

Massenschleuder bei fernen Kometen

Elektrische und magnetische Felder enthüllen die Zusammensetzung

(zum Artikel „Edelgase auf Komet Tschurjumow-Gerasimenko“ in *Sterne und Weltraum* 01/2016)

Dr. Uwe Herbstmeier

Die Erforschung unseres Sonnensystems mit Hilfe vollautomatischer Raumsonden und ihrer ausgetüftelten Instrumente kann im Unterricht dafür genutzt werden, die Wirkung elektrischer und magnetischer Felder phänomenologisch darzustellen (siehe den Abschnitt [Zielsetzung](#)). Konkret wird in diesem Beitrag ein Experiment aus der Kometenmission [Rosetta](#) genauer betrachtet. Es ist eines der beiden Massenspektrometer der Instrumenteneinheit [ROSINA](#). Die Möglichkeit, mit Hilfe elektrischer und magnetischer Felder aus einem Gasgemisch die einzelnen Massen aufzutrennen, soll von den Schülerinnen und Schülern der Mittelstufe im [ersten Teil der Unterrichtseinheit](#) eigenständig erarbeitet werden. Zusätzlich wird dann im [zweiten Teil](#) das Gelernte auf die im *SuW*-Artikel geschilderte Messung der Argon-Anteile in der Koma des Kometen angewendet.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Stufe	Mittelstufe	
Astronomie	Sonnensystem	Kometen, Entstehung der Erde
Physik	Elektrodynamik	Elektrische Felder, magnetische Felder
Fächer- verknüpfung	Astro-Chemie	Atommodell, Periodensystem, Isotope
Lehre allgemein	Kompetenzen (Wissen und Erkenntnis), Unter- richtsmittel	Gruppenarbeit, Vorwissen verwenden, Auswertung von Messdiagrammen, Schlussfolgerungen entwickeln, Argumentieren

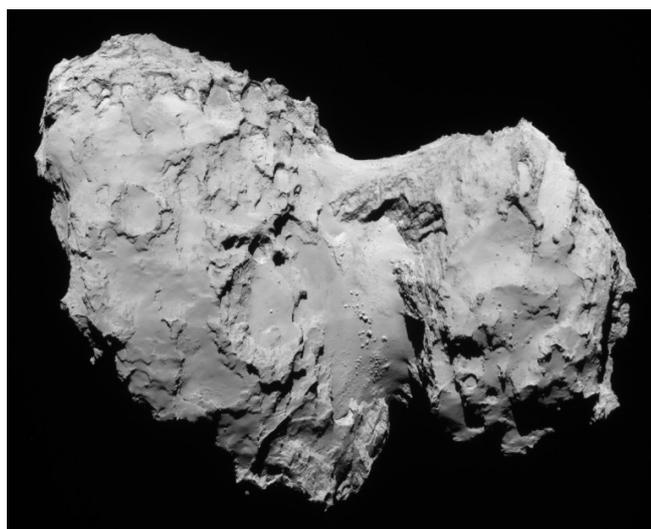
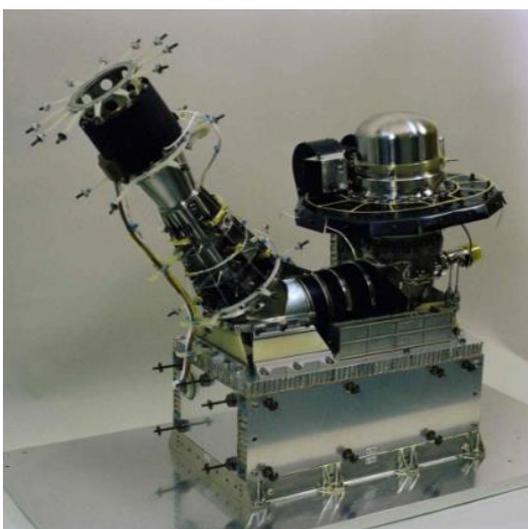


Abbildung 1 - Links: ROSINA - DFMS, das doppelfokussierende Massenspektrometer an Bord von Rosetta (Quelle: ESA/Rosetta/ROSINA/UBern/BIRA/LATMOS/LMM/IRAP/MPS/SwRI/TUB/UMich).

Rechts: P67/Tschurjumow-Gerasimewo Aufnahme vom 19.08.2014 (Quelle: ESA/Rosetta/NAVCAM)

Zielsetzung: Veranschaulichung und Interpretation

[\[zurück zum Titel\]](#)

In der Mittelstufe werden den Schülerinnen und Schülern die elektrischen und magnetischen Felder meist rein phänomenologisch vorgestellt. Detaillierte Rechnungen mit Hilfe der aus den Experimenten abgeleiteten Gesetzmäßigkeiten sind dann erst in der Oberstufe auf dem Programm. Ebenfalls in der Mittelstufe werden im Fach Chemie Grundlagen für ein tieferes Verständnis der Zusammenhänge durch die Vorstellung des Atommodells und Periodensystems geschaffen.

Hier soll an Hand einer konkreten Messapparatur an Bord einer aktuellen Weltraummission dieser phänomenologische Einblick in die elektrischen und magnetischen Feldern und die Elemente vertieft werden. Die Schülerinnen und Schüler sollen in Gruppenarbeit, möglichst auf sich gestellt, die wesentlichen Aspekte der Funktionsweise eines Massenspektrometers erarbeiten. Diese Überlegungen dienen dann als Grundlage, um sich mit den Ergebnissen dieser Experimente auseinanderzusetzen.

Hintergrund: Die Rosetta-Mission und ihre Instrumente

[\[zurück zum Titel\]](#)

Als aktuelles Beispiel wird hier die Kometensonde Rosetta ausgewählt. In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Informationen zum Projekt kurz zusammengefasst, ergänzt durch Quellenangaben zum Weiterlesen. Auch auf weiterführende WIS-Artikel mit zusätzlichen Anregungen für den Unterricht wird verwiesen.

Ziel der Rosetta-Mission

Die Sonde Rosetta wurde gebaut, um in eine Umlaufbahn um einen Kometen, dessen Bahn ausreichend gut bekannt ist, einzuschwenken. Während der Umkreisung des Kometen sollen die Instrumente an Bord dazu genutzt werden, dessen physikalische Eigenschaften und Zusammensetzung genauer zu ermitteln und deren dynamischen Änderungen bei Annäherung des Kometen an die Sonne, z.B. die Ausbildung eines deutlichen Schweifes, zu erfassen. Dies erfolgt nicht nur aus der Umlaufbahn sondern auch mit Hilfe einer mitgeführten kleinen Landeeinheit namens Philae, die auf die Oberfläche abgesetzt wird.

Was ist Rosetta?

Rosetta besteht aus zwei Laboren, die kleinbusgroße Muttersonde Rosetta (siehe Abbildung 2), die um den Kometen kreist und die Landeeinheit Philae, die die Größe eines Kühlschranks besitzt.

