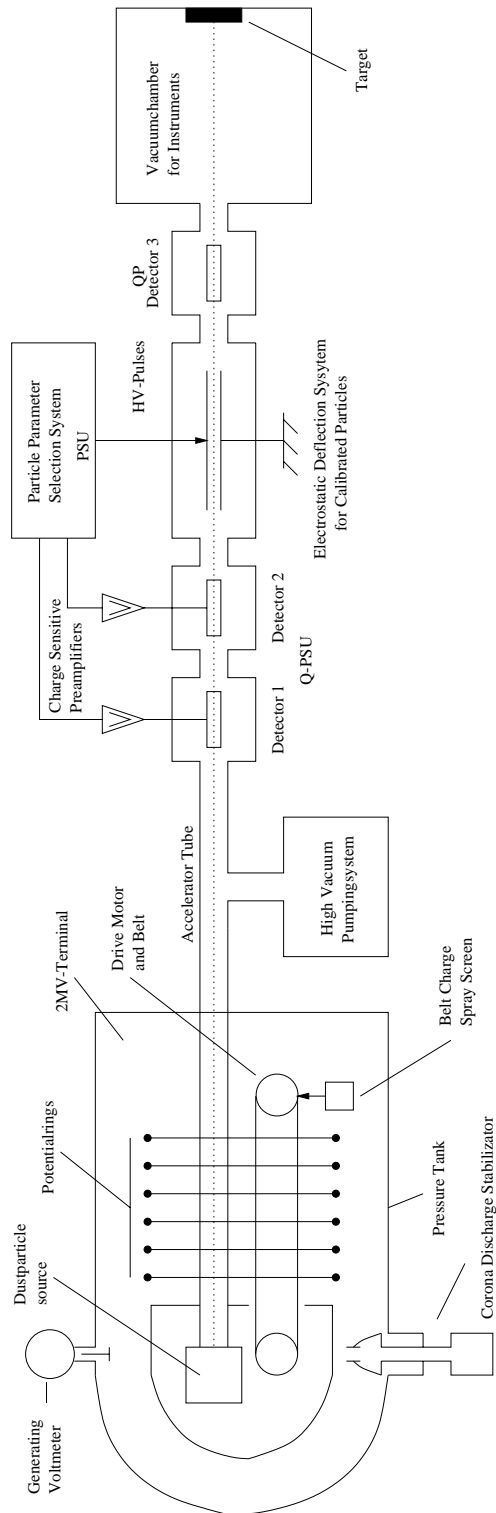


Abbildung 2.10: Der 2MV Beschleuniger

Kapitel 3

Messungen

3.1 Der ladungssensitive Detektor (LSD)

Ein Ziel dieser Arbeit war, den ladungssensitiven Detektor (LSD) als Ladungs- und Geschwindigkeitsmesser für die Teilchenauswahleinheit PSU zu implementieren. Hierzu mußte zunächst dessen Unversehrtheit festgestellt werden und später der Detektor kalibriert werden. Untersucht wurden hierbei zwei einzelne LSDs, sowie eine Dreierkombination: 3 hintereinanderfolgende LSDs, die in einem Rohr angebracht waren. Letztere sollte dann als verlässliche Möglichkeit der Ladungs- und Geschwindigkeitsmessung für die weiteren Messungen verwandt werden.

3.1.1 Test der LSDs

Da die Dreierkombination bisher nie im Einsatz war, mußte zunächst festgestellt werden, ob sie, aber auch die anderen Detektoren, überhaupt funktionstüchtig waren. Am Einfachsten wäre dies indem man die Detektoren elektrisch testet. Dies ist jedoch aufgrund des komplexen Aufbaus der Detektoren nicht möglich gewesen. Daher sollten die Detektoren getestet werden, indem Testteilchen hineingeschossen wurden. Hierzu wurden die Detektoren am Teststand montiert. Als Testteilchen wurden Eisenpartikel geschossen, da dieses Material einfach beschleunigbar und in Referenzdetektoren gut beobachtbar ist. Am Oszillographen wurden dabei sowohl die Signale der beiden Referenzdetektoren (Influenzgitter und Influenzröhrchen), als auch die von High- und Lowsense der LSDs sichtbar gemacht. Bei der Dreierkombination wurden in zwei getrennten Meßreihen zunächst nur die Highsense- und später die Lowsensekanäle untersucht.

Bei den Einzeldetektoren, die schon früher in Betrieb waren, zeigte sich erwartungsgemäß deren Funktionstüchtigkeit. Anders dagegen bei der Dreierkombination: Der Highsense von Detektoreinheit 1, sowie der Lowsense von Detektoreinheit 3 zeigten keinerlei wie auch immer geartetes Signal, während beide Kanäle von Detektoreinheit 2 nur ein sehr schwaches Signal (ca. halbe Signalthöhe gegenüber Detektoreinheit 1 und 3) zeigten.

Bei der genaueren Untersuchung der Kombination konnte lediglich der vermeintliche Grund für das fehlende Highsense Signal von Kanal 1 festgestellt werden: ein Kabel, das

sich gelöst hatte. Weiterhin wurde bemerkt, daß sich die Isolation der Leitungen sich beim Öffnen des Detektors abschabt. Ansonsten konnten die Gründe für die fehlenden oder zu schwachen Signale nicht gefunden werden.

Nach erfolgter Kontrolle der Elektronik wurde die Kombination wieder auf obige Weise getestet, allerdings konnte keine Veränderung festgestellt werden, so daß zunächst statt der Kombination die Einzeldetektoren für die weiteren Messungen verwendet wurden.

3.1.2 Kalibration

Aus Verfügbarkeitsgründen der Flugersatzeinheit von CDA wurde zunächst einer der Einzeldetektoren für die Messungen verwendet, um erst hinterher kalibriert zu werden. Zur Kalibration wurde, diesmal am 2MV Beschleuniger, Eisenstaub geschossen. Die Signale des LSD, sowie eines Referenzdetektors QD wurden ausgemessen. QD besteht aus einem Influenzröhrchens, dessen Signal mit Hilfe eines Ladungsverstärkers ($1V \hat{=} 3 \cdot 10^{-13}C$) als Spannung dargestellt wurde. Hiermit soll sowohl eine Kalibration der Geschwindigkeits-, als auch der Ladungsmessung geschehen. Zur Kalibration wird die Signalzeit und die Signalhöhe des LSD über die des QD aufgetragen, wobei ein linearer Zusammenhang erwartet wird.

Ergebnisse der Kalibration des LSD

Bei den Messungen zur Kalibration des LSD fiel auf, daß der Lowsensekanal an verschiedenen Tagen verschiedene Signalamplituden bei gleicher Eingangsladung zeigte. Als Ursache wurde hierbei festgestellt, daß der Verstärkungsfaktor des LSD vom Ladezustand der verwendeten Akkus abhängig war. Sowohl bei dem Lowsensekanal (siehe Abb. 3.1.2), als auch, in geringerem Maß bei dem Highsensekanal (hier tritt noch das zusätzliche Problem auf, daß bei Verwendung des Netzgerätes sämtliche Werte des Highsensekanals in Sättigung waren) sind deutliche Unterschiede im Verhältnis zwischen Ausgangsamplitude und Amplitude des Vergleichsdetektors feststellbar. Der wichtigste Unterschied hierbei ist die Steigung der linearen Regressionskurve in Abb. 3.1.2, die eigentlich aufgrund der Linearität des Verstärkers konstant sein sollte. Einen Offset hätte man noch aufgrund der angelegten Betriebsspannungen erklären und im Zweifelsfall dank eines Korrekturfaktors herauszurechnen können. Jedoch verbietet diese Abweichung der Ausgangsamplituden eine Verwendung des LSD für Ladungsmessungen, wenn die angelegte Spannung nicht konstant gehalten wird. Möglichkeiten hierfür wären z.B. größere Batterien mit größerer Kapazität und Konstanz oder dauerhaft Netzspannung zu verwenden. Allerdings würde man bei letzterer Möglichkeit ein erhöhtes Untergrundrauschen in Kauf nehmen müssen (50 Hz-Brummen).

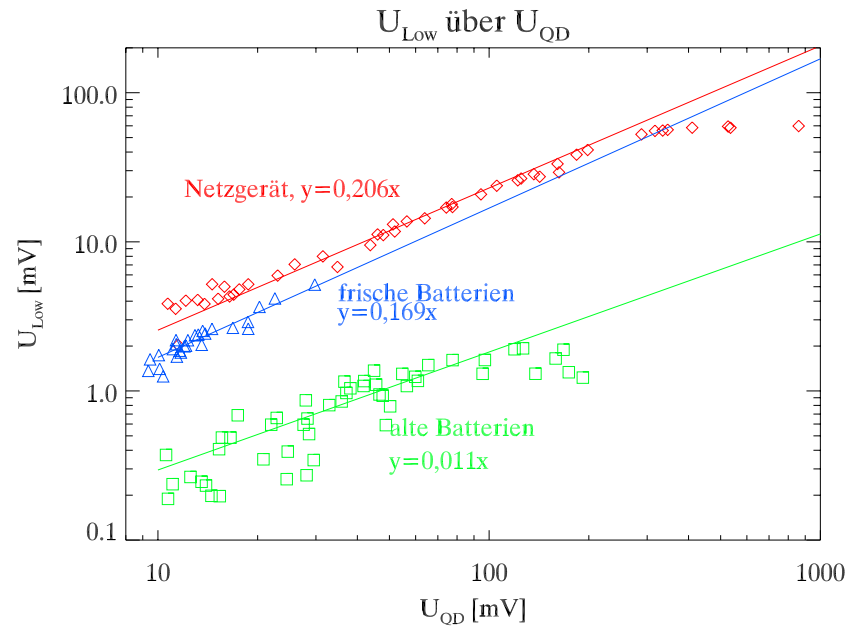


Abbildung 3.1: Vergleich der Ausgangsamplituden der Lowsensekanäle bei verschiedenen Betriebsarten

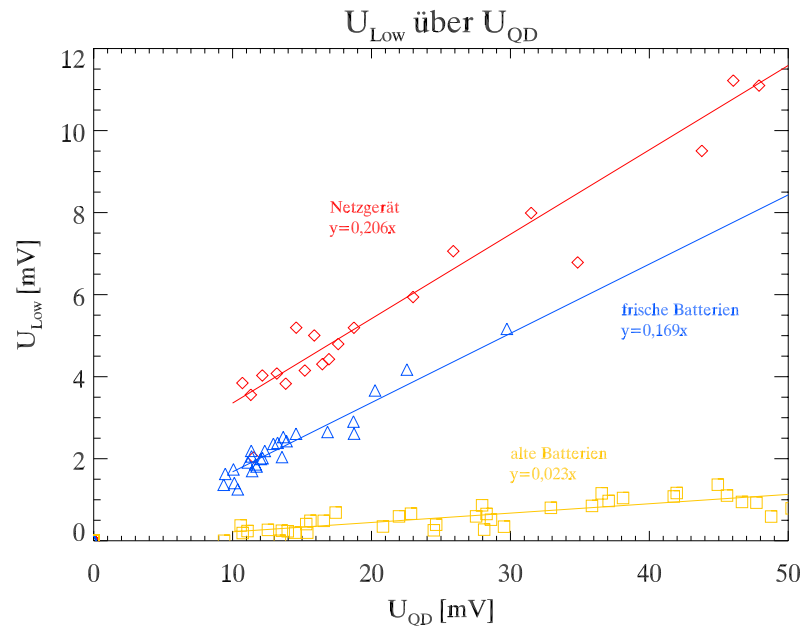


Abbildung 3.2: Vergleich der Ausgangsamplituden der Lowsensekanäle bei verschiedenen Betriebsarten im niedrigen QD-Bereich

3.2 Vorbereitende Messungen an Projektilmaterialien

Zur Bestimmung, welches Material am Beschleuniger zur Kalibration von CDA eingesetzt werden sollte, wurden am Teststand zunächst die vorhandenen Materialien untersucht. Es handelt sich hierbei um Materialien, die zunächst aufgrund ihrer Eigenschaften sehr vielversprechend erschienen. Die Kriterien waren hierbei sowohl kleinste Teilchengrößen (kleiner als $1 \mu\text{m}$ um ein möglichst gutes Ladungs/Masse - Verhältnis zu bekommen, als auch die Möglichkeit, die Teilchen gut aufzuladen. Weiterhin sollten es, wenn möglich, "neue" Materialien sein, die bisher noch nicht mit dem Staubbeschleuniger geschossen wurden. Ausgiebig untersucht wurden zum Beispiel schon Eisen, Kohlenstoff oder Aluminium, in letzter Zeit wurde auch Latex untersucht.

3.2.1 Messung des spezifischen Widerstandes

Die Materialien wurden zunächst einer Widerstandsmessung unterzogen, um festzustellen wie gut sie aufladbar sein würden (siehe auch (STÜBIG, 1999)). Hierzu wurde das Material in eine nichtleitende Plexiglasröhre gegeben. Ein Messingstempel drückt das Material dann auf eine Messingplatte. Hierbei sorgen 2 Federn, die den Stempel halten, für gleichmäßigen Druck. Der elektrische Widerstand der Staubsäule wird nun gemessen. Interessant war hier allerdings nur die Einteilung in Leiter und Nichtleiter, da die Materialien zunächst nur einer Eignungsprüfung unterzogen werden sollten.

3.2.2 Aufwirbelungsversuche

Im Anschluß an die Widerstandsmessungen sollte nun noch festgestellt werden, ob die Materialien sich in der Staubquelle aufwirbeln lassen. Hierzu wurde eine leitende Pfanne (\varnothing ca 20 mm) in einen Glaskolben eingesetzt. Direkt über der Pfanne wurde ein Gitter frei aufgehängt. Zwischen Gitter und Pfanne wird nun eine gepulste Hochspannung (20 kV) angelegt, analog zur der Staubquelle. Da Pfanne und Gitter bis zu 20 kV Potential hatten, sollte aufgewirbeltes Material in Richtung eines auf Erdpotential gehaltenen Ringes, welcher mit Aluminiumfolie bespannt war, beschleunigt werden. Die einzelnen Materialien wurden also in die Pfanne gegeben und sollten, bei Eignung des Materials, aufgewirbelt werden. Beobachtet wurde hierbei sowohl optisch die aufgewirbelte Wolke, als auch nach Beendigung des Versuchs, ob die Pfanne leer war. Ein weiteres Indiz für die Eignung des Materials war ein Staubfleck auf der Aluminiumfolie.

