

GEFÖRDERT VOM



DIE VERANTWORTUNG FÜR DEN INHALT DIESER VERÖFFENTLICHUNG LIEGT BEI DEN AUTOREN

SCHLUSSBERICHT

Diamantoide und deren Derivate als alternative Treibstoffe für Ionentriebwerke

PROF. DR. PETER J. KLAR¹
PROF. DR. PETER R. SCHNEIDER²
DR. KRISTOF HOLSTE¹

JUSTUS-LIEBIG-UNIVERSITÄT GIESSEN

¹ I. PHYSIKALISCHES INSTITUT, HEINRICH-BUFF-RING 16

² INSTITUT FÜR ORGANISCHE CHEMIE, HEINRICH-BUFF-RING 17
35392 GIESSEN

18. Dezember 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	3
1.1	Einleitung und Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	5
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2	Eingehende Darstellung	8
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	8
2.1.1	DETOF-Magnetfeldkompensation	8
2.1.2	DETOF-Experiment	9
2.1.3	Positionempfindliche Teilchenmessung	10
2.1.4	Spezielle Messelektronik	12
2.1.5	Kandidatensubstanzen	13
2.1.6	DETOF-Messungen	13
2.1.7	Ionenstrahl-Massenspektrometrie	15
2.1.8	Flussregelung für Diamantan und Triamantan	15
2.1.9	Zusammenfassung	16
2.2	Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	16
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	19
2.4	Verwertbarkeit der Ergebnisse	19
2.5	Fortschritte bei anderen Stellen	20
2.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	20

1 Kurzdarstellung

Im Rahmen des Projektes wurde die Verwendbarkeit von Diamantoiden und deren Derivaten als Treibstoff für Ionentriebwerke untersucht, um eine Alternative für das zur Zeit verwendete Xenon zu finden. Diamantoide haben vielversprechende Eigenschaften, die ihren Einsatz in Ionentriebwerken rechtfertigen, wie z.B. eine hohe molekulare Stabilität, eine hohe Molekülmasse und eine geringe Ionisierungsenergie. Sie zeigen eine Reihe von untypischen chemischen und physikalischen Eigenschaften. So wird z.B. die Verwendbarkeit von Adamantan als Trägermolekül für pharmazeutisch wirksame Moleküle im Bereich der Alzheimer- und Parkinsontherapie untersucht. Auch Anwendungen im Bereich der Polymersynthese, der Nanotechnologie sowie der CVD (*chemical vapor deposition*) sind Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Diamantoide sind chemisch wenig reaktiv (verglichen z.B. mit dem ebenfalls als Treibstoff diskutierten Jod), was aus der Kugelform des mit Wasserstoff gesättigten Moleküls erklärbar ist, und liegen bei Normalbedingungen als Festkörper vor, der unter moderatem Energieaufwand sublimiert werden kann. Die Speicherung als Feststoff bringt eine Reihe von Vorteilen mit sich; so ist z.B. kein Drucktank wie beim Xenon notwendig, welcher starken Einfluss auf das Satelliten-Design hat und generell eine kritische bzw. technisch aufwändige Komponente des Satelliten darstellt. Festkörper-Speicher können in nahezu beliebiger Form in das Satelliten-Design integriert werden, wodurch das zur Verfügung stehende Transportvolumen (welches im Launcher zur Verfügung steht) optimal ausgenutzt werden kann. Diamantoide haben ferner den Vorteil, dass sie chemisch modifiziert werden können. Durch den Einbau funktionaler Gruppen kann z.B. die Ionisierungs- oder Dissoziationsenergie der Diamantoide beeinflusst werden. Dadurch können molekulare Eigenschaften hinsichtlich des Einsatzes als Treibstoff u.U. optimiert werden.

1.1 Einleitung und Aufgabenstellung

Ionentriebwerke gehören zur Gruppe der elektrischen Raumfahrtantriebe (*electric propulsion*, EP). Unter elektrischen Raumfahrtantrieben versteht man Antriebskonzepte, die durch Verwendung elektrischer Energie Schub erzeugen bzw. die Schubausbeute signifikant erhöhen (hier seien z.B. die Resistojets genannt, die den Treibstoff elektrothermisch erwärmen und dadurch die Ausstoßgeschwindigkeit erhöhen, wodurch sich die Schubausbeute relativ zum Kaltgasbetrieb signifikant erhöht) [1, 2]. Elektrothermischen Triebwerke erzeugen ihren Schub durch Erwärmen des Treibstoffs, wodurch sich eine Erhöhung des spezifischen Impulses I_{sp} erreichen lässt. Bedingt durch eine Reihe technischer Schwierigkeiten ist man jedoch limitiert, was den maximal erreichbaren I_{sp} angeht. So sind sowohl Materialaspekte (Schmelztemperatur, Materialversprödung bei Erhitzen usw.) als auch das Energiebudget zu beachten. Insbesondere bei hohen Temperaturen wird diese Art der Schuberhöhung unrentabel, da man einen Großteil der elektrischen Leistung, die man in die Temperaturerhöhung steckt, über Abstrahlung