Die Muttersonde beinhaltet 11 Gruppen wissenschaftlicher Instrumente, Kameras (OSIRIS), Spektrometer (ALICE, VIRTIS, MIRO), die die Zusammensetzung erkunden, ergänzt durch Massenspektrometer (ROSINA, COSIMA), Staubdetektoren und -Analysatoren (MIDAS, GIADA) und Plasma- und Radiowellenmessgeräte (CONCERT, RPC, RSI).

Die Landesonde Philae besteht selbst aus verschiedenartigen Instrumenten. Sie setzte auf die Kometensonde auf, haftete aber nicht sofort an Ort und Stelle. Nach mehreren Sprüngen blieb sie, kaum von der schwachen Schwerkraft des Kometen gehalten, leider in einer sehr unglücklichen Position liegen, sodass die Geräte an Bord nur über wenige Stunden Messdaten sammeln konnten. Weitere Versuche, Philae per Funk zu erreichen finden statt, während dieser Artikel geschrieben wird.

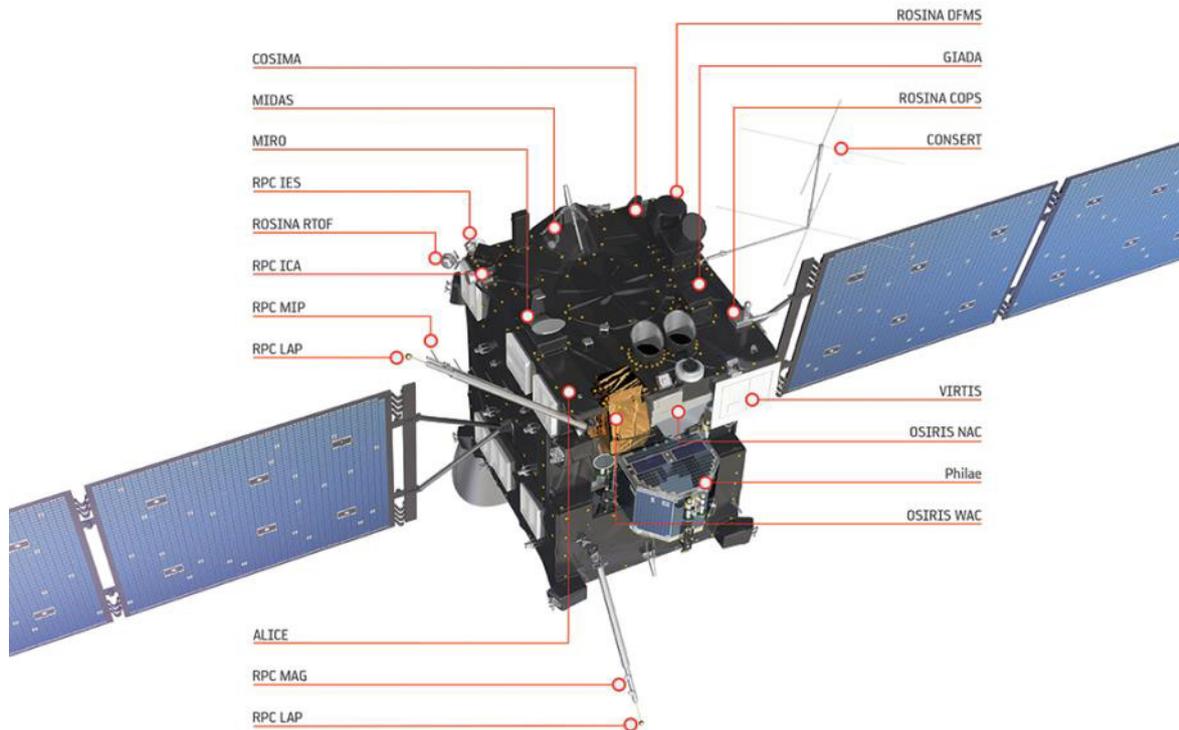
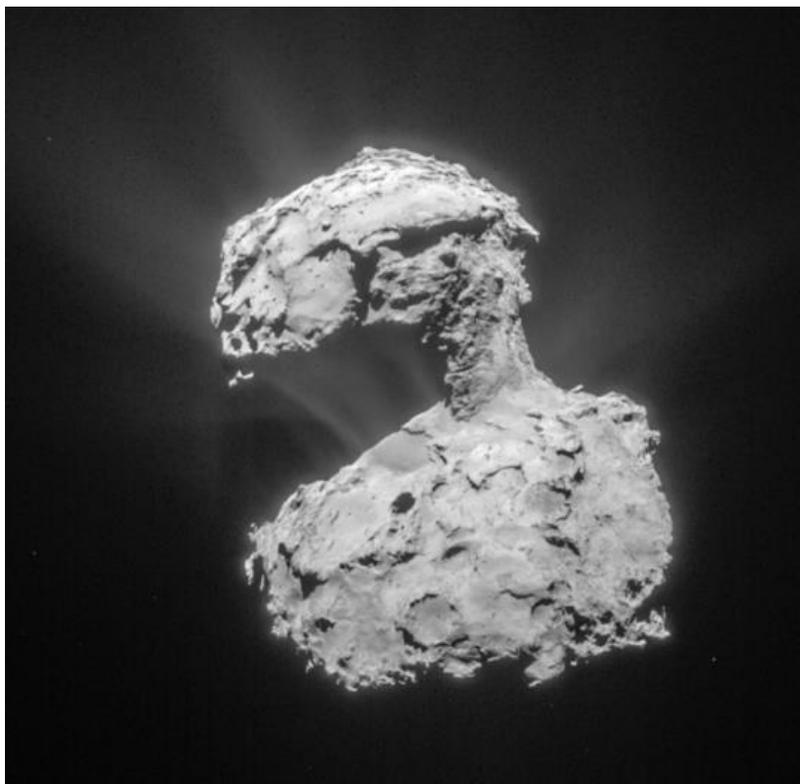


Abbildung 2 – Skizze von Rosetta mit Hinweisen auf die verschiedenen Messinstrumente und die Landeeinheit Philae (Quelle: ESA/ATG medialab).

Welcher Komet wurde ausgewählt?



Nachdem der Start wegen technischer Probleme verschoben werden musste, kam der ursprünglich vorgesehene Komet 46P/Wirtanen nicht mehr als Ziel in Frage. Daher fiel die Wahl auf die Alternative P67/ Tschurjumow-Gerasimenko. Der Komet entpuppte sich als komplex aufgebauter Doppelkörper voller Krater und Abhänge. In Sonnennähe entwickelten sich, wie erwartet, die Gas- und Staubwolke um den Kometen (Koma genannt) und die Staubjets, die dann den Schweif des Kometen bilden.

Zum Aufbau und zur Struktur eines Kometen siehe auch die folgende Liste zu weiteren WIS-Artikeln, bzw. den Wikipedia-Artikel über Kometen.

Komplizierte Bahn von Rosetta

Die Sonde wurde mit einer Ariane 5 Rakete am 2. März 2004 auf die Reise geschickt. Um sicher in die Umlaufbahn des Kometen einschwenken zu können und um nicht zu viel Treibstoff mitführen zu müssen, wurde eine Bahn gewählt, die insgesamt ca. 10 Jahre Flugzeit beanspruchte, Mars und dreimal die Erde als Anflugziel entlang der Bahn enthielt, um die nötige Beschleunigung und Bahnrichtung beim Vorbeiflug an den Planeten zu erhalten. Um auf dem Bahnabschnitt weit entfernt von der Sonne Energie zu sparen, wurde die Sonde mehrere Monate komplett bis auf wenige notwendige Geräte abgeschaltet.