3.2.3 Staubmaterialien

Wismuth

Ein großer Hoffnungsträger waren Teilchen aus dem Metall Wismuth mit einem Einzelteilchenradius von ca 20 nm. Dieses wurde mir, wie auch vie-

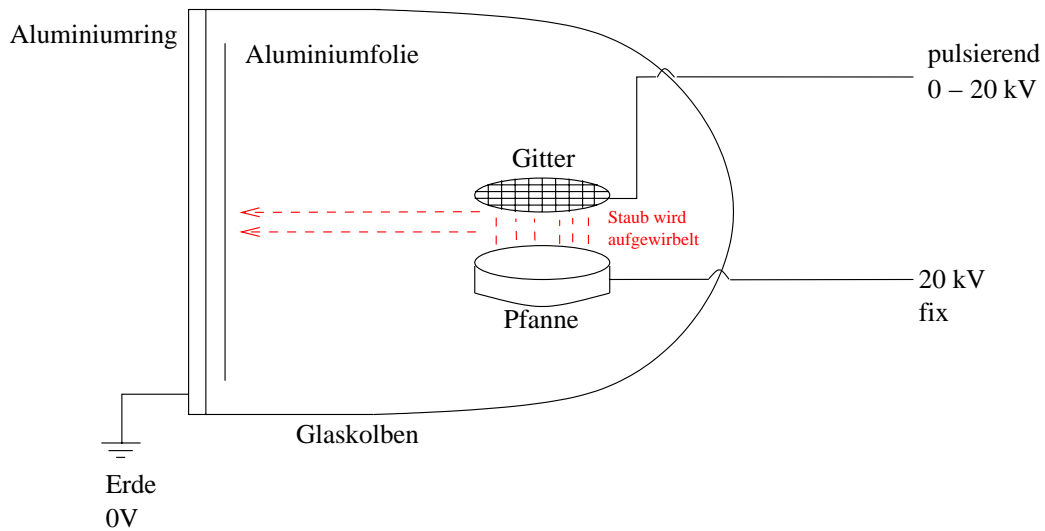


Abbildung 3.3: Schematischer Aufbau des Aufwirbelungsversuchs

le der folgenden Materialien, von der Arbeitsgruppe 'Particle Technology' (http://www.rereth.ethz.ch/mavt/verfahrenstechnik/pratsinis.proj_overview.html) von Professor Pratsinis an der ETH Zürich, Schweiz, zur Verfügung gestellt. Besonders interessant ist dieses Material, da es aufgrund seiner Erzeugung durch Flammensynthese (KAMMLER, H. K. & Mitarb., 2001) aus durch Agglomeration erzeugten Partikeln besteht. Dadurch entstehen aus den Einzelteilchen größere Partikel. Diese sind daher von der Struktur her sehr ähnlich zu den Teilchen aus Experimenten zur Teilchenagglomeration (BLUM & Mitarb., 2000), wie man aus der Abbildung 3.4 (Elektronenmikroskopaufnahmen, die von der Arbeitsgruppe von Professor Pratsinis zur Verfügung gestellt wurden) entnehmen kann. Diese Experimente dienen dazu, die Planetenentstehung besser zu verstehen. Die Untersuchungen dort ergaben, daß sich Teilchen bei der Agglomeration nicht so zusammenfügen, daß ein möglichst kompaktes Gebilde entsteht. Statt dessen ergeben sich offene, selbstähnliche Gebilde. Hierdurch entsteht ein fraktales Gebilde mit einer Dimension von 1.8 bis 2.1 (BLUM & Mitarb., 2000). Durch diese Ähnlichkeit sollten die Wismuthteilchen gut Teilchen simulieren können, wie sie durch Aggregation entstehen können, sogenannte 'fluffy particles'. Weiterhin sollte Wismuth als Metall eine hohe Ladungsträgerdichte aufweisen. Da aber Wismuth mit 209 amu ein sehr schweres Element ist, muß die Teilchengröße entsprechend niedrig sein, um hohe Geschwindigkeiten zu erreichen. Hier kommt aber das Problem der Teilchendetektion ins Spiel. In der Tat zeigte sich Wismuth sowohl bei den Widerstandsmessungen, als auch bei den Aufwirbelversuchen als geeignet, jedoch konnten leider keine Teilchen detektiert werden, weder am Teststand, noch am 2 MV Beschleuniger (hier wurden die Wismuthprojekteile auf einen Blindflansch geschossen, wobei sie zunächst den QD Detektor und danach den LSD durchflogen). Dies kann daran liegen, daß die Teilchen durch die angelegte Spannung nicht stark genug beschleunigt werden. Bei einer Feldstärke von $10^{10} \frac{V}{m}$ entsteht Feldionenemission. Man kann

berechnen, welche Ladung dies für ein Wismutteilchen bedeutet, welche Maximalladung also ein Wismutteilchen haben kann. Die Feldstärke E eines Teilchens berechnet sich nach

$$E = \frac{1}{4 \cdot \pi \varepsilon_o} \cdot \frac{q}{r^2} \quad (3.1)$$

$$\Rightarrow q = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_o \cdot r^2 \cdot E \quad (3.2)$$

mit der Dielektrizitätskonstanten ε_o , der Ladung q und dem Radius r des Teilchens. Aus dieser Formel ergibt sich für ein Wismutteilchen mit einem Durchmesser von 20 nm eine Ladung von $1.1 \cdot 10^{-16}$ C. Man kann nun berechnen, welche Maximalmasse m ein Teilchen haben muß, um es mit der Beschleunigungsspannung U von 2 MV auf mindestens $v=3$ km/s zu beschleunigen:

$$q \cdot U = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (3.3)$$

$$\Rightarrow m = \frac{2 \cdot q \cdot U}{v^2} \quad (3.4)$$

Damit ergibt sich eine Maximalmasse von $4.9 \cdot 10^{-17}$ kg. Andererseits kann man die Masse eines Einzelteilchens mit einem Durchmesser von 20 nm zu $4.1 \cdot 10^{20}$ kg berechnen ($m = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$). Daraus folgt, daß nicht nur Einzelteilchen, sondern sogar Agglomerate von bis zu 1000 Einzelteilchen zumindest auf eine Geschwindigkeit von 3 km/s beschleunigt werden können. Einzelne Teilchen hätte man sogar auf eine Geschwindigkeit $v = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m}}$ von ca. 100 km/s beschleunigen können. Der wahrscheinlichere Grund dafür, daß keine Teilchen detektiert werden konnten ist, daß die Agglomerate durch Ihre Ladung zerrissen werden. Man kann aus der oben berechneten Ladung q und dem Radius der Teilchen $r = 10$ nm die Kraft F berechnen, die auf zwei einzelne Kügelchen, welche sich gerade eben nicht mehr berühren, wirkt, unter der vereinfachenden Annahme, daß beide Teilchen dieselbe Ladung $q_1 = q_2$ besitzen:

$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \varepsilon_o} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{(2 \cdot r)^2} \quad (3.5)$$

Mit dieser Formel errechnet sich die abstoßende Kraft zu $2.72 \cdot 10^{-7}$ N. Man kann diesen Wert vergleichen mit den Werten, welche in den Experimenten von Heim (HEIM & Mitarb., 1999) für die Kraft, welche benötigt wird, um aggregierte Siliziumteilchen voneinander zu lösen, gefunden wurden. In diesen Experimenten wurden zwar deutlich größere Teilchen untersucht, jedoch wurde dabei eine Abhängigkeit von der Teilchengröße entdeckt, so daß man die Kraft, welche auf Siliziumteilchen mit einem Radius von 10 nm wirken würde, extrapolieren kann. Dieser würde bei ca. 10^{-9} N liegen. Obwohl diese Kräfte für Silizium- und Wismuthpartikel sicherlich verschieden ist, so ist doch die abstoßende Kraft etwa 100 mal größer, als gebraucht würde, um ein vergleichbares Siliziumteilchen auseinanderzureissen. Daher liegt es im Bereich des Wahrscheinlichen, daß die Wismutteilchen tatsächlich bei Erhalt ihrer endgültigen Ladung zerrissen werden. Ihre endgültige Ladung bekommen die

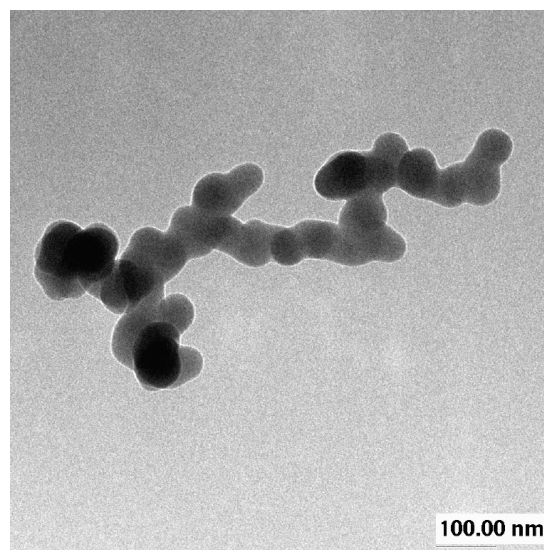
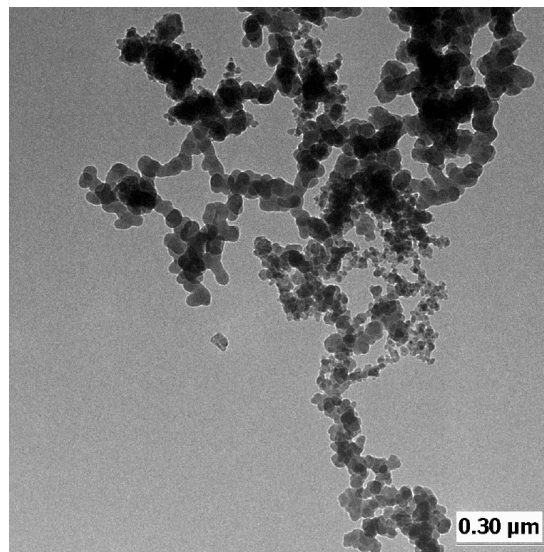


Abbildung 3.4: Aufnahmen von Wismutteilchen.

Oben: ein großes Teilchen, der Maßstab ist durch den kleinen Balken in der rechten unteren Ecke gegeben, er entspricht 300 nm.

Unten: Teilchen in dieser Größe hätten die gewünschten hohen Geschwindigkeiten erreicht. Der kleine Balken in der rechten unteren Ecke entspricht hier 100 nm

Projektilen erst an der Nadelspitze, so daß, wenn sie dort zerrissen werden, es nicht mehr möglich ist, sie zu fokussieren.

Eisenoxid mit Silizium

Eines der Ziele dieser Arbeit war auch Silizium zu detektieren, daher war ein Auswahlkriterium für die Materialien das Vorhandensein von Silizium. Dieses Material, welches auch aus Zürich stammt, war zwar nicht sehr leitfähig, sollte aber aufgrund seiner sehr geringen Austrittsarbeit leicht ionisiert werden können. Es handelt sich hierbei um FeO_x , welches auf Siliziumkerne aufgetragen wurde. In der Tat zeigte sich bei den Aufwirbelungsversuchen, daß sich FeO_x gut aufwirbeln läßt. Allerdings setzte sich das Material sofort am Gitter ab. Dieses würde in der Staubquelle bedeuten, daß es sich an der Nadel absetzt, wo es als Isolator fungieren würde und ein Beschleunigen unmöglich machen würde.

Siliziumdioxid mit Ruß

Bei diesem, wieder aus Zürich stammenden, Material, sollte versucht werden, SiO_2 dadurch beschleunigbar zu machen, daß man Ruß (Kohlenstoff) beimengt. Die Idee hierbei ist, daß die Rußteilchen, die aufladbar sind, die Ladungsträger für beide Komponenten bereitstellen. Nachdem allerdings sowohl die Widerstandsmessung, als auch der Aufwirbelungsversuch keine positiven Ergebnisse lieferten, wurde dem Material noch Eisen beigemischt.

Siliziumdioxid mit Ruß und Eisen

Durch die Beimischung von Eisen (eine Mischung von Staub, welcher von der Firma Goodfellow geliefert wurde und Teilchen, die von der Firma BASF geliefert wurden mit Korngrößen zwischen $0.1 \mu\text{m}$ und $3.0 \mu\text{m}$) sollten weitere Ladungsträger in das Gemisch gebracht werden. Hierbei liegt die Idee zugrunde, daß die beschleunigten Eisenteilchen die SiO_2 -Teilchen mitreißen und dadurch bei deren Beschleunigung helfen.

Titandioxid

Als letztes Material aus Zürich stand TiO_2 zur Verfügung. Dieses Material wurde aufgrund seiner geringen Austrittsarbeit und aufgrund dessen, daß Ti auch eines der bisher nicht beschleunigten Elemente ist, ausgesucht. Trotz des sehr hohen Widerstandes ließ sich das Material erstaunlicherweise aufwirbeln, allerdings setzte sich das Material sofort am Gitter ab, genauso wie das FeO_x .

Latex

Dieses Material wurde von Prof. Armes aus Sussex geliefert (LASCELLES, S.F & ARMES, S.P., 1997). Es handelt sich hierbei um polypyrrolbeschichtetes Latex (Polystyren) mit einer Korngröße von 100 nm. Durch die Beschichtung wird das Material leitfähig gemacht. Ähnliches Material, nur mit einer Korngröße von 750 beziehungsweise 1600 nm wurde am Beschleuniger schon erfolgreich verwendet (STÜBIG, 2002). Daher wurde, damit an Material gespart werden konnte, auf Versuche am Teststand verzichtet. Dieses Material

wurde verwendet, da man bei der geringen Korngröße auf hohe Geschwindigkeiten hoffen konnte, welche bisher bei organischen Projektilmaterialien nicht erreicht wurden.