verliert. Ionentriebwerke umgehen dieses Problem, indem sie den Treibstoff zunächst ionisieren und dann in einem zweiten Schritt über elektrische Felder beschleunigen. Da diese beiden Schritte weitgehend unabhängig voneinander verlaufen, kann man über geeignete elektrische Feldkonfigurationen sehr hohe Ausstoßgeschwindigkeiten erzeugen und zudem beide Schritte optimal aufeinander anpassen bzw. optimieren. Bei den in diesem Projekt verwendeten Ionentriebwerken handelt es sich um sog. Hochfrequenz-Ionentriebwerke (*radiofrequency ion thruster*, RIT). Bei diesen wird die Ionisation über induktive Einkopplung eines HF-Feldes in das Plasma erreicht, die Extraktion nachfolgend über ein System von Extraktionsgittern, die elektrisch vorgespannt werden können. Die für dieses Projekt relevanten Prozesse befassen sich mit der Ionisation des Treibstoffs, die Anpassung des Extraktionsgitters spielt dabei zunächst keine große Rolle. Eine der Hauptaufgaben ist es gewesen, Substanzen hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit als Treibstoff zu untersuchen. Da die Ionisation des Treibstoffs ein grundlegender Prozess ist, wurde eine Anlage aufgebaut, mit der man in der Lage ist, Ionisierungseffizienzen (= Ionisierungs-Wirkungsquerschnitte) zu messen. Verlustprozesse durch Anregung der Treibstoffmoleküle wurden in diesem Projekt nicht auf dieser fundamentalen Ebene untersucht, jedoch Fragmentierungsprozesse, die ebenfalls einen Verlustkanal bilden. Mit dieser Anlage ist man in der Lage, nahezu jeden atomaren oder molekularen Treibstoffkandidaten auf Tauglichkeit zu untersuchen. Die hierfür benötigten Stoffmengen sind hinreichend gering, so dass eine Vielzahl z.B. von Diamantoid-Derivaten, bereitgestellt von der AG Schreiner, aber auch von anderen Substanzen untersucht werden können.

1.2 Voraussetzungen

Das Projekt wurde von der AG Ionentriebwerke unter Leitung von Prof. Dr. Peter J. Klar am I. Physikalischen Institut der Justus Liebig Universität Gießen durchgeführt. Hier konnte auf die langjährige Expertise der Arbeitsgruppe im Bereich der Ionentriebwerke sowie auf die vorhandene Vakuumanlagen-Infrastruktur zurückgegriffen werden. Das Projekt wurde zusammen mit dem Institut für Organische Chemie unter Leitung von Prof. Dr. Peter R. Schreiner durchgeführt. Diese Arbeitsgruppe zählt zur weltweit führenden im Bereich der Diamantoide.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde entsprechend der Vorhabenbeschreibung durchgeführt; auf Grund der temporären Nichtbesetzung der Postdoc-Stelle am Institut für Organische Chemie wurden Personalmittel in eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung zur Finanzierung der Doktorandenstelle von Herrn Patrick Dietz umgewidmet. Für die Federführung des Projekts war Herr Prof. Dr. Peter J. Klar zuständig gewesen. Unterstützt wurde das Projekt am I. Physikalischen Institut von Herrn Dr. Kristof Holste. Durchgeführt wurden die Arbeiten von Herrn Patrick Dietz im Rahmen seines Promotionsvorhabens. Von Seiten der Chemie wurden die Arbeiten

von Frau Dr. Christine Hofmann und Herrn Dr. Christian Kühn durchgeführt; beide waren als Postdocs am Institut für Organische Chemie in der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Dr. Schreiner beschäftigt gewesen.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Innerhalb der letzten 24 Jahre wurden 208 Satelliten in eine geostationäre Umlaufbahn gebracht, wobei etwa 70% davon mit Ionentriebwerken ausgestattet waren und die bis dato verwendeten Arcjets vom Markt weitestgehend verdrängt haben [3]. Im gleichen Zeitraum wurde bei 20 Satelliten mit einem Gewicht über 100 kg EP als Antriebssystem im niedrigen Erdorbit (LEO) angewendet, wobei bedingt durch die niedrige Anforderung an Δv im LEO EP-Systeme hier traditionell eine untergeordnete Rolle spielen. Zudem sind im genannten Zeitraum sieben interplanetare Missionen mit Hilfe von EP durchgeführt worden (Deep Space 1, Hayabusa-1, SMART-1, Dawn, Hayabusa-2, PROCYON, Lisa Pathfinder). Mit Ionentriebwerken lassen sich eine Reihe fundamentaler Manöver im Orbit durchführen (Orbit-Inklinationswechsel, Lageregelung, *Station Keeping*, Formationsflüge, *Orbit Maintenance*, *Deorbiting*, *Spacecraft Detumble*). Boeing setzt seit 2012 auf das All-EP-Konzept, d.h. die ausschließliche Verwendung elektrischer Antriebssysteme im Orbit und hat dadurch einen Paradigmenwechsel auf dem kommerziellen Sektor ausgelöst. Die Idee dieses Konzepts ist es, mit chemischen Antrieben in einen sog. Transferorbit zu gelangen und von dort mit Hilfe leistungsstarker EP-Systeme den Zielorbit anzusteuern, wodurch deutliche Einsparungen an chemischen Treibmitteln erzielt werden. Andere Satelliten-Hersteller wie z.B. Ariane Group (vormals Airbus Safran Launchers) sind auf Grund der damit verbundenen deutlichen Senkung der Launchkosten gezwungen, ebenfalls auf All-EP-Systeme zu setzen, was u.a. zur Entwicklung des RIT-2X-Systems geführt hat, welches einen Hochschub-Modus bereitstellt, um möglichst schnell vom Transfer- zum Zielorbit zu gelangen. Geplante Missionen im Bereich der globalen Telekommunikation wie z.B. das OneWeb-Projekt, welches auf sog. *LEO mega constellations* setzt, d.h. auf die Verwendung von etwa 600 Satelliten im LEO zur Bereitstellung eines globalen Internet, werden mit EP-Systemen agieren. Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