Quellen und weitere links zum Weiterlesen

Rosetta-Seiten auf der ESA-Internet-Präsenz (Einstieg):

<http://rosetta.esa.int/>, bzw.

Rosetta-Seiten auf ESA's Science&Technology-Seite:

<http://sci.esa.int/rosetta/>

Rosetta-Seiten der Deutschen Agentur für Luft- und Raumfahrt (DLR, auf Deutsch):

www.dlr.de/rosetta/

Die einzelnen Instrumente werden näher beschrieben auf den Seiten der Institute, die für deren Bau hauptverantwortlich sind. (siehe: <http://sci.esa.int/rosetta/43058-mission-team>)

Weitere WIS-Artikel zu Rosetta und Kometen allgemein

[Rosetta, Philae und der Komet 65P Tschurjumow-Gerasimenko](#)

Autor: Dirk Brockmann, für die Mittelstufe,

Thema: Größenverhältnisse von P67/Tschurjumow-Gerasimenko

[Landung auf einem Kometenkern – etwas Schulphysik](#)

Autor: Olaf Fischer, für die Mittelstufe und Oberstufe,

Thema: Landung von Philae mit Hilfe der Mechanik der Schulphysik nachvollziehen

[Die Rosetta-Mission](#)

Autor: Lutz Clausnitzer, für die Mittelstufe und Oberstufe,

Thema: Geschichtlicher Bezug des Namens „Rosetta“, Fakten zur Sonde systematisch erarbeiten.

[Kepler für Kids](#)

Autor: Olaf Fischer, für die Mittelstufe,

Thema: Keplersetze auch am Beispiel einer Kometenbahn

[Kometen in der Schule](#)

Autor: Olaf Fischer, für die Oberstufe,

Thema: Erarbeiten der grundsätzlichen Eigenschaften eines Kometen (Schweifstruktur, Bahn, Größe)

Das Massenspektrometer ROSINA - elektrische und magnetische Felder [\[zurück zum Titel\]](#)

ROSINA an Bord von Rosetta ist ein Massenspektrometer. Genauer gesagt es beinhaltet zwei verschiedene Geräte die leicht unterschiedlich funktionieren: Ein doppelfokussierendes (DFMS) und ein Flugzeit-Massenspektrometer (RTOF). Wie der Name schon sagt, ist das Ziel eines Massenspektrometers, ein Gemisch aus Elementen nach dessen Masse aufzuteilen und damit die Zusammensetzung des Gemisches zu erfassen.

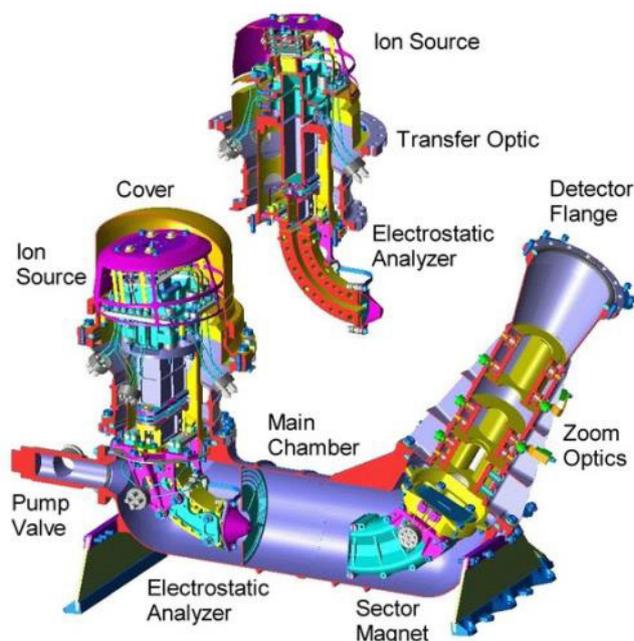


Abbildung 4 – Prinzipskizze des DFMS als Teil von ROSINA (siehe auch Abbildung 1 - links) (Quelle: Universität Bern, Physikalisches Institut, Weltraumforschung und Planetologie, <http://space.unibe.ch/de/rosina/dfms/pictures.html>)

Grundprinzip eines Massenspektrometers: Zunächst müssen die neutralen Atome und Moleküle in einem Gas aufgeladen werden. Anschließend werden sie durch ein elektrisches Feld beschleunigt und erhalten so Bewegungsenergie, d.h. Geschwindigkeit (v). Dieser Ionenstrom wird in ein Magnetfeld senkrecht zu den Feldlinien eingeschossen und dadurch auf Kreisbahnen gelenkt. Die Form der Kreisbahn ergibt sich aus einem Gleichgewicht der Fliehkraft und der magnetischen Lorentz-Kraft (F). Der Bahnradius (R) hängt dabei linear von der Masse (m) ab. Allerdings nicht nur von ihr, sondern auch der Ladungszahl (z) der Ionen. Die Gleichgewichtsformel lautet dabei:

$$F_{\text{magnetisch}} = F_{\text{zentrifugal}}$$

$$z \cdot B \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{R} \quad (1)$$

Der Bahnradius der Ionen berechnet sich damit zu:

$$R = \frac{m}{z} \cdot \frac{v}{B} \quad (2)$$

d.h. ein Faktor 2 im Massenunterschied zweier Elemente wird nicht erkannt, wenn bei konstantem Magnetfeld und gleicher Geschwindigkeit die Ladung nur halb so groß ist.

Weitere Information zu ROSINA (Universität Bern): <http://space.unibe.ch/de/rosina.html>

Allgemeines zu Massenspektrometern (IRS, Universität Stuttgart):

http://www.irs.uni-stuttgart.de/lehre/v_messverfahren_plasma_selfstudy_online/Kap-5_Massenspektrometrie/Kap-5_Massenspektrometrie.pdf

Eine Schulstunde - Teil 1

[\[zurück zum Titel\]](#)

Wirkung der elektrischen und magnetischen Felder in Massenspektrometern

Voraussetzung

Die grundsätzlichen Eigenschaften der elektrischen und magnetischen Felder wurden bereits im Physikunterricht vorgestellt. Auch die Lorentz-Kraft der Magnetfelder, die 3-Finger-Regel zu der Bestimmung der Richtung der Kraft und ggf. bereits der einfache Zusammenhang zwischen ihr und der Zentrifugalkraft (Gleichung (1)) sollten thematisiert worden sein, können aber auch hier mit eingeflochten werden. Im Chemieunterricht ist den Schülerinnen und Schülern bereits das Atommodell, das Periodensystem und der Unterschied der Isotope dargestellt worden.

Einführung

Zunächst sollte ein kurzer Überblick über die Rosetta-Mission gegeben werden (Gebundene Bahn um den Kometen, Raumsonde mit vielen Messinstrumenten, Kometenstruktur), um einen Rahmen für die folgenden Aufgaben zu bilden.