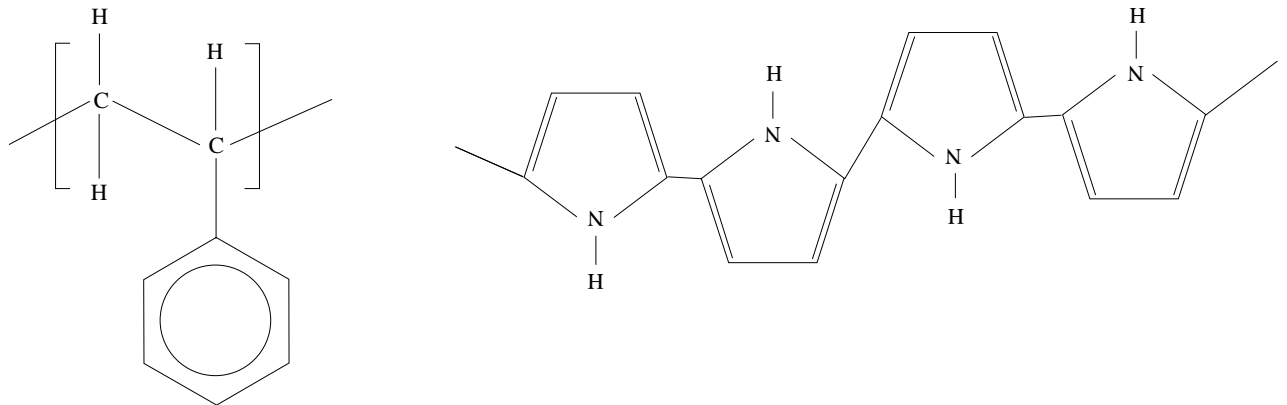


Abbildung 3.5:

links: Chemische Zusammensetzung von Latex (Polystyren)

rechts: Chemische Zusammensetzung von Polypyrrol

Latex mit Silizium

Bei diesem Material, welches ebenfalls aus Sussex stammt, handelt es sich wieder um Polypyrrol, in welches allerdings Silizium eingebettet wurde. Dabei wurden kleinste Siliziumteilchen (\varnothing 20 nm) in die größeren Polypyrrolteilchen (\varnothing 80 nm) eingebettet. Dadurch konnte gewährleistet werden, daß das Material beschleunigbar sein würde. Gleichzeitig konnten bei der Einschlagsionisation die eingefügten Siliziumteilchen freigesetzt und detektiert werden. Bei diesem Material wurden 5.24 % Stickstoff detektiert, daraus schließt man, daß es zu 33.8 % aus Polypyrrol besteht. Hieraus folgt, daß die restlichen 66.2 % aus Silizium bestehen (IDDON, 2001). Daher sollte hier Silizium gut nachweisbar sein. Auch hier wurden, aufgrund der Knappheit des Materials und der sehr großen Aussicht auf Erfolg, auf Versuche am Teststand verzichtet.

Aluminium

Dieses Material wurde zwar schon geschossen (STÜBIG, 2002), jedoch soll es noch einmal verwendet werden, um möglichst hohe Geschwindigkeiten zu erreichen. Außerdem eignet sich dieses Material, da es schon verwendet wurde und dadurch seine Eigenschaften bekannt

Material	Motivation für die Auswahl	spezifischer Widerstand	Aufwirbelung
Bi	sehr kleiner Radius Metall	mittel	gut
FeO _x /Si	geringe Austrittsarbeit	hoch	alles auf einmal setzt sich ab
SiO ₂ /Ruß	Ruß als Ladungsträger	sehr hoch	nein
SiO ₂ /Ruß/Fe	Fe als weiterer Ladungsträger	hoch	gut
TiO ₂	geringe Austrittsarbeit	sehr hoch	gut, setzt sich ab
Fe/Si	gute Möglichkeit für Si		gut, setzt sich ab

Tabelle 3.1: Übersicht über die verschiedenen aus Zürich gelieferten Materialien, welche allerdings nicht für den 2 MV Beschleuniger geeignet waren

sind, den LSD zu kalibrieren. Es handelt sich hierbei um Aluminiumkügelchen mit einem Durchmesser zwischen 500 nm und 5 μm , welche von den Eckard-Werken geliefert wurden. Das Maximum der Korngrößenverteilung liegt bei diesem Material bei 750 nm.

3.3 Messungen am Teststand

Bei den Versuchen am Teststand zeigte sich zunächst, daß einige Materialien ungeeignet sind, entweder weil sie nicht aufwirbelbar sind, oder weil sie sich an der Nadel absetzen würden und dort als Isolator fungieren. Nachdem zwei Materialien, welche auf Grund ihrer geringen Austrittsarbeit ausgewählt wurden, sich zwar aufwirbeln lassen, sich dann aber auf der Nadel absetzen, scheint es so, als ob dieses Phänomen wirklich aufgrund der Austrittsarbeit entsteht. Weitere Untersuchungen wären hierzu allerdings angebracht, zum Beispiel Versuche, ob mechanische oder elektrische Kräfte das Absetzen bewirken.

Als Materialien für die weiteren Versuche wurden Wismuth, Latex, Latex mit Silizium, sowie Aluminium festgelegt. Bei Letzterem handelt es sich um schon verwendetes Material (STÜBIG, 2002), das im Rahmen dieser Arbeit allerdings zur Erzeugung von Spektren durch Höchstgeschwindigkeitseinschläge verwendet werden sollte.

3.4 Messungen mit dem Cosmic Dust Analyzer (CDA)

Mit ausgesuchten Materialien (siehe 3.2, also Latex, Latex mit Silizium und Aluminium) wurde am 2MV Beschleuniger das CAT des CDA beschossen.

3.4.1 Messmethode

Zunächst wurde CDA im Vakuumtank auf einen Schwenktisch eingebaut. Hierzu muß die Vakuumkammer auf Normaldruck gebracht werden. Damit danach trotzdem das gewünschte Vakuum erzielt werden kann, wird nach dem ersten Abpumpen auf 10^{-5} mbar die Vakuumkammer auf 50 Grad Celsius aufgeheizt. Dies ist nötig, da CDA sich vorher unter Normaldruck befand, so daß sich Verunreinigungen an seiner Oberfläche absetzen konnten, die durch die höhere Temperatur besser von der Oberfläche abgelöst werden können. Nach dem Ausheizen und weiterem Abpumpen kann so der Vakuumdruck bis auf 10^{-7} mbar gebracht werden. Zwar würde ein Druck von 10^{-6} mbar schon zum Betrieb des Staubbeschleunigers genügen, jedoch benötigt CDA, um den sicheren Betrieb des Multipliers zu gewährleisten, einen Vakuumdruck von minimal 10^{-7} . Das jeweilige Projektilmaterial wurde in verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen gemessen. Hierzu wurde in der PSU für die Geschwindigkeit anstelle eines Bereichs lediglich ein Minimalwert angegeben, da zufällig auftretende Teilchen mit besonders hohen Geschwindigkeiten nicht verworfen werden sollten. Berücksichtigt wurden nur Teilchen, die auf der Flugsoftware des CDA einen Einschlag anzeigten. Dies wurde festgestellt, indem der Zähler der Flugsoftware, der angibt, ob ein Teilchen ein Spektrum hinterlassen hat, beobachtet wurde und die Zeiten zu denen er hochzählte notiert wurden. Es wurden dann Durchflugzeit t und Spannungsanstieg ΔU während des Fluges durch das Strahlrohr zunächst am LSD, sowie später an QD (siehe Kapitel 3.1.2) gemessen. Aus der Durchflugzeit t kann später die Geschwindigkeit v nach

$$v = \frac{x}{t}, \quad (3.6)$$

mit $x=30$ cm (für den LSD), beziehungsweise $x=8$ cm (für QD) die Länge des Detektors, berechnet werden. Ebenso kann man aus dem Spannungsanstieg ΔU die Ladung des Teilchens berechnen (siehe auch Kapitel 2.2). Hier sollte eigentlich bevorzugt der LSD zum Einsatz kommen, da dessen Ladungsmessung dank der beiden unterschiedlichen Kanäle sehr viel genauer sein sollte, jedoch zeigte sich bei der Kalibration des LSD, daß die Ladungsmessung aufgrund der Probleme mit den Batteriespannungen (siehe Kapitel 3.1.2) nicht übernommen werden kann. Daher wurde die Ladung q nur über QD berechnet nach:

$$q = 3,3 \cdot 10^{-13} \frac{C}{V} \cdot \Delta U \quad (3.7)$$

Der Faktor $3,3 \cdot 10^{-13} \frac{C}{V}$ ist der Verstärkungsfaktor für QD. Nun kann man aus diesen berechneten Werten über den Energieerhaltungssatz, sowie der Beschleunigungsspannung U_B von 2 MV noch die Masse m des Teilchens berechnen:

$$q \cdot U_B = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (3.8)$$

$$\Rightarrow m = \frac{2q \cdot U_B}{v^2} \quad (3.9)$$

Kennt man zusätzlich die Dichte ρ des Materials, so ist es einfach, den Radius r des Teilchens zu bestimmen, wenn man ein kugelförmiges Teilchen annimmt:

$$m = \rho \cdot V_{Kugel}$$

$$= \rho \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \quad (3.10)$$

$$\Rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi\rho} \cdot m} \quad (3.11)$$

Dank einer Zeitkorrelation konnten später Spektren und notierte Werte in Verbindung gebracht werden, so daß sicher war, welchem Signal welche Geschwindigkeit, Ladung, Masse und Radius des Projektils zuzuordnen ist.

3.4.2 Schüsse mit Aluminium

Die Messungen beschränken sich auf Versuche, möglichst schnelle Teilchen zu messen, da bereits zuvor Aluminium schon gemessen wurde (STÜBIG, 2002). Hierbei wurden Projektilgeschwindigkeiten von 20 - 50 km/s erzielt.

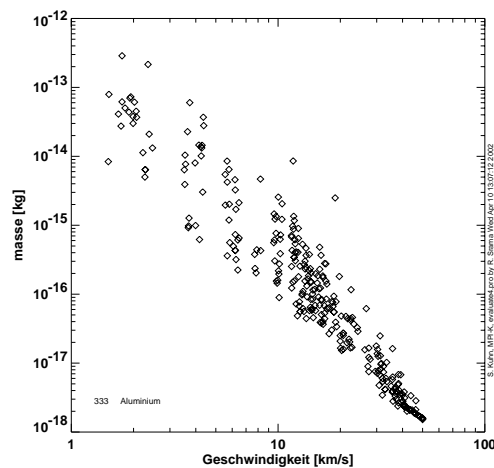


Abbildung 3.6: Massenverteilung der geschossenen Aluminiumteilchen, hierbei wurden auch die vom M. Stübiger (STÜBIG, 2002) gemessenen Teilchen einbezogen

3.4.3 Schüsse mit Latex

Auch hier ging es vor allem um schnellste Teilchen, da auch bereits mit Latex geschossen wurde, wenn auch mit größeren Teilchen. Daher wurde erwartet, deutlich höhere Geschwindigkeiten zu erzielen. Weiterhin sollten aufgrund der chemischen Zusammensetzung (siehe Abb. 3.5) Kohlenwasserstoffe (zB C_2H_3) und Kohlenstoffcluster zu sehen sein (STÜBIG, 2002), ebenso wie Stickstoffverbindungen durch die Beschichtung (siehe Abb. 3.5, rechts). Dabei konnten Projektilgeschwindigkeiten von 5 - 32 km/s erzielt werden.

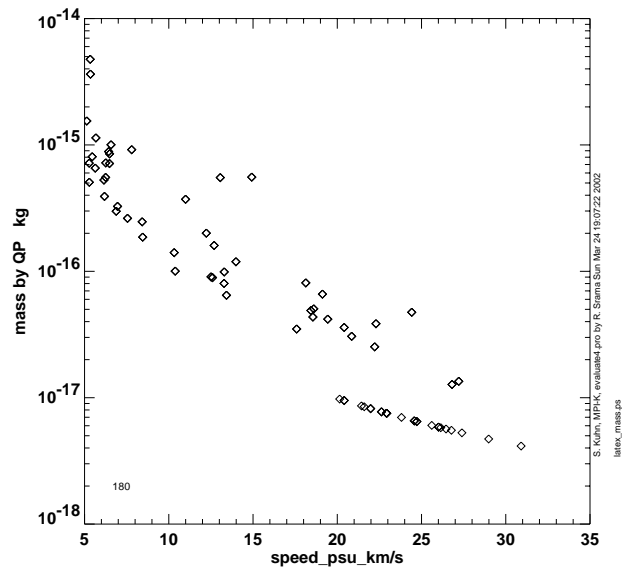


Abbildung 3.7: Massenverteilung der geschossenen Latexteilchen. Die auffällige Linie zwischen 20 und 30 km/s ergibt sich durch die untere Nachweisgrenze, hier wurde als Ladung für QP $9.9 \cdot 10^{-16}$ C angenommen.

3.4.4 Schüsse mit Latex mit Silizium

Bei diesem Material sollte zwar auch der hohe Geschwindigkeitsbereich, so möglich, ausgemessen werden, jedoch ging es in erster Linie darum, überhaupt Spektren zu bekommen, die Silizium-Massenlinien zeigen, da dieses Material bisher noch nicht im Labor eingesetzt werden konnte.

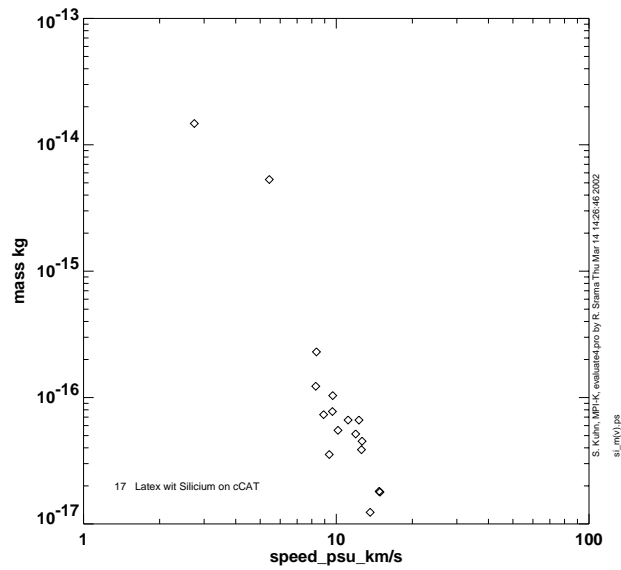


Abbildung 3.8: Massenverteilung der geschossenen Latex/Siliziumteilchen

Kapitel 4

Ergebnisse der Messungen mit CDA

In diesem Abschnitt sollen, nach geschossenen Materialien sortiert, die Ergebnisse präsentiert werden, die mit dem Central Analyzer Target (CAT) des CDA erzielt wurden.