Aufgaben für die Schülerinnen und Schüler

Die Aufgabe für die Schülerinnen und Schüler besteht dann darin, die prinzipielle Funktionsweise der elektrischen und magnetischen Felder in einem Massenspektrometer in Form einer Gruppenarbeit zu ermitteln. Dafür können mindestens drei bis vier Gruppen gebildet werden, die als Schwerpunkte eines oder mehrere der folgenden Themen bearbeiten.

- Thema 1: Wie können die Atome und Moleküle auf den Weg durch die Messkammer geschickt werden? ([Arbeitsblatt 1](#))
- Thema 2: Wie erhalten die Atome und Moleküle bei Eintritt in die Messkammer die notwendige Geschwindigkeit? ([Arbeitsblatt 2](#))
- Thema 3: Was geschieht im Bereich der Richtungsablenkung der Atome und Moleküle? ([Arbeitsblatt 3](#))
- Thema 4: Wie können aus den Bahnen der Atome und Moleküle deren Massen bestimmt werden? ([Arbeitsblatt 4](#))

Während dieser Gruppenarbeit sollten die Schülerinnen und Schüler zunächst möglichst unabhängig von der Lehrkraft an die Themen herangehen. Im Verlauf der Diskussionen können natürlich von außen Fragen und Anregungen an die Gruppen gerichtet werden, um sie in den Gedanken weiterzuführen.

Die Ergebnisse werden am Ende von den einzelnen Gruppen im Plenum vorgestellt. Dabei können durchaus auch unterschiedliche Sichten im Einzelnen diskutiert werden. Zusätzlich kann das Gelernte durch weitere Fragen zum Thema vertieft werden ([Arbeitsblatt 5](#)).

Eine Schulstunde - Teil 2

Konkrete Ergebnisse und ihre Deutung

[\[zurück zum Titel\]](#)

Kurze Zusammenfassung der Messergebnisse

Ist die Wirkungsweise des Massenspektrometers verstanden, kann im zweiten Teil ein konkretes Ergebnis genauer betrachtet werden. Das bietet die Möglichkeit aufzuzeigen, wie aus physikalischen Messungen interessante Schlussfolgerungen gezogen werden können.

Im Referenzartikel „Edelgase auf Komet Tschurjumow-Gerasimenko“ aus *Sterne und Weltraum* 01/2016 wird von zwei Messungen im Bereich $m/z = 36$ bzw. 38 atomarer Masseneinheiten berichtet: Balsiger et al. Sci. Adv. 2015;1:e1500377, <http://advances.sciencemag.org/content/1/8/e1500377.full>
Es wurden die Anteile der beiden Argon-Isotope ^{36}Ar und ^{38}Ar in der Koma des Kometen erfasst. Diese werden miteinander und mit dem Gehalt an Wasser und molekularem Stickstoff verglichen. Argon ist ein geeigneter Kandidat für quantitative Untersuchungen, da es zum einen ein reaktionsträges Edelgas ist und nicht in stabilen Verbindungen anderer Art gebunden ist, zum anderen ein sehr häufiges Element ist. Z.B. in der Erdatmosphäre ist Argon hinter Stickstoff und Sauerstoff das dritthäufigste Element.

Damit bietet es sich an, die Ergebnisse in der Kometenkoma mit den Werten auf der Erde zu vergleichen. Diese Information gibt darüber Aufschluss, ob Kometen der Art von P67/Tschurjumow-Gerasimenko eventuell eine erhebliche Quelle für Wasser auf der Erde darstellen können. Denn eine Theorie besagt, dass nach der starken und austrocknenden Hitze der ersten Phase der Planetenbildung Wasser durch die Kollision kalter, wassereisreicher Kometenkerne mit der Protoerde auf unseren Heimatplaneten gelangt ist. In der Tat wurde jedoch gefunden, dass zum zwar das Isotopen-Verhältnis $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ dem der Erde entspricht, zum anderen aber das Verhältnis $\text{Ar}/\text{H}_2\text{O}$ deutlich zu groß ist.

Aufgaben für die Schülerinnen und Schüler

Die Aufgabe für die Schülerinnen und Schüler besteht nun in zwei Teilen. Zum einen sollen sie das Diagramm der Originalpublikation genau betrachten und die Inhalte so weit wie möglich verstehen lernen. Hierzu können wieder die gleichen Gruppen gebildet werden wie im ersten Teil. Die Ergebnisse werden dann vor der Klasse präsentiert. In der Klasse kann dann über die Schlussfolgerung für die Theorie des Wassertransports von den Kometen auf die Erde diskutiert werden.

[Arbeitsblatt 6](#) enthält die entsprechenden Vorlagen.

Arbeitsblätter

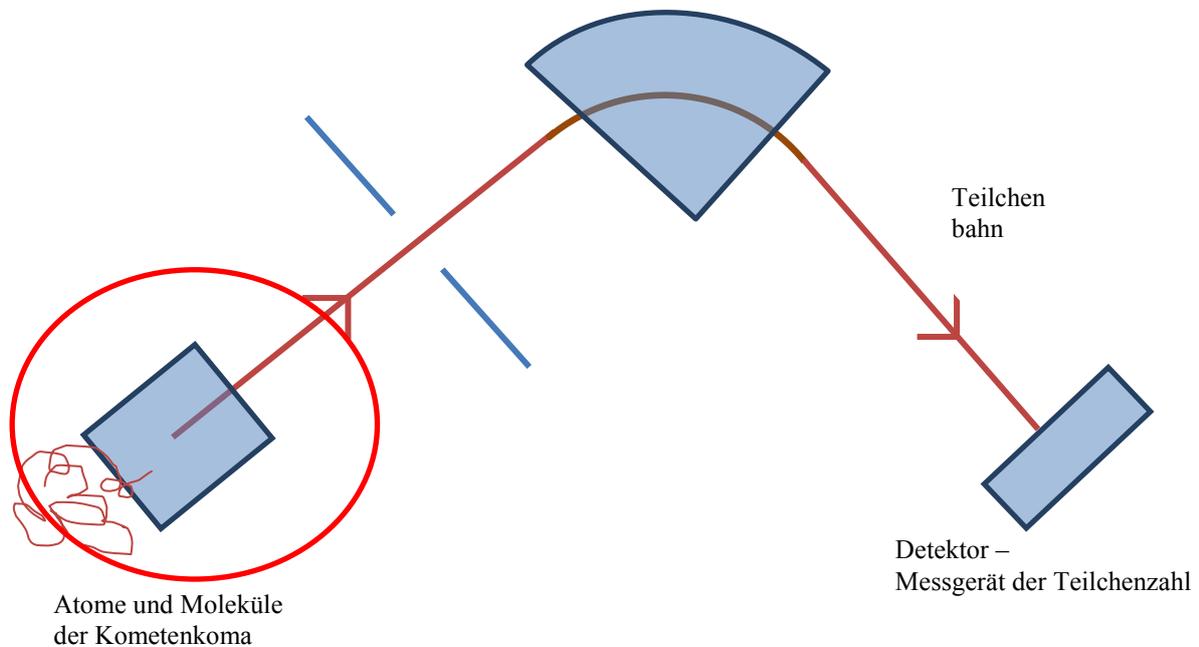
Auf den folgenden Seiten finden sich die im Text angesprochenen Arbeitsblätter. Zu jedem Blatt gibt es im Anschluss daran [Hinweise bzw. Lösungen](#).

Quellen

Die Quellen sind alle nahe der Stellen aufgeführt, wo sie im Bezug zum Text erwähnt werden.

Arbeitsblatt 1

Thema 1: Wie kommen die Atome und Moleküle auf ihren Weg durch das Instrument?



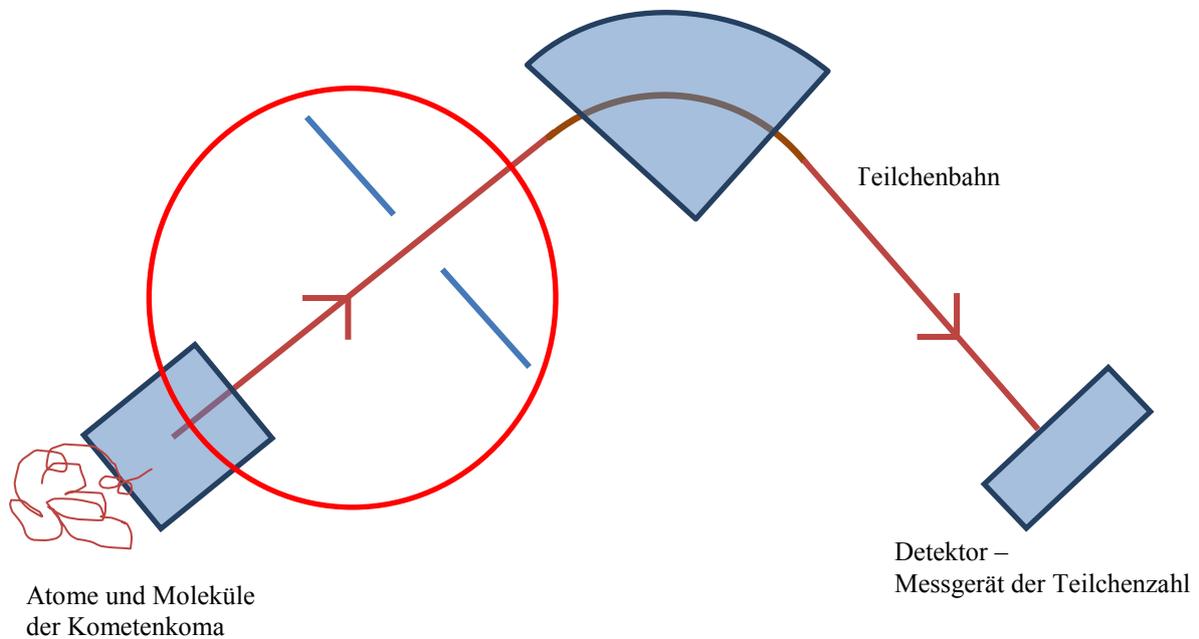
Prinzipische Skizze eines Massenspektrometers

Beim Flug der Raumsonde Rosetta durch die Koma des Kometen P67/Tschurjumow-Gerasimenko sollen die Atome und Moleküle in der gasförmigen Hülle des Kometen bestimmt werden. Dazu müssen sie in die Messapparatur gelangen und dann gezielt auf die Bahn durch die elektrischen und magnetischen Feldern geschickt werden.

Wie kann das erreicht werden?

Arbeitsblatt 2

Thema 2: Wie erhalten die Atome und Moleküle bei Eintritt in die Messkammer die notwendige Geschwindigkeit?



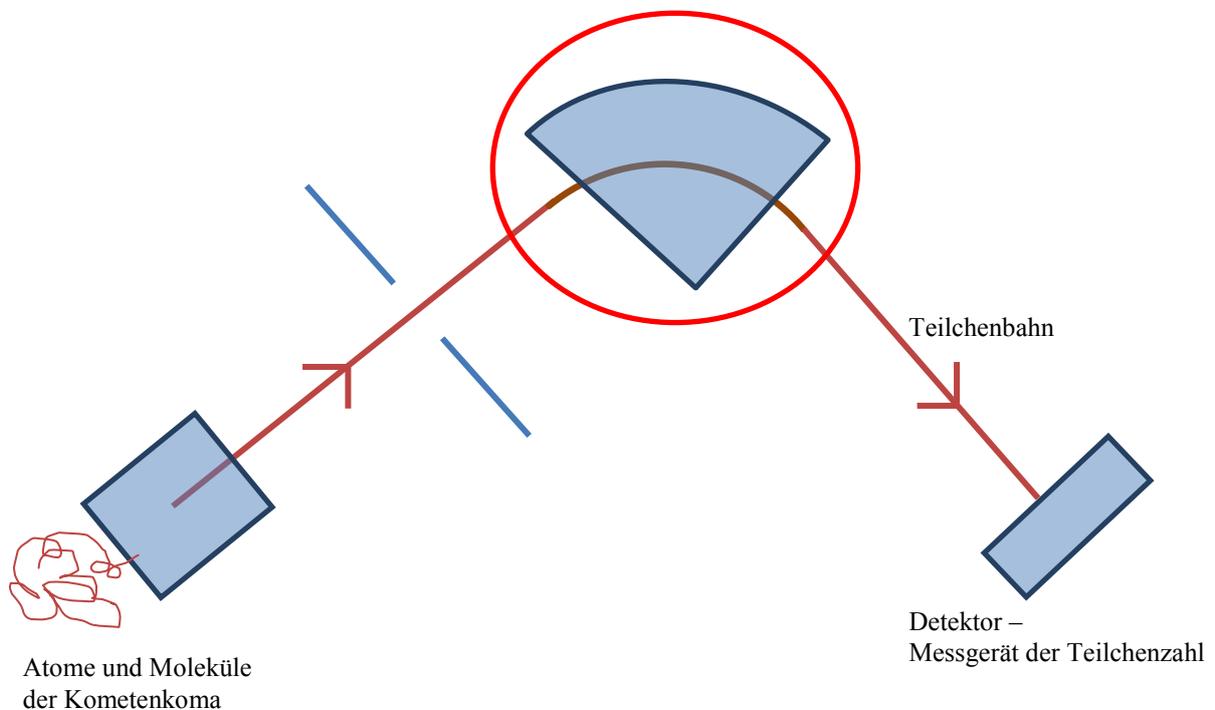
Prinzipskizze eines Massenspektrometers

Nachdem in der Ionisationskammer die Atome und Moleküle aufgeladen worden sind, müssen diese auf Geschwindigkeit gebracht werden um durch die Messapparatur zu gelangen.

Wie kann das erfolgen?

Arbeitsblatt 3

Thema 3: Was geschieht im Bereich der Richtungsablenkung der Atome und Moleküle?