4.1 Latex

Mit Polystyren konnten 81 Spektren im Geschwindigkeitsbereich von 5 bis 25 km/s aufgenommen werden (die Abbildungen 4.1 und 4.1 zeigen einige repräsentative Spektren). Gut zu erkennen in den meisten dieser Spektren sind vor allem die Wasserstoff-, die Kohlenstoff-, die Natrium- und die Rhodiummassenlinie. Die Massenskala wurde hierbei auf die Spitzen von zwei Massenlinien, die gut zu erkennen waren, angepaßt und danach mit weiteren Linien verifiziert. Dies ist vor allem möglich dank der Software von R. Srama, mit welcher man das Spektrum vergrößern kann und sich dann im Detail die angefittete Massenskala anschauen kann. Mit dieser Methode wurden auch die verschiedenen Massenlinien identifiziert. Als solche Kalibrationslinien wurden vor allem Wasserstoff, Kohlenstoff, Natrium und Rhodium verwendet. Rhodium wird in den Spektren hierbei als Targetmaterial erwartet, während Natrium (und auch Kalium) als Kontamination im Labor fast immer zu sehen sind. Weiterhin wurden in den Spektren bei 24, 36 und 115 amu Massenlinien beobachtet. Man sollte allerdings dabei beachten, daß diese Massenskala nicht sehr genau ist. Aufgrund der Linienbreite und -form gibt es bei der Massenskalaanlegung Fehler von circa 0.5 amu bei kleinen Massen und von bis zu 4 amu bei hohen Massen. Hierdurch ist eine Zuordnung zu einzelnen Massen sehr schwierig (als Beispiel: eine Linie bei 23.5 ± 0.8 amu kann sowohl Natrium (23 amu), als auch C_2 zugeordnet werden).

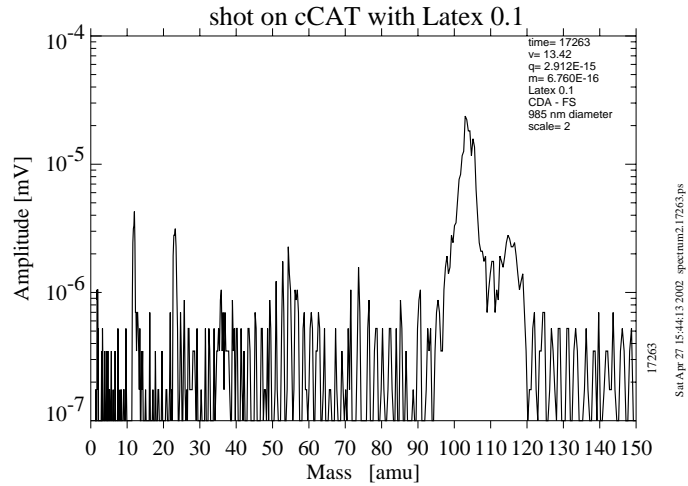


Abbildung 4.1: Spektrum eines Latexteilchens, welches mit einer Geschwindigkeit von 13 km/s auf das zentrale Rhodiumtarget geschossen wurde. Man erkennt die Kohlenstoff-, Natrium- und Rhodiumlinien. Außerdem ist die Linie bei 115 amu zu sehen.

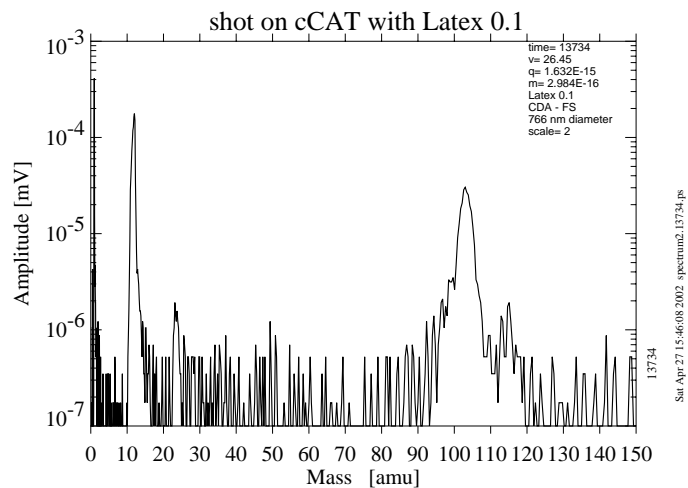


Abbildung 4.2: Spektrum eines Latexteilchens, welches mit einer Geschwindigkeit von 26 km/s auf das zentrale Rhodiumtarget geschossen wurde. Hier ist die Wasserstofflinie zu sehen. Die Kohlenstofflinie ist ausgeprägter, während die Linie bei 115 amu schwächer wird.

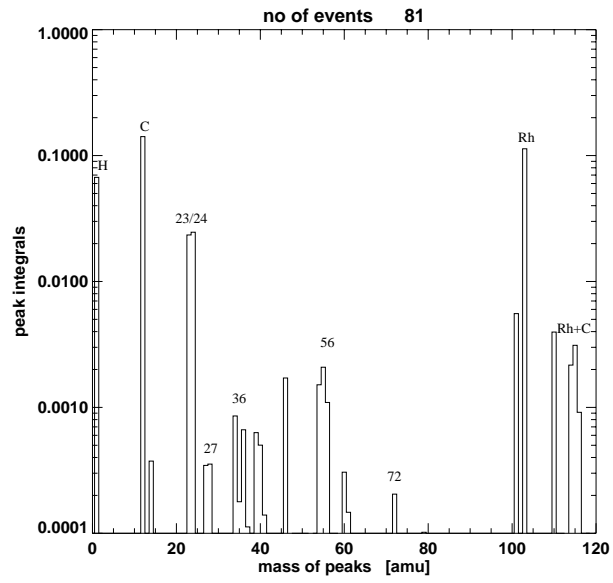


Abbildung 4.3: Die Integrale der verschiedenen Massenlinien der 81 Spektren aufsummiert

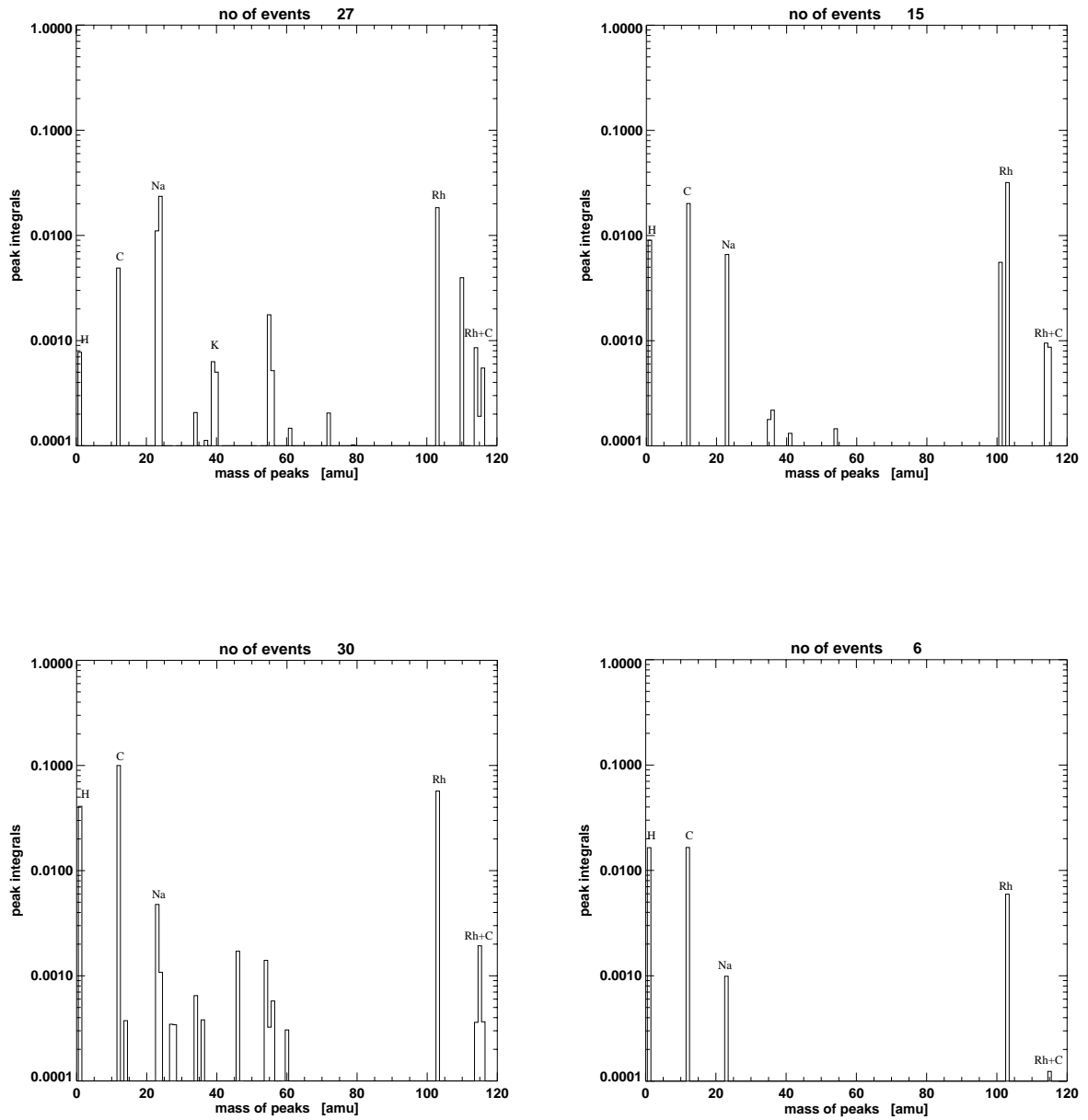


Abbildung 4.4: Geschwindigkeitsvariation der Linienintegrale (die Integrale sind nicht normiert, daher kann man hier nur die relative Änderung der Linien untersuchen) , oben links: Teilchen mit Geschwindigkeiten von 6 - 14 km/s, oben rechts: 16 - 20 km/s, unten links: 20 - 25 km/s, unten rechts 25 - 30 km/s

Das Integral einer Masselinie ist ein Wert für die Ionenausbeute bei dieser Masse. Die Summation der Integrale der einzelnen Masselinien aller Spektren ist daher ein Wert für das Vorkommen einzelner Ionensorten. Für Latex sieht man in dieser Summation (Abb. 4.3) deutlich das Vorkommen von Wasserstoff, Kohlenstoff, Natrium und Rhodium. Etwas schwächer ausgeprägt sind Masselinien, bei 14, 27, 36 amu, sowie eine Linie bei 56 amu, zu sehen. Diese werden jeweils Stickstoff, C_2H_3 , und einem Kohlenstoffcluster zugeordnet. Allerdings ist die Stickstofflinie mit Vorsicht zu behandeln, da diese nur bei einem Spektrum auftritt und hier dafür keine Kohlenstofflinie auftritt. Es kann sich hierbei um eine unsauber angelegte Massenskala oder eine Verschiebung der Kohlenstofflinie handeln. C_2H_3 hingegen ist eine Verbindung, welche bereits bei anderen Tests mit dem Heidelberger 2MV Beschleuniger detektiert wurde (KNABE, 1983). Auch in anderen Arbeiten (KISSEL, J. & KRUEGER, F. R., 1987) tritt diese Verbindung als Kontamination auf. Bei weiteren Messungen mit dem 2MV Beschleuniger (POSNER, 1995) wurde diese Masselinie als Aluminiumejekta aus der Quellenwand interpretiert, jedoch ist in diesem Fall aufgrund der Zusammensetzung der Partikel eine C_2H_3 Verbindung wahrscheinlicher. Auch dank der geringen Ionisationsenergie (9.45 eV) und der Stabilität der Verbindung liegt es daher durchaus im Bereich des Möglichen, daß dieses Molekül als Bestandteil der Projektile nachgewiesen werden konnte.

Wenn man nun diese Summation der Integrale der einzelnen Masselinien nicht für alle erhaltenen Spektren darstellt, sondern nach der Geschwindigkeit der Projektile sortiert, so kann man Rückschlüsse über das Verhalten der Masselinien der einzelnen Ionen bei verschiedenen Geschwindigkeiten gewinnen (siehe Abb. 4.4). Da diese Summationen aus technischen Gründen noch nicht auf die Anzahl der verwendeten Spektren pro Geschwindigkeitsabschnitt normiert wurde, sind aus dieser Darstellung nur Tendenzen der Stärke der Masselinien in Bezug zueinander zu erkennen. Man erkennt zum Beispiel sehr deutlich, daß die Wasserstofflinie im Verhältnis zu den anderen Masselinien mit steigender Geschwindigkeit anwächst. Ebenso erkennt man, in den ersten drei Geschwindigkeitsabschnitten, daß die Kontamination durch Natrium bei steigender Geschwindigkeit unbedeutender wird. Verwirrend dagegen ist, daß die Natriummassenlinie im Geschwindigkeitsbereich von 25 bis 30 km/s wieder stark zunimmt. Ebenso ist die starke Masselinie bei 115 amu, welche einem Rhodium-Kohlenstoff Cluster zugeordnet wurde, in diesem Geschwindigkeitsbereich sehr unglaubwürdig, da eigentlich bei größeren Anfangsenergien zu erwarten wäre, daß dieses Cluster mehr und mehr auseinandergerissen würde. Da allerdings in diesem Bereich nur sechs Spektren zur Verfügung standen, kann dieses seltsame Verhalten eventuell auf statistische Schwankungen zurückgeführt werden.

Interessant ist allerdings nicht nur die Ionenausbeute über alle Spektren aufsummiert, sondern die Ionenausbeute, normiert auf die Masse des Teilchens, abhängig von der Geschwindigkeit (siehe Abbildungen 4.5 bis 4.8). Hierbei kann man erkennen, daß die Linien nicht, wie man nach bisherigen Erkenntnissen (GOELLER & GRUEN, 1985) erwarten würde, proportional zu $v^{3.5}$ verlaufen, sondern starke Abweichungen zeigen: Natrium zeigt einen schwächeren Anstieg, proportional zu $v^{2.9}$, während die andern Linien stärkere Anstiege zeigen: Rhodium verhält sich proportional zu $v^{5.9}$, Kohlenstoff zu $v^{8.8}$ und Wasserstoff gar zu $v^{10.3}$. Die Gesamtladung, auf welche sich die bisherigen Messungen (proportional zu $v^{3.5}$

(GOELLER & GRUEN, 1985)) dagegen steigt proportional zu $v^{5.2}$ an (siehe Abb. 4.9), was allerdings im Gegensatz zu bisherigen Messungen steht.

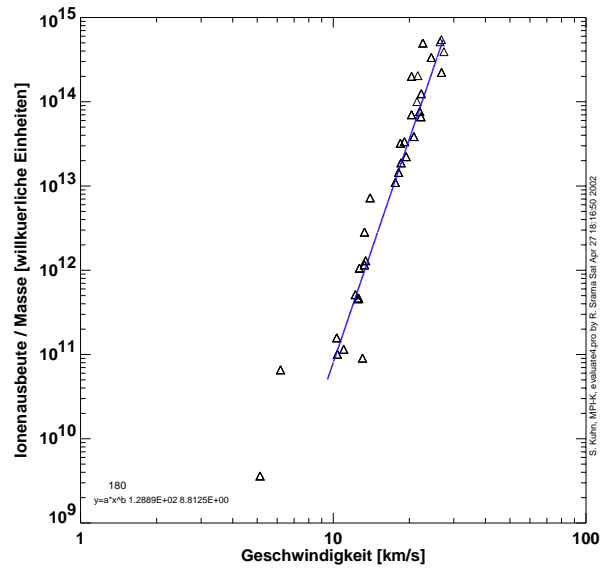


Abbildung 4.5: Ionenausbeute der Kohlenstofflinie bei Latex über Geschwindigkeit aufgetragen, die Ionenausbeute steigt mit $v^{8.8}$ an.

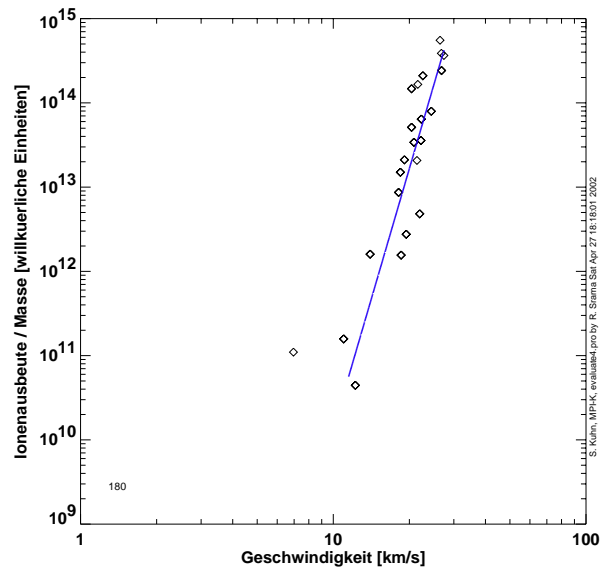


Abbildung 4.6: Ionenausbeute der Wasserstofflinie bei Latex über Geschwindigkeit aufgetragen, die Steigung der Regressionskurve beträgt 10.3.

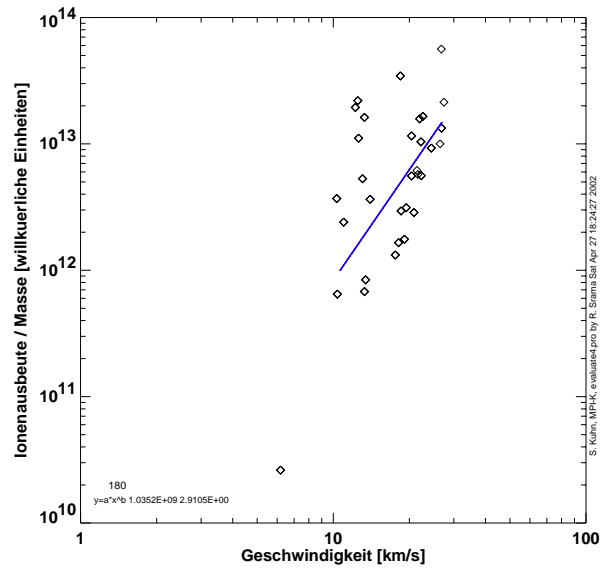


Abbildung 4.7: Ionenausbeute der Natriumlinie bei Latex über Geschwindigkeit aufgetragen, hier steigt die Ionenausbeute nur mit $v^{2.9}$ an.

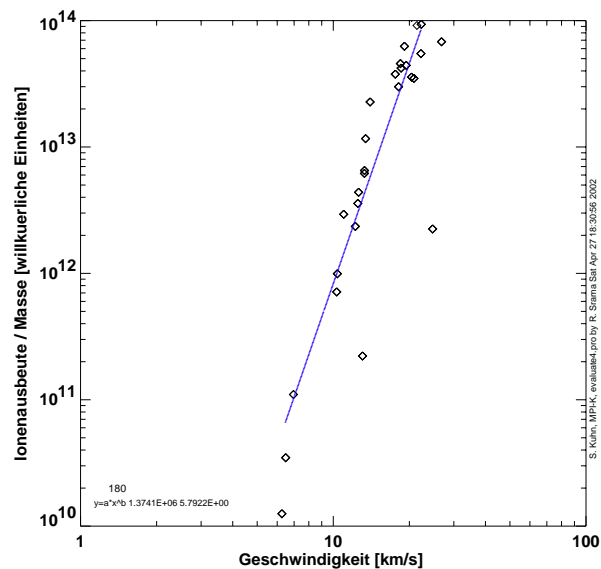


Abbildung 4.8: Ionenausbeute der Rhodiumlinie bei Latex über Geschwindigkeit aufgetragen, die Ionenausbeute steigt proportional zu $v^{5.8}$ an.

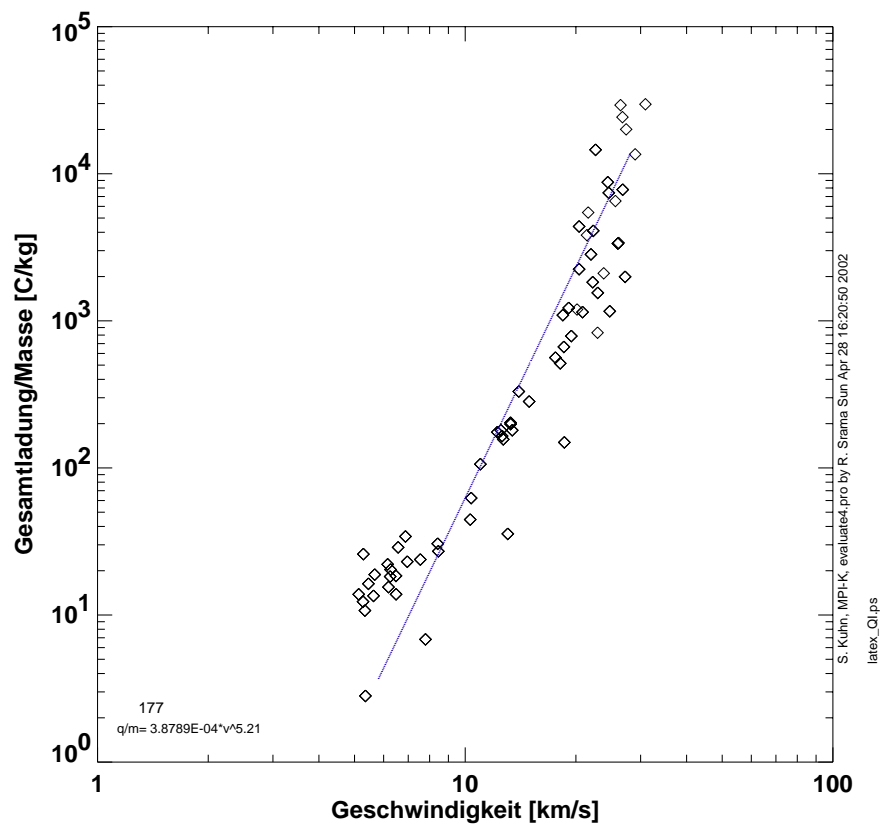


Abbildung 4.9: Gesamtladungsausbeute der geschossenen Latexteilchen über Geschwindigkeit. Die Regressionskurve zeigt, daß die Gesamtladung proportional zu $v^{5.2}$ verläuft.

4.2 Latex mit Silizium

Mit diesem Material konnten leider nur 15 Spektren zwischen 5 und 15 km/s gewonnen werden, da Überschlüge in der Staubquelle weitere Messungen verhinderten (in der Abbildung 4.10 sind zwei dieser Spektren zu sehen). Man erkennt hier in den Spektren starke Natrium- und Kaliumlinien, wie sie auch als Kontamination zu erwarten sind. Ebenso, wie bei den vorangegangenen Spektren ist auch hier, wenn auch schwächer, Kohlenstoff zu sehen. Als Unterschied zu den Latexspektren dagegen ist das Fehlen der Massenlinien bei 24 und 36 amu hervorzuheben. Neu in den Spektren dagegen sind Linien bei 28, 44, 65 und 70 amu. Hier ergab sich mit der Massenskala ein Problem, da diese vor allem bei diesem Material sehr schwer sauber anzulegen war. Daher sind hier Unsicherheiten in der Zuordnung der Massenlinien zu erwarten. Bei 27 amu könnte dies eine C_2H_3 -Massenlinie bedeuten, wie sie auch bei den Latexspektren, wenn auch sehr viel undeutlicher, auftritt. Wahrscheinlicher jedoch ist, daß es sich hierbei doch um eine Siliziummassenlinie handelt, die aufgrund der schwer anzulegenden Massenskala bei etwas zu leichten Massen auftritt. Dies scheint aufgrund der sehr viel stärkeren Massenlinie plausibel (in den Spektren dieses Materials ist die Massenlinie bei 27 amu in der Größenordnung der Kohlenstoffmassenlinie, also etwa um einen Faktor 10^2 größer als in den Spektren mit Polystyren). Außerdem enthält dieses Material kein Polystyren, in dem die Verbindung C_2H_3 vorkommt (siehe Abb. 3.5). Ebenso sollte die Massenlinie bei 11 amu Kohlenstoff sein, welcher wieder aufgrund der Massenlegung etwas zu leicht erscheint. Ansonsten könnte diese Linie höchstens als Na^{2+} erklärt werden. Da hierfür aber eine sehr große Ionisationsenergie (47.3 eV) notwendig wäre und Na^{2+} bisher nie bei Laborversuchen beobachtet wurde, ist Letzteres nicht glaubhaft.

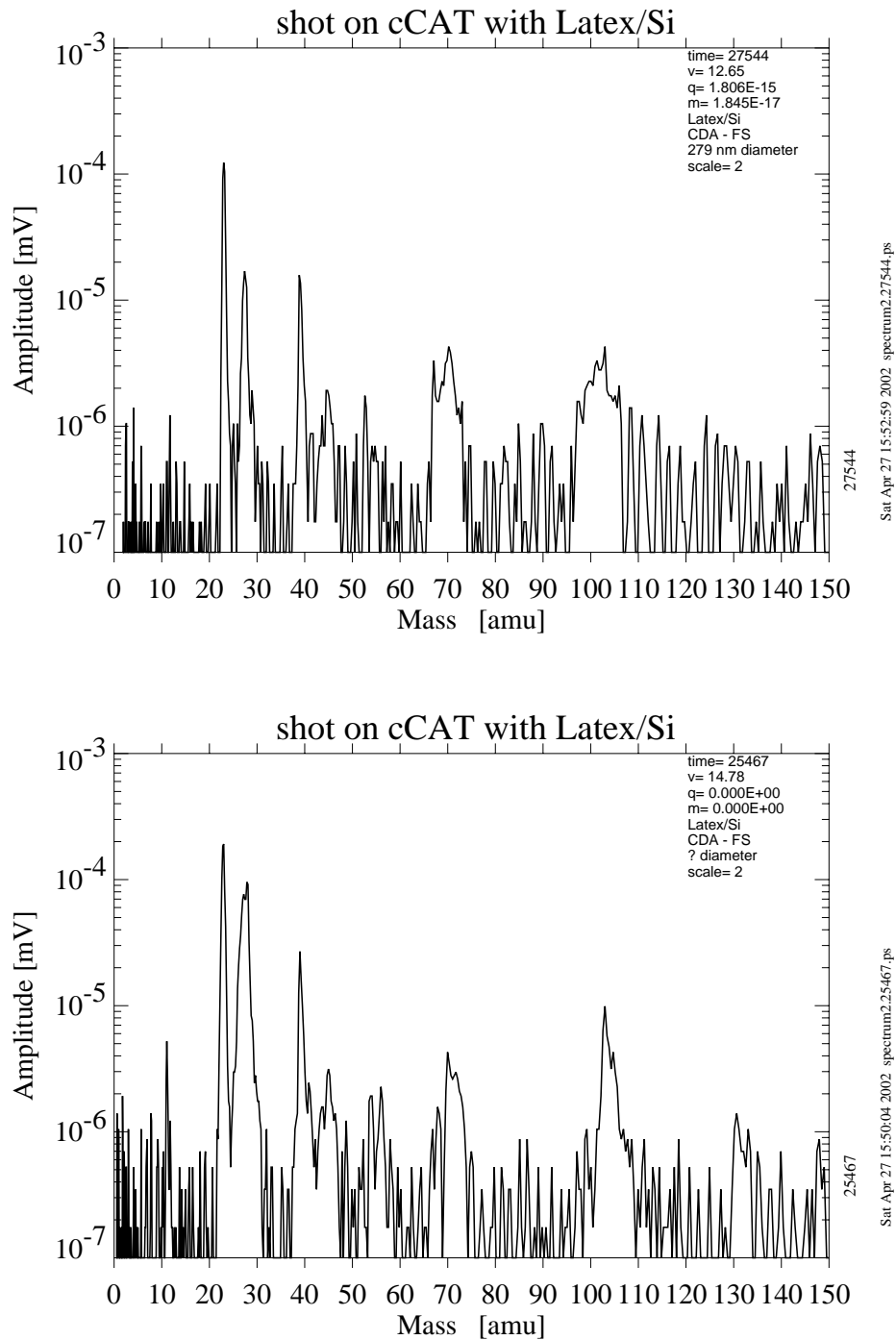


Abbildung 4.10: Spektren von Latex/Siliziumteilchen; oben: ein Latex/Siliziumteilchen, welches mit einer Geschwindigkeit von 12.65 km/s auf das zentrale Rhodiumtarget geschossen wurde. unten: dieses Projektil wurde mit einer Geschwindigkeit von 14.78 km/s auf das zentrale Rhodiumtarget geschossen