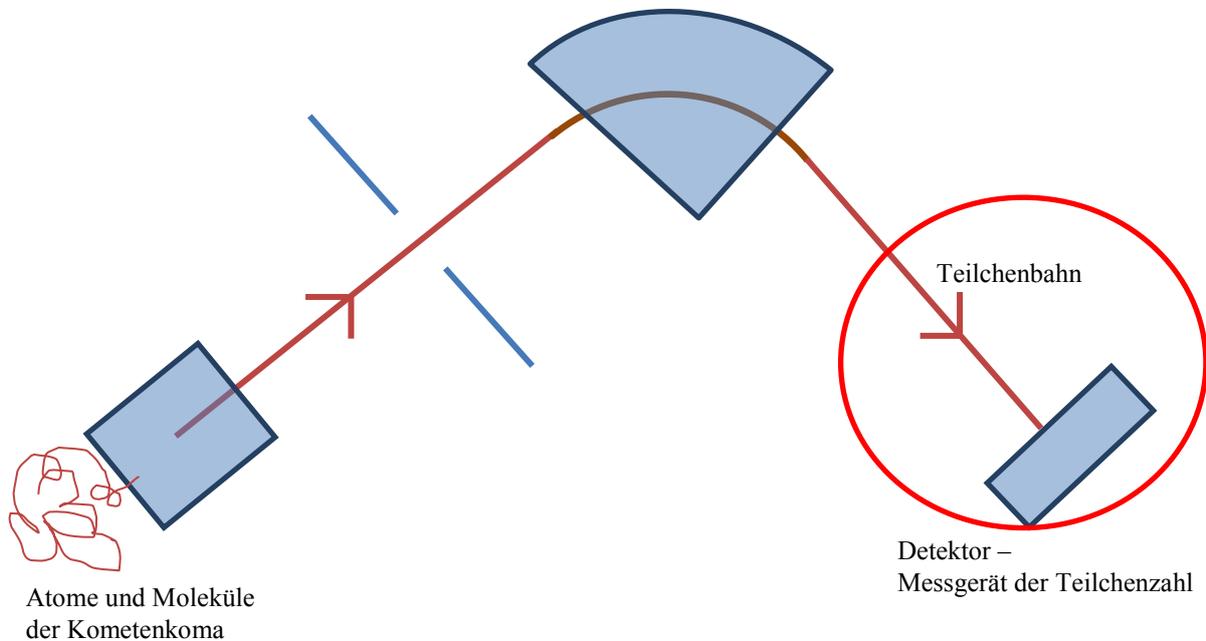
Prinzipische Skizze eines Massenspektrometers

Im Verlauf ihrer Bahn durch die Messapparatur werden die geladenen Teilchen aus ihrer geradlinigen Richtung abgelenkt.

Wie kann dies geschehen?

Arbeitsblatt 4

Thema 4: Wie können aus den Bahnen der Atome und Moleküle deren Massen bestimmt werden?



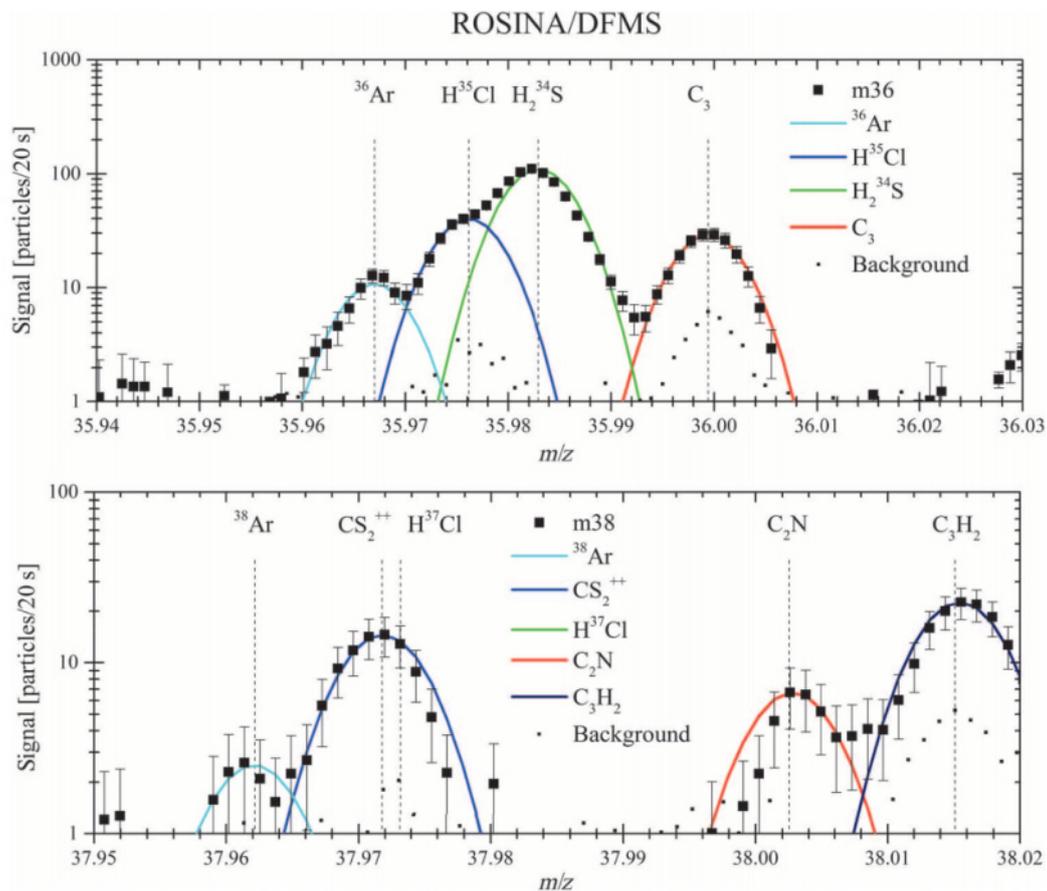
Prinzipische Skizze eines Massenspektrometers

Nach der Ablenkung der Teilchen durch die Wirkung von elektrischen und magnetischen Feldern werden diese von einem Messinstrument (Detektor) gezählt.

Wie kann der Detektor und die gesamte Apparatur gestaltet werden, um die Massen der gemessenen Teilchen zu bestimmen?

Arbeitsblatt 6

Ergebnisse von ROISNA und ihre Deutung



Quelle: Balsiger et al. Sci. Adv. 2015;1:e1500377, <http://advances.sciencemag.org/content/1/8/e1500377.full>

1. Betrachte die Messdiagramme von ROSINA und versuche alle Elemente zu erklären.
2. Lies die Messwerte für die beiden Argon-Isotope ab und ergänze die folgende Tabelle.

Verhältnis	Komet P67/TG	Erde	Sonnenwind
$^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$	_____	5,3	5,5
$^{36}\text{Ar}/\text{H}_2\text{O}$	$(0.1 \text{ bis } 2.3) \cdot 10^{-5}$	$6.5 \cdot 10^{-8}$	--

Quelle: Balsiger et al. wie oben

3. In der Tabelle sind auch Messungen des Anteils von Argon im Vergleich zu einer ebenfalls gemessenen Menge an Wasser eingetragen. Eine Theorie besagt, dass ein Großteil des Wassers nachträglich durch den Zusammenstoß mit wasserreichen Kometenkernen auf die Erde gelangt ist. Was denkst Du darüber, wenn Du die Werte in der Tabelle miteinander vergleichst?