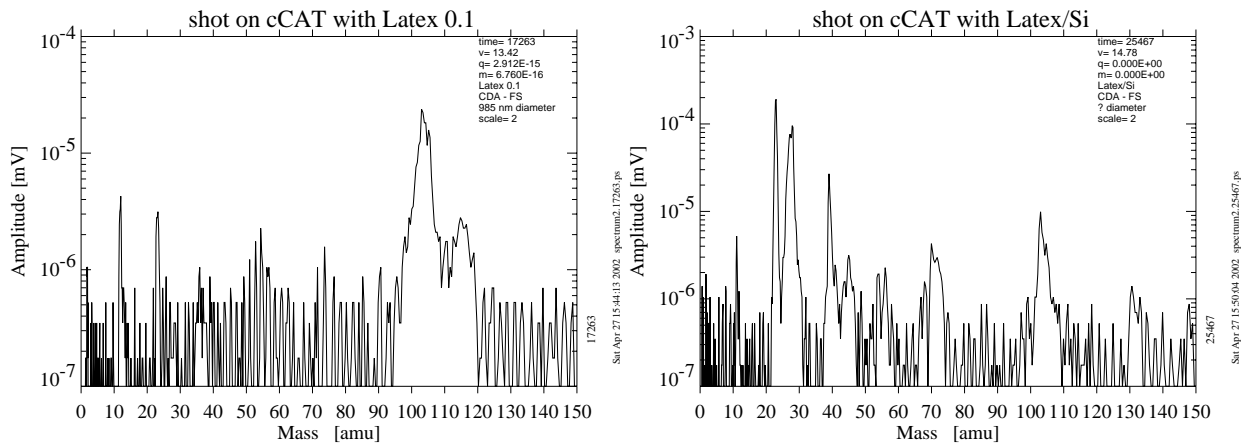


Abbildung 4.11: Vergleich von Spektren, welche von Latexprojektilen (links) und Latexprojektilen mit Silizium (rechts) gewonnen wurden. Man beachte die sehr viel stärkere Massenlinie bei ca. 28 amu im rechten Spektrum, welche Silizium zugeordnet wurde.

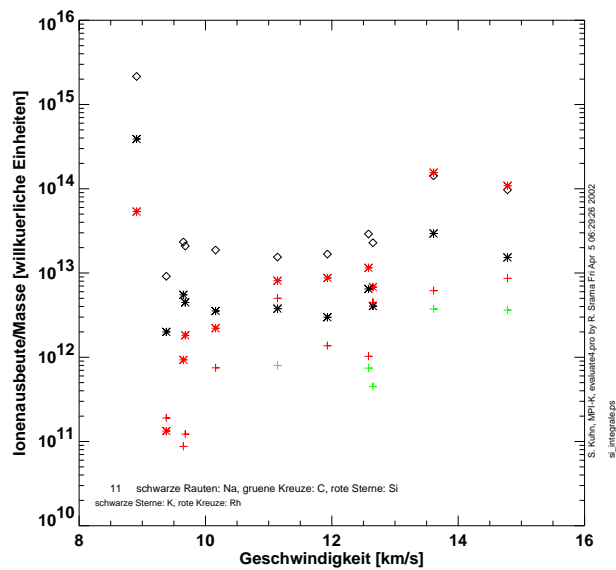


Abbildung 4.12: Ionenausbeute der verschiedenen Massenlinien. Aufgrund der geringen Geschwindigkeitsverteilung ist die Darstellung nur halblogarithmisch. Rauten: Na, helle Kreuze: C, helle Sterne: Si, dunkle Sterne: K, dunkle Kreuze: Rh

4.3 Aluminium

Bei Aluminium wurden Spektren zwischen 25 und 50 km/s aufgenommen (in den Abbildungen 4.13 bis 4.16 sind einige repräsentative Spektren zu sehen). In den Spektren erkennt man gut die Aluminiummassenlinie bei 27 amu, sowie die Rhodiummassenlinie bei 103 amu. Weiterhin kann man sehr gut die Wasserstofflinie, sowie Linien bei ca. 9 amu, ca. 13 amu, sowie 54 amu erkennen. Diesen Linien wurden vorläufig zwei- beziehungsweise dreifach ionisierte Aluminiumionen, beziehungsweise bei 54 amu ein Cluster aus 2 Aluminiumatomen zugeordnet.

Zur Auswertung der Spektren konnten zusätzlich, mit freundlicher Genehmigung von M. Stübig, ein von ihm erhaltener Datensatz, welcher Spektren im Geschwindigkeitsbereich von 5 - 40 km/s enthält, verwendet werden. Bei der Summierung der Integrale der einzelnen Massenlinien fällt auf, daß das Aluminium-Rhodium Cluster so schwache Linien hat, daß es bei der gewählten Auflösung nicht mehr zu sehen ist. Sehr gut zu sehen dagegen ist die besonders starke Massenlinie für Wasserstoff, besonders bemerkenswert, da die Breite der Wasserstofflinien in den Spektren sehr gering ist. Außerdem erkennt man Massenlinien bei 44 und bei 70 amu.

Trennt man auch hier wieder die Summen der Integrale der Massenlinien nach Geschwindigkeitsbereichen (siehe Abb. 4.17), so erkennt man zunächst wieder, daß die Wasserstofflinie mit steigender Geschwindigkeit anwächst, während die Natriummassenlinie im Verhältnis zu den anderen Massenlinien deutlich abnimmt. Man erkennt hier außerdem, daß die Massenlinien bei circa 9, beziehungsweise 13 amu (welche Al^{3+} , beziehungsweise Al^{2+} zugeordnet wurden) erst ab dem zweiten Geschwindigkeitsbereich (16 - 24 km/s) auftauchen - offenbar genügt die zur Verfügung stehende Energie bei geringeren Geschwindigkeiten nicht, diese Ionen herzustellen.

Auch hier ist das Integral der Massenlinien interessant. Man sieht bei dem normierten Integral der Rhodiummassenlinie (Abb. 4.20, oben) eine $v^{6\pm 2}$ - Proportionalität, ähnlich wie bei dem Integral der Rhodiumlinien bei den Latexspektren. Bei den normierten Integralen der Aluminiumlinien (Abb. 4.20, unten) erkennt man zunächst bei Al^+ eine $v^{6.3}$ -Abhängigkeit, allerdings gibt es hier im Geschwindigkeitsbereich zwischen 10 und 25 km/s eine Abflachung, zu einer $v^{2.5}$ -abhängigkeit. Ab circa 25 km/s dagegen steigt die Ionenausbeute wieder stärker an, mit einer $v^{4.9}$ Abhängigkeit. Dieser Effekt läßt sich damit erklären, daß ab ca. 10 km/s die Energie statt für Ionenbildungsprozesse, für Schmelz- beziehungsweise Verdampfungsprozesse verwendet wird (GOELLER & GRUEN, 1985), (EICHORN, 1974). Der Anstieg bei 20 km/s ist damit zu erklären, daß hier die Energie für die Schmelzprozesse im Verhältnis wieder abnimmt. Man erkennt aus Abb. 4.20, daß die Al^{2+} zugeordnete Massenlinie erst bei 10 km/s, die Al^{3+} zugeordnete Massenlinie erst ab 20 km/s erscheint. Dies bedeutet, daß erst ab diesen Geschwindigkeiten genug Energie für die Ionenbildungsprozesse zur Verfügung steht, um Aluminium zweifach (Ionisationsenergie 18.83 eV), beziehungsweise dreifach zu ionisieren (Ionisationsenergie 28.45 eV (STÖCKER, 1994), zum Vergleich: Schmelzenergie für Aluminium (also Energie, die pro Atom benötigt wird um Aluminium von Raumtemperatur aus zum Schmelzen zu bringen): 1.7 eV/Atom, Verdampfungsenergie: 8.9 eV/Atom).

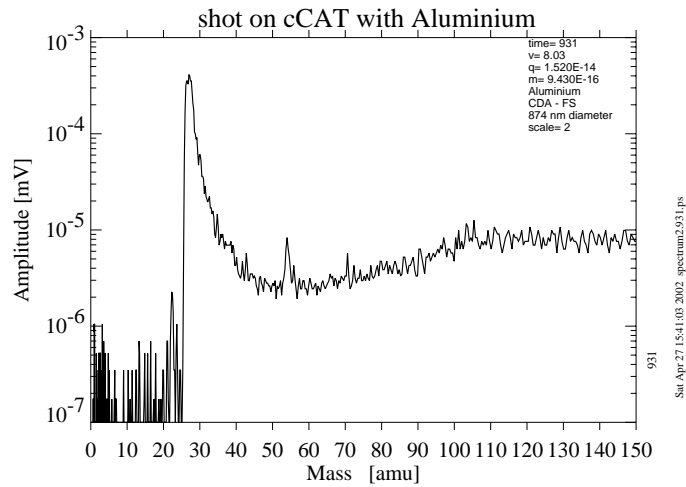


Abbildung 4.13: Spektrum eines Aluminiumteilchens, das mit 8 km/s auf das zentrale Rhodiumtarget geschossen wurde (aufgenommen von M. Stübig). Zu sehen sind sowohl eine starke Aluminiumlinie, sowie eine schwächere Al_2 -linie.

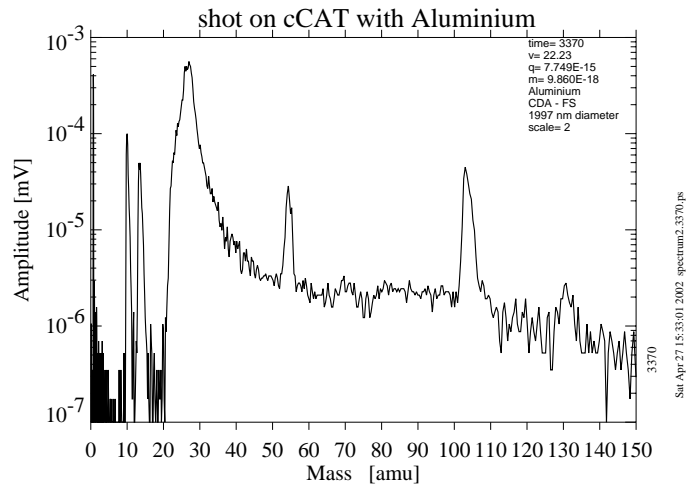


Abbildung 4.14: Spektrum eines Aluminiumteilchens, das mit 22.23 km/s auf das zentrale Rhodiumtarget geschossen wurde. Man erkennt Wasserstoff, Rhodium, Al^{3+} , Al^{2+} , Al^+ , Al_2^+ , sowie zusätzlich noch ein Cluster aus Rhodium und Aluminium.

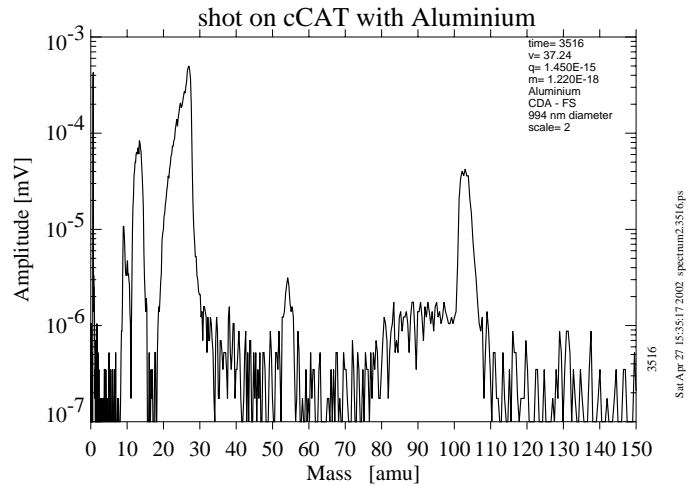


Abbildung 4.15: Spektrum eines Aluminiumteilchens, das mit 37.24 km/s auf das zentrale Rhodiumtarget geschossen wurde. Man beachte, daß das Rhodium-Aluminium-Cluster nicht mehr zu sehen ist.

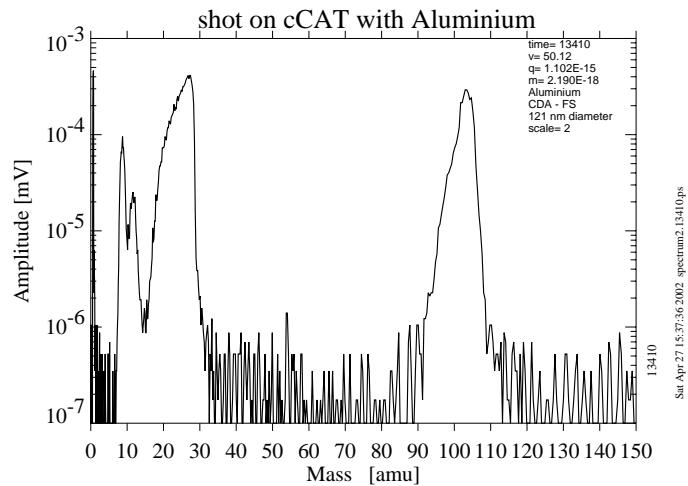


Abbildung 4.16: Spektrum eines Aluminiumteilchens, das mit 50.12 km/s auf das zentrale Rhodiumtarget geschossen wurde. Bei diesem Spektrum ist nun auch die Al_2^+ -Massenlinie verschwunden.

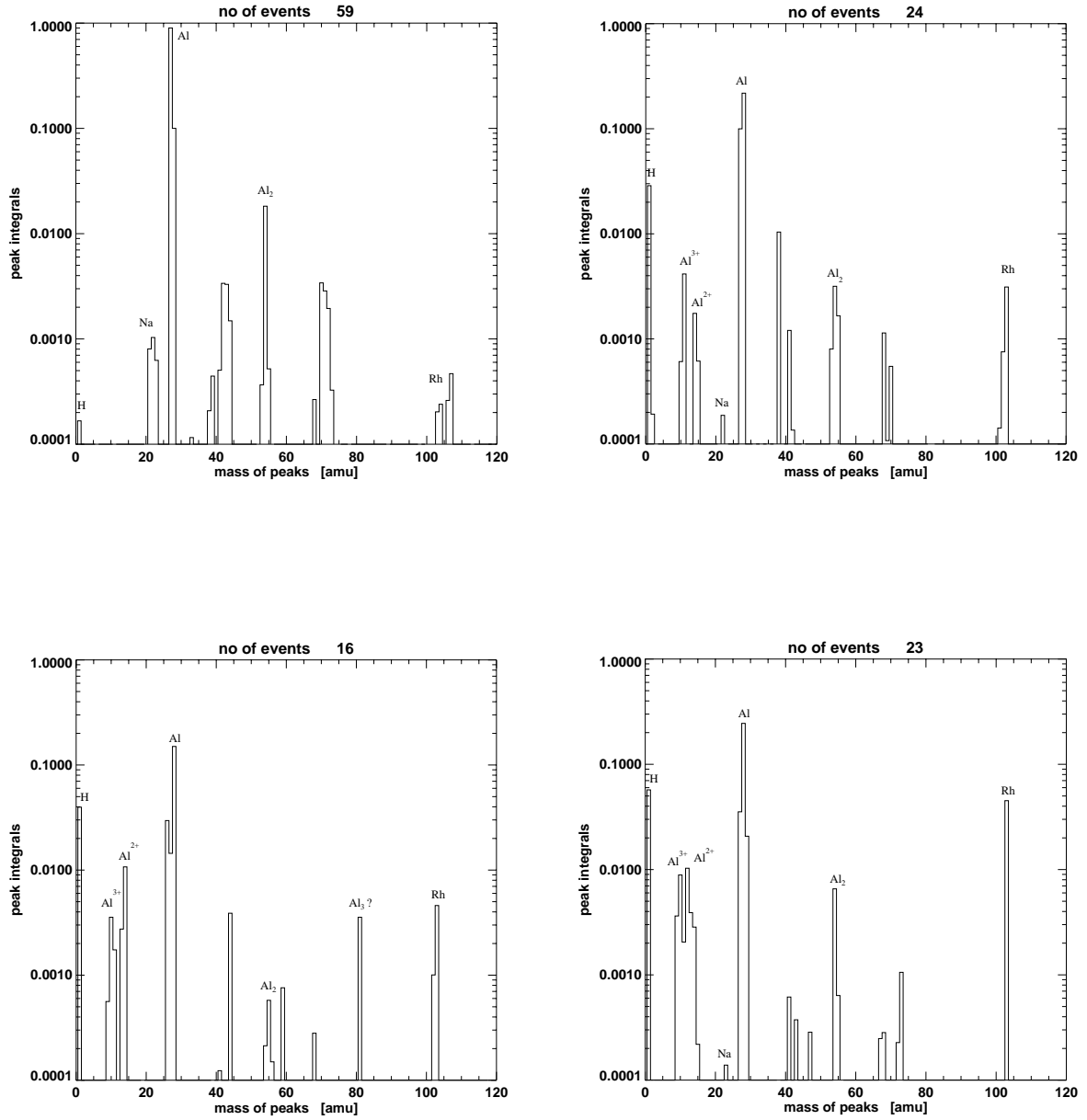


Abbildung 4.17: Geschwindigkeitsvariation der Linienintegrale, oben links: Teilchen mit Geschwindigkeiten von 6 - 14 km/s, oben rechts: 16 - 24 km/s, unten links: 26 - 34 km/s, unten rechts 40 - 51 km/s

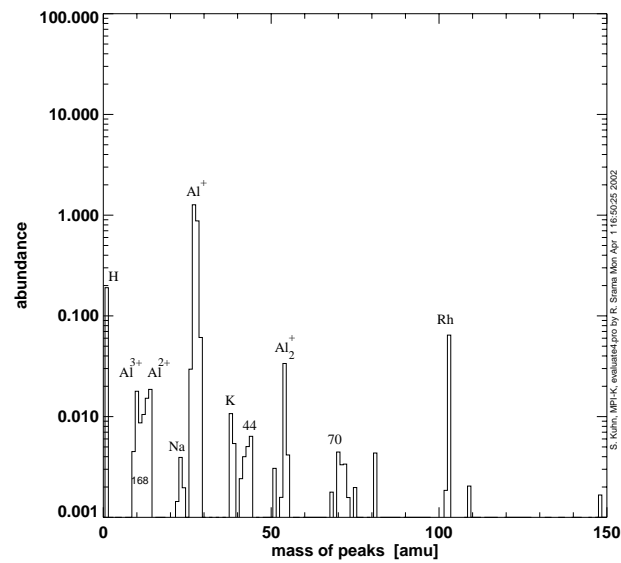


Abbildung 4.18: Summe der Integrale der einzelnen Massenslinien für Aluminiumteilchen, die auf Rhodium geschossen wurden

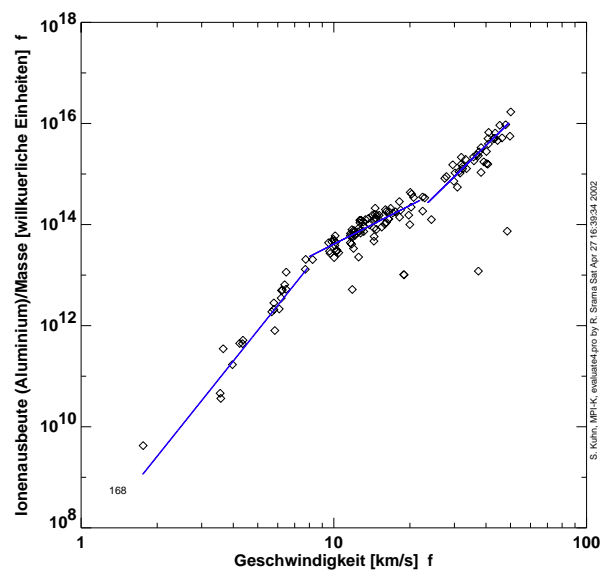


Abbildung 4.19: Das Integral der Aluminiummassenslinie über die Geschwindigkeit. Die Regressionskurven haben die Steigungen 6,3 (1 - 10 km/s), 2,5 (10 - 25 km/s) und 4,9 (25 - 50 km/s).

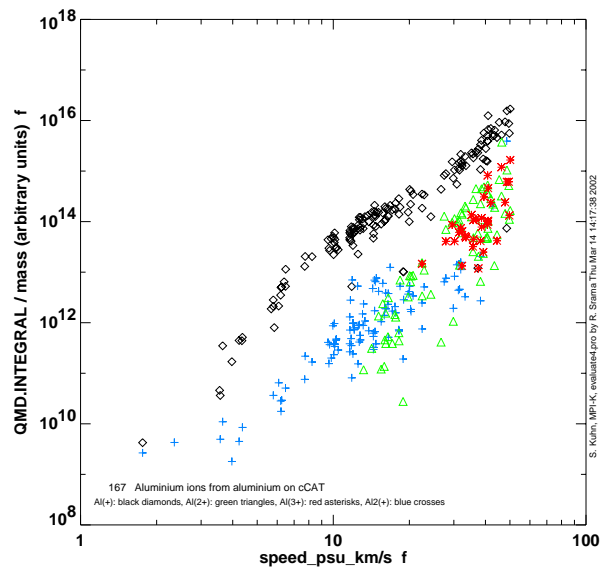
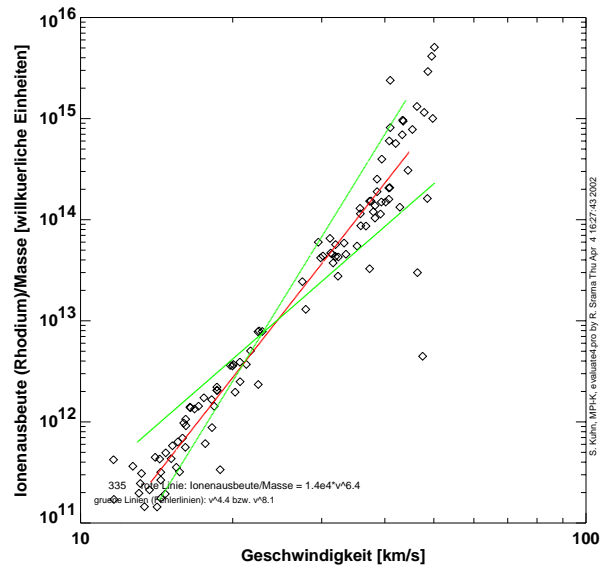


Abbildung 4.20:

Oben: Das Integral der Rhodiummassenlinie bei Aluminium über die Geschwindigkeit. Man sieht, daß das Integral etwa proportional zu v^6 verläuft (die Steigung der Regressionskurve beträgt 6,4; die der Fehlergeraden 4,4 bzw. 8,1), genauso wie die Integrale der Massenlinien bei Latex.

Unten: Normierte Integrale der Massenlinien der verschiedenen Aluminiumionen. Der Knick bei den Integralen von Al^+ (Rauten) entsteht durch Schmelzprozesse am Target. Man beachte, daß Al^{2+} (Dreiecke) erst ab ca 10 km/s auftritt, während Al^{3+} (Sterne) sogar erst ab ca 20 km/s zu sehen ist. Im Gegensatz dazu endet die Al_2^+ -Massenlinie (Kreuze) bei ca 20 km/s.

Kapitel 5

Diskussion

5.1 Folgen für den LSD

Der LSD bietet eine sehr gute Möglichkeit für genaue Messungen von schwach geladenen Teilchen. Daher ist er im Prinzip für weitere Messungen im hohen Geschwindigkeitsbereich unerlässlich. Problematisch ist dabei nur, daß bei der jetzigen Konstruktion nicht nur technische Probleme (beim Öffnen des Detektors schabt sich die Isolation der Leitungen ab), sondern auch elektronische Probleme auftreten. Zwar verfügt der LSD über zwei verschiedene Spannungseingänge (Batterie- oder Netzbetrieb), so daß durch den Batteriebetrieb das 50-Hz-Brummen der externen Spannungsversorgung vermieden werden kann. Trotzdem tritt auch bei Batteriebetrieb eine Störung im 50 Hz Bereich auf, allerdings ohne 'Obertöne', wie bei Betrieb über das Netzteil. Diese Störungen kommen vermutlich aufgrund elektronischer Resonanzen der Bauteile zustande. Da die Messungen, die mit dem LSD geführt werden, in ganz anderen Zeiträumen (μs statt ms) ablaufen, ist aber diese reine 50-Hz Störung nur für das Triggern des Signals von Bedeutung. Leider entladen sich in der jetzigen Konstruktion die Batterien des LSD sehr schnell, was wiederum eine deutliche Auswirkung auf seinen Verstärkungsfaktor hat. Dadurch ist es schwierig bei längeren Messungen genaue Ladungsbestimmungen zu machen. Dazu muß man entweder immer die Spannung der Batterien messen und beim ersten Abfall der Spannung sofort die Batterien austauschen, oder man müßte Batterien mit stärkerer Kapazität verwenden. Auf jeden Fall sollte der LSD überarbeitet werden, um diesen Anforderungen gerecht zu werden.

5.2 Messungen mit CDA

5.2.1 Latex

Bei den Messungen mit Latex zeigten sich ähnliche, aber nicht identische Ergebnisse, wie bei den Experimenten von M. Stübiger (STÜBIG, 2002). Zwar sieht man in den vorgelegten Spektren auch Kohlenstoffcluster, allerdings längst nicht so viele und nicht so ausgeprägte. Dafür zeigt sich die Wasserstoffmassenlinie sehr oft und dann auch sehr ausgeprägt. Dieser

Unterschied könnte zum einen in der Verwendung verschiedener Beschichtungen (Polypyrrol statt Polyanilin) oder zum anderen in den verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen begründet liegen. In der Tat erwartet man für höhere Geschwindigkeiten, daß die größeren Kohlenstoffcluster aufbrechen, so daß nur noch die kleineren (C_2, C_3) Cluster übrigbleiben.

Die Latexteilchen scheinen sich zudem zu größeren Agglomeraten zusammenzuballen: nominell haben sie einen Durchmesser d von 100 nm. Hieraus und aus der Dichte ρ von $1.5 \frac{g}{cm^3}$ läßt sich die Masse m eines einzelnen Teilchens bestimmen:

$$m = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3 \quad (5.1)$$

Über diese Formel errechnet sich die Masse eines Latexteilchens zu ca. $8 \cdot 10^{-19}$ kg. Aus Abb. (3.7, oben) erkennt man aber leicht, daß die meisten detektierten Teilchen weit mehr als diese Masse besitzen. Die langsameren Teilchen ($v \leq 10$ km/s) bestehen nach dieser Massenrechnung aus Agglomeraten von über 100 Einzelteilchen. Diese Einzelteilchen selber konnten aufgrund der Nachweisgrenze des verwendeten Detektors (QP-Kanal des CDA) nicht gesehen werden. Das Teilchen mit der geringsten Masse (wobei diese Masse aus dem ungenauen Wert von QP errechnet wurde, sie ist also sicher noch kleiner), welches in Abb. (3.7) zu sehen ist, hätte die Masse von 5 Einzelteilchen. Diese Agglomeration ist bei (STÜBIG, 2002) nicht zu sehen. Grund hierfür könnte sein, daß Feuchtigkeit oder zu viel Sonnenlicht an die verwendete Probe gekommen ist, oder aber sie könnte an der unterschiedlichen Beschichtung liegen.