Lösungen und Hinweise zu den Arbeitsblättern

[\[zu den Arbeitsblättern\]](#)

Hinweise zum Arbeitsblatt 1

Thema 1: Wie kommen die Atome und Moleküle auf ihren Weg durch das Instrument?

Im Außenbereich sind viele der Teilchen neutral. Die Frage zielt darauf, dass zunächst die Teilchen ionisiert werden müssen, um durch elektrische und magnetische Felder beschleunigt werden zu können.

Mögliche Hinweise an die Arbeitsgruppe:

- Nur geladene Teilchen spüren die Kraft der elektrischen und magnetischen Felder
- Erinnerung an das Atommodell (Aufbau der Elemente aus Atomkernen und Elektronen),
- Frage: Wie können die Elektronen aus den Atomen herausgerissen werden? →
 - Stöße durch geladene Teilchen, die in der Apparatur erzeugt werden,
 - Licht mit ausreichender Energie, das die Elektronen herauslöst,
 - Starke elektrische Felder die die beiden geladenen Teile der Atome trennen.

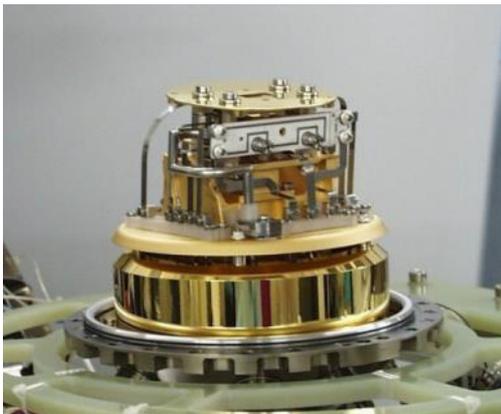


Abbildung – Ionenquelle des DFMS als Teil von ROSINA (siehe auch Abbildungen 1 – links und 4) (Quelle: Universität Bern, Physikalisches Institut, Weltraumforschung und Planetologie, <http://space.unibe.ch/de/rosina/dfms/pictures.html>)

Hinweise zum Arbeitsblatt 2

Thema 2: Wie erhalten die Atome und Moleküle bei Eintritt in die Messkammer die notwendige Geschwindigkeit?

Nachdem nun Ionen erzeugt worden sind, müssen sie beschleunigt werden, um eine magnetische Kraft zu erfahren.

Mögliche Hinweise an die Arbeitsgruppe:

- Formel für die Lorentz-Kraft enthält die Geschwindigkeit als Größe
- Die elektrostatischen Kräfte von geladenen Platten auf Ionen
- Wie könnte das elektrische Feld im Massenspektrometer aussehen?
- Wie lässt sich das elektrische Feld erzeugen?

Hinweise zum Arbeitsblatt 3

Thema 3: Was geschieht im Bereich der Richtungsablenkung der Atome und Moleküle?

Nun wurden die Ionen beschleunigt und haben eine ausreichende Geschwindigkeit. Die Ablenkung erfolgt durch ein Magnetfeld, das senkrecht zur dargestellten Ebene aus der Blattebene heraus verläuft, d.h. das Magnetfeld zeigt nach oben zum Betrachter hin.

Mögliche Hinweise an die Arbeitsgruppe:

- Erinnerung an die Lorentz
- Frage nach der Orientierung und Richtung des Magnetfeldes
- Wie hängt die Bahn von der Ladungspolarität ab?
- Welchen Einfluss hat die Beschleunigung vor dem Magneten?



Abbildung - Sektormagnet des DFMS als Teil von ROSINA (siehe auch Abbildungen 1 – links und 4) (Quelle: Universität Bern, Physikalisches Institut, Weltraumforschung und Planetologie, <http://space.unibe.ch/de/rosina/dfms/pictures.html>)

Hinweise zum Arbeitsblatt 4

Thema 4: Wie können nun aus den Bahnen der Atome und Moleküle deren Massen bestimmt werden?

Das Gleichgewicht zwischen magnetischer und Zentrifugalkraft ergibt nun die Abhängigkeit des Bahnradius von der Masse (bei gleichbleibender Ladungszahl und aller anderer Parameter).

Mögliche Hinweise an die Arbeitsgruppe:

- Frage nach den auftretenden Kräften
- Welche Bahn wird eingehalten (Kräftegleichgewicht)?
- Formeln für die magnetische (Lorentz) und die Fliehkraft
- Berechnung einer Messgröße in Abhängigkeit von der Masse aus diesem Gleichgewicht

Hier könnte es sein, dass durchaus die Schülerinnen und Schüler auf die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Masse stoßen. Dies ist das Grundprinzip für das zweite Instrument als Teil von ROSINA, das Flugzeitmassenspektrometers RTOF. Hier wird die Auftrennung der Massen allein durch die Massenabhängigkeit der Beschleunigung im massenunabhängigen elektrischen Feld gegeben. Das führt dann zu unterschiedlichen Zeiten für die Durchquerung des Geräts.

Lösungen zum Arbeitsblatt 5

Weitere Fragen zum Massenspektrometer

1. Wie wirkt sich die die Ladung der Ionen (Anzahl der abgerissenen Elektronen) auf die Messung aus?

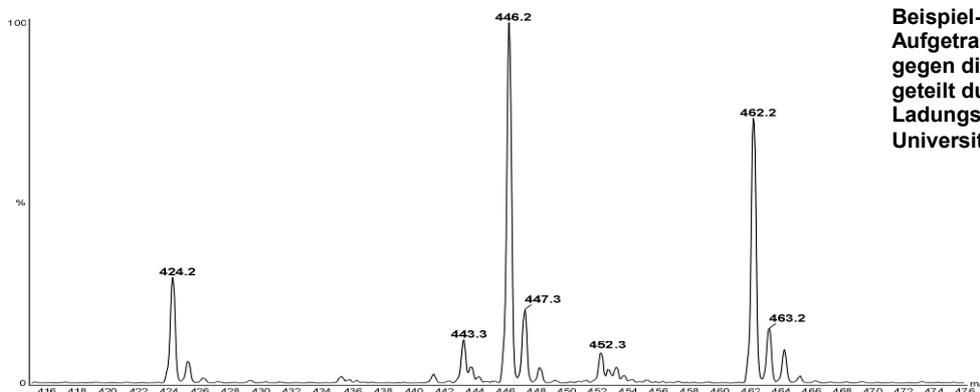
Diese Abhängigkeit ergibt sich aus der Formel für die Lorentzkraft:

$$z \cdot B \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{R} \quad \text{mit der Auflösung auf den Radius} \quad R = \frac{m}{z} \cdot \frac{v}{B}$$

Ionen mit gleichem Masse-zu-Ladungsverhältnis finden sich am gleichen Ort des Detektors. D.h. ein Objekt mit doppelter Masse aber auch doppelter Ladung verglichen zu einem Referenzelement kommt im Detektor an der gleichen Stelle zu liegen.