5.2.2 Latex mit Silizium

Der Erfolg mit diesem Material war, daß Silizium nachgewiesen werden konnte. Trotzdem bleiben bei diesem Material viele Fragen offen. Zum gibt es das Problem mit der Massenankalibration: Rhodium sollte als Targetmaterial sichtbar sein, doch dann entsteht bei Silizium und Kohlenstoff ein shift um ca. 1 amu. Wieso diese Verschiebung vorhanden ist, kann im Moment nicht erklärt werden. Andererseits, wenn man annehmen würde, daß die Verschiebung nicht da ist, so stellt sich entweder die Frage, warum Rhodium nicht zu sehen ist, oder welchen Ionen die Massenlinien bei 11 und 27 amu zuzuordnen sind. Bei 27 amu könnte man mit Kohlenwasserstoffverbindungen argumentieren, auch wenn diese dann außerordentlich stark zu sehen wären. Jedoch kann man kein plausibles Argument für die Massenlinie bei 11 amu finden. Ebenso ist die Massenlinie bei 44 amu erklärungsbedürftig.

Bei 28 amu wird Silizium erwartet, welches aufgrund der Zusammensetzung des Materials im Spektrum vorkommen sollte. 65 amu dagegen kann interpretiert werden als ein losgelöster Ring der Polypyrrolkette

5.2.3 Aluminium

Bei den Messungen mit Aluminium hat sich gezeigt, daß mehrfach ionisierte Aluminiumionen zu beobachten waren. Einige Theorien (DRAPATZ & MICHEL, 1972) über den Einschlag

eines Staubteilchens beschreiben diesen als die Erschaffung eines heißen Elektron-Ion Plasmas, welches sich in einem Saha-Gleichgewicht befindet, welches während seiner Expansion teilweise rekombiniert. Hierbei werden nur atomare Ionen erwartet, welche durchaus auch mehrfach ionisiert sein können (KISSEL, J. & KRÜGER, F.R., 1987). Dies allerdings ist im Gegensatz zu bisherigen Beobachtungen, die nur einfach geladene Ionen zeigen. Neuesten Erkenntnissen zufolge stehen den Ionen als Anfangsenergie durchaus genug Energie zur Verfügung. Mit Hilfe einer SIMION Analyse konnten der Linienform der Rhodiummassenlinie Anfangsenergien von 30 - 50 eV zugeordnet werden (GRÜN, 2002). Es ist zwar möglich, daß die Massenlinien, die zwei- und dreifach ionisiertem Aluminium zugeordnet wurden, leicht verschobene Kohlenstoff- und Stickstoffionen sind. Allerdings spricht dagegen, daß weder Kohlenstoff, noch Stickstoff zu erwarten sind, wenn mit Aluminiumteilchen auf Rhodium geschossen wird. Wenn man allerdings annimmt, daß diese Massenlinien tatsächlich mehrfach ionisierte Ionen sind, so ergeben sich daraus einige Konsequenzen. Zum einen würde man dann einige mehrfach ionisierte Atome mehr erwarten, bei der Ionisationsenergie von Al^{2+} von ca. 28 eV würde man auch C^{2+} (Ionisationsenergie von 24.4 eV), Si^{2+} (16.4 eV), Fe^{2+} (16.2 eV) und Rh^{2+} (18.1 eV) erwarten, um nur einige der Wichtigsten zu nennen. Allerdings sind diese Ionen bisher nicht identifiziert worden. Vor allem wäre zu erwarten, daß C^{2+} bei 6 amu sehr leicht zu erkennen wäre. Allerdings würde sich mit Rh^{2+} der Doppelpeak bei Spektren aus Schüssen mit Eisenteilchen auf das Rhodiumtarget zu erklären: Hier beobachtet man (SRAMA, 1999) einen Doppelpeak für Eisen, bei 56 amu, sowie bei ca 52 amu. Rh^{2+} müßte bei 51.5 amu auftauchen, so daß dies eine Möglichkeit zur Erklärung dieses Phänomens wäre. Trotzdem bleibt die Frage offen, warum dann diese Rh^{2+} Massenlinie nicht bei anderen Projektilmaterialien beobachtet wurde. Eine Möglichkeit, dies zu erklären wären verschiedene Prozesse bei verschiedenen Materialien, zum Beispiel abhängig von der Dichte des Projektilmaterials im Vergleich zum Target, oder der Struktur des Projektils selber.

Weiterhin fällt bei Aluminium auf, daß zwar in der Ionenausbeute über der Geschwindigkeit ein Einbruch bei ca. 10 km/s zu sehen ist, wie es nach Göller zu erwarten ist, allerdings der Wiederanstieg bei ca 20 km/s nicht, wie bei Göller zu sehen, eine direkte Fortführung des Anstiegs unterhalb von 10 km/s darstellt, sondern zwar die selbe Steigung hat, aber in der Darstellung parallelverschoben ist. Allgemein ist zu sagen, daß die Prozesse in den Bereichen um 10 km/s und 20 km/s noch zu klären wären, so daß man dann eventuell aufgrund der Ionenausbeute pro Masse eine Geschwindigkeitsbestimmung durchführen könnte.

Literaturverzeichnis

- Barthet, Chr., Armes, S.P., Chehimi, M.M., Bilem, C. & Omastova, M.: 1998a, *Synthesis and Characterization of Micrometer-Sized, Polyaniline-Coated Polystyrene Latexes*, *Langmuir* **14**, 2023
- Barthet, Chr., Armes, S.P., Lascelles, S.F., Luk, S.Y. & Stanley, H.M.E.: 1998b, *Surface Characterization of Polyaniline-Coated Polystyrene Latexes*, *Langmuir* **14**, 5032
- Beckwith, S.V.W., Sargent, A.I., Chini, R.S. & Güsten: 1990, *A Survey for Circumstellar Disks around Young Stellar Objects*, *The Astronomical Journal* **99(3)**, 924
- Blum, J., Wurm, G., Kempf, S., Poppe, T., Klahr, H., Kozasa, T., Rott, M., Henning, T., Dorschner, J., Schräpler, R., Keller, H. U., Markiewicz, W. J., Mann, I., Gustafson, B. A., Giovane, F., Neuhaus, D., Fechtig, H., Grün, E., Feuerbacher, B., Kochan, H., Ratke, L., El Goresy, A., Morfill, G., Weidenschilling, S. J., Schwehm, G., Metzler, K. & Ip, W.-H.: 2000, *Growth and Form of Planetary Seedlings: Results from a Microgravity Aggregation Experiment*, *Physical Review Letters* **85**, 2426
- Bronstein, I.N. & Semendjajew, K.A.: 1991, *Taschenbuch der Mathematik*, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, Leipzig, 25 edition
- Burchell, M.J., Cole, M.J., Lascelles, S.F., Khan, M.A., Barthet, C., Wilson, S.A., Cairns, D.B. & Armes, S.P.: 1999a, *Acceleration of Conducting Polymer-Coated Latex Particles as Projectiles in Hypervelocity Impact Experiments*, *Journal of Physics D: Applied Physics* **32**, 1719
- Burchell, M.J., Cole, M.J., McDonnell, J.A.M. & Zarnecki, J.C.: 1999b, *Hypervelocity impact studies using the 2 MV Van de Graaff accelerator and two-stage light gas gun of the University of Kent at Canterbury*, *Meas. Sci. Technol* **10**, 41
- Caruso, F., Lichtenfeld, H., Giersig, M. & Möhwald, H.: 1998, *Electrostatic Self-Assembly Of Silica Nanoparticle - Polyelectrolyte Multilayers on Polystyrene Latex Particles*, *Journal of the American Chemical Society* **120**, 8523
- Draine, B.T. & Salpeter, E.E.: 1979, *On the Physics of Dust Grains in Hot Gas*, *The Astrophysical Journal* **231**, 77
- Drapatz, S. & Michel, K.-W.: 1972, *Theorie der Stosswellenionisation von Mikrometeoriten*, Vortrag auf der DPG-Frühjahrstagung der Arbeitsgemeinschaft Extraterrestrische Physik vom 15.-17.3.72 in Bonn
- Drapatz, S. & Michel, K.W.: 1974, *Theory of Shock-Wave Ionization upon High-Velocity Impact of Micrometeorites*, *Zeitschrift für Naturforschung* **29 a**, 870
- Eichhorn, G.: 1974, *Investigations of the Light Emission during Hypervelocity Particle*

Impacts, Ph.D. Thesis

- Fahr, H.J. & Willerding, E.A.: 1998, *Die Entstehung von Sonnensystemen*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin
- Gerthsen, Ch. & Vogel, H.: 1993, *Physik*, Springer-Verlag, Berlin, 17. edition
- Goeller, J. R. & Gruen, E.: 1985, Calibration of the Galileo/ISPM dust detectors with iron particles, in *ASSL Vol. 119: IAU Colloq. 85: Properties and Interactions of Interplanetary Dust*, S. 113–115
- Graps, A. L., Gruen, E., Krueger, H., Horanyi, M., Svedhem, H., Galileo Dust Team & Cassini Dust Team: 2001, *Io Revealed in the Jovian Dust Streams*, AAS/Division for Planetary Sciences Meeting
- Grün, E.: 2002, *Aspekte der SIMION Analysen*, Vortrag in der Gruppensitzung der Arbeitsgruppe kosmischer Staub am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg
- Grün, E., Gustafson, B., Mann, I., Baguhl, M., Morfill, G.E., Staubach, P., Taylor, A. & Zook, H.A.: 1994, *Interstellar dust in the Heliosphere*, *Astronomy and Astrophysics* **286**, 915
- Heim, L.-O., Blum, J., Preuss, M. & Butt, H.-J.: 1999, *Adhesion and friction forces between spherical micrometer-sized particles*, *Physical Review Letters*
- Ho, T.-M.: 2000, Messungen mit einem hochempfindlichen staubdetektor zum nachweis kleiner und schneller teilchen, *Diplomarbeit*, Max-Planck-Institut für Kernphysik
- Iddon, P.: 2001, *Analysis results for sample number PP/S-001*, personal handout
- Kammler, H. K., Müller, R., Senn, O. & Pratsinis, S.E.: 2001, *Synthesis of silica-carbon particles in a turbulent H₂-air flame aerosol reactor*, *AIChE Journal* **47(7)**, 1533
- Kissel, J. & Krueger, F. R.: 1987, *The organic component in dust from comet Halley as measured by the PUMA mass spectrometer on board VEGA 1*, *Nature*
- Kissel, J. & Krüger, F.R.: 1987, *Ion Formation by Impact of Fast Dust Particles and Comparison with Related Techniques*, *Applied Physics A - Solids and Surfaces* **42**, 69
- Knabe, W.: 1983, *Massenspektrometrische Untersuchungen der Ionenbildung beim Einschlag schneller Staubteilchen*, *Dissertation*, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg
- Lascelles, S.F & Armes, S.P.: 1995, *Synthesis and Characterization of Micrometer-Sized, Polypyrrole-Coated Polystyrene Latexes*, *Advanced Materials* **7(10)**, 864
- Lascelles, S.F & Armes, S.P.: 1997, *Synthesis and characterization of micrometer-Sized, polypyrrole-coated polystyrene latexes*, *Advanced Materials* **7(8)**, 1339
- Posner, A.: 1995, Untersuchungen von flugzeit-massenspektren im rahmen der kalibrierung des cosmic dust analyzer detektors für die cassini-mission, *Diplomarbeit*, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg
- Shelton, H., Hendricks, C.D. & Wuerker, R.F.: 1960, *Electrostatic Acceleration of Microparticles to Hypervelocities*, *Journal of Applied Physics* **31(1)**, 1243
- Srama, R.: 1999, *Kombination von Meßsystemen zur simultanen Messung der Eigenschaften von kosmischen Staub*, *Dissertation*, Technische Universität München, Garching
- Stöcker, H. (Hrsg.): 1994, *Taschenbuch der Physik*, Verlag Harri Deutsch
- Stübiger, M.: 1999, Aufbereitung von mineralen und neukonstruktion einer staubquelle für den einsatz am heidelberger staubbeschleuniger, *Diplomarbeit*, Max-Planck-Institut für

Kernphysik

- Stübig, M.: to be published in 2002, *New results on hypervelocity impact physics and on calibration of impact ionization dust detectors from improved laboratory simulations of micrometeorite impacts*, *Dissertation*, Max-Planck-Institut für Kernphysik
- Čermák, I.: 1994, *Laboruntersuchung elektrischer Aufladung kleiner Staubteilchen*, *Dissertation*, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg
- Weinberg, J.L. & Sparrow, J.G.: 1978, *Cosmic Dust*, Kap. 2: Zodiacal Light as an Indicator of Interplanetary Dust, John Wiley and Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto
- Whipple, F.: 1978, *Cosmic Dust*, Kap. 1: Comets, John Wiley and Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto

Danksagung

Meinen herzlichen Dank möchte ich hiermit allen Mitgliedern der Staubgruppe des Max-Planck-Instituts in Heidelberg ausdrücken, ohne deren Mithilfe das Entstehen diese Arbeit unmöglich gewesen wäre.

Besonders möchte ich an dieser Stelle erwähnen:

Herr Prof. Dr. Eberhard Grün für die stets konstruktive Kritik.

Herr Dr. Ralf Srama für seine Unterstützung, egal zu welchem ungünstigen Zeitpunkt man damit ankommt.

Herr Martin Stübig für die Führung und Unterstützung im Labor, sowie für all die außerdienstlichen Partien Risiko.

Herr Gerd Schäfer, ohne dessen Hilfe im Labor und am Beschleuniger sicher sehr viel weniger funktioniert hätte.

Herr Prof. Pratsinis und Herr Prof. Armes für das Bereitstellen von Materialien.

Frau Anna Mocker für die Unterstützung bei den Messungen.

Erklärung

Ich versichere, daß ich diese Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den