Daher sind kleine aber feine Massenunterschiede auf Grund unterschiedlicher Bindungsenergien und anderer Effekte ausschlaggebend, die Massen trennen zu können.

2. Wie könnte ich die Zählraten des Detektors in einem x-y-Diagramm veranschaulichen?



Beispiel-Massenspektrum.
Aufgetragen sind Zählraten
gegen die atomare Masseneinheit
geteilt durch die einheitenlose
Ladungszahl – (Quelle:
Universität Münster)

3. Was müsste ich tun, um die Masse der Elektronen zu bestimmen?

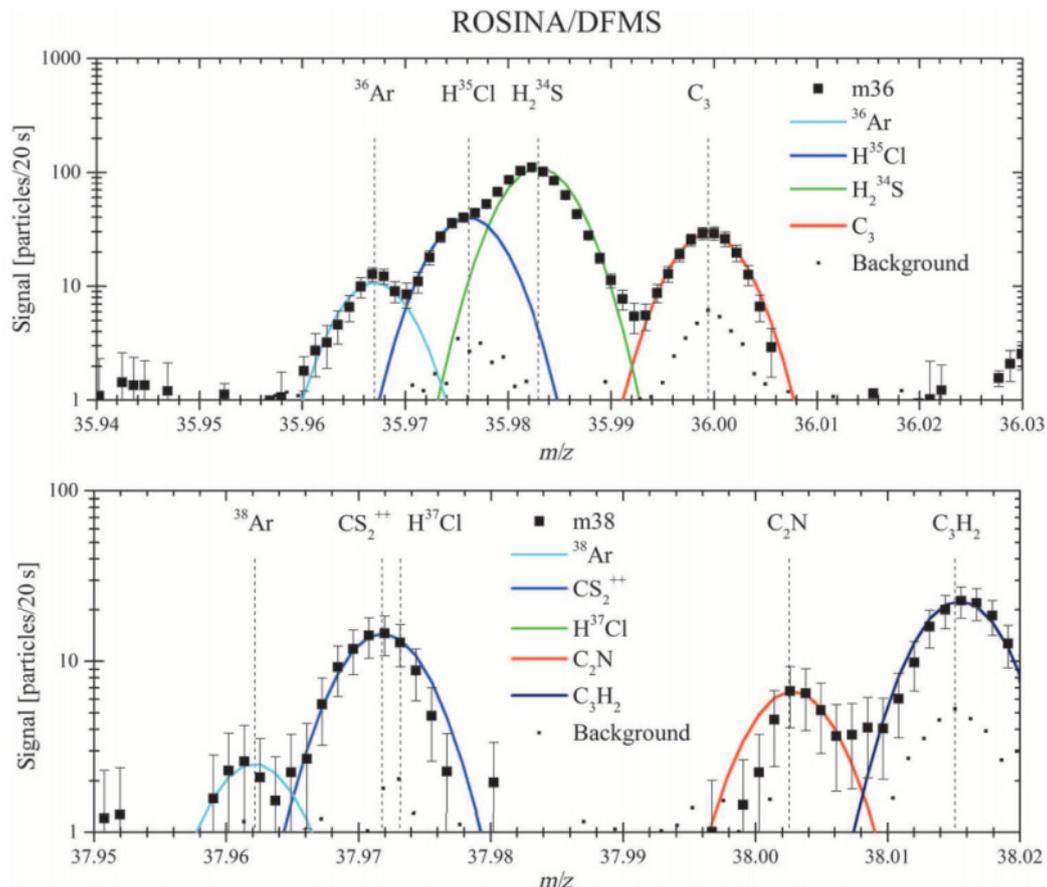
Die Richtung der beiden Felder (elektrisches Feld zur Beschleunigung und magnetisches Feld zur Auftrennung) müssen umgekehrt werden.

4. Welche Möglichkeit besteht noch, die Teilchen unterschiedlicher Masse in einem Ionengemisch zu trennen?

z.B. durch die im Arbeitsblatt 4 aufgeführte Flugzeitmassenspektroskopie.

Hinweise und Lösungen zum Arbeitsblatt 5

Ergebnisse von ROISNA und ihre Deutung



Quelle: Balsiger et al. Sci. Adv. 2015;1:e1500377, <http://advances.sciencemag.org/content/1/8/e1500377.full>

1. Betrachte die Messdiagramme von ROSINA und versuche alle Elemente zu erklären.

Mehrere Aspekte können hier diskutiert werden:

- Messergebnisse mit Fehlerbalken
- Background, der Hintergrundwert. Dieser wurde auf der Flugbahn noch fern zum Kometen bestimmt. Er enthält die Stoffe, die die Sonde selbst ausstößt.
- Die verschiedenen einfachgeladenen Moleküle haben alle grob betrachtet den gleichen Wert der atomaren Masseneinheit (amu).
- Es gibt mit CS_2^{++} auch ein Molekül, das unterschiedliche Masse aber doppelte Ladung zeigt.
- Es fällt auf, dass die Argon-Isotope nicht exakt bei 36 bzw. 38 amu liegen. Das kann in der Mittelstufe nur kurz kommentiert werden.
- Die Breite der Messungen für jedes Atom / Molekül. Hier könnte man auf den Begriff „doppelfokussierend“ kurz zu sprechen kommen. Die Breite wird auch durch die thermische Bewegung der Teilchen u.Ä. hervorgerufen.

2. Lese die Messwerte für die beiden Argon-Isotope ab und ergänze die folgende Tabelle.

Der Wert für ^{36}Ar beträgt ungefähr 10, der für ^{38}Ar ungefähr 2 pro 20s.

Verhältnis	Komet P67/TG	Erde	Sonnenwind
$^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$	<u>5</u>	5,3	5,5
$^{36}\text{Ar}/\text{H}_2\text{O}$	$(0.1 \text{ bis } 2.3) \cdot 10^{-5}$	$6.5 \cdot 10^{-8}$	--

3. In der Tabelle sind auch Messungen des Anteils von Argon im Vergleich zu einer ebenfalls gemessenen Menge an Wasser eingetragen. Eine Theorie besagt, dass ein Großteil des Wassers nachträglich durch den Zusammenstoß mit wasserreichen Kometenkernen auf die Erde gelangt ist. Was denkst Du darüber, wenn Du die Werte in der Tabelle miteinander vergleichst?

Argon ist nicht grundsätzlich auffällig. Die Verhältnisse der Isotope sind vergleichbar zum Rest des Sonnensystems. Die Wasserwerte sind aber um ca. 100-500 Mal größer als auf der Erde. Wäre nun der Komet mit seinem Wasser auf die Erde gestürzt, dann würde man auch den entsprechenden Eintrag an Argon in die Atmosphäre erwarten. Dies ist aber nicht der Fall. Man könnte sich nun vorstellen, dass das Argon durch weitere Zusammenstöße bzw. durch eine erhöhte Strahlung der Sonne zu Beginn der Sonnensystementstehung aus der Erdatmosphäre herauskatapultiert worden ist. Dann wäre aber sehr verwunderlich, dass diese Prozesse ca. 99% des Argons entfernt hätten, aber das Wasserreservoir unangetastet ließen. Siehe dazu Balsiger et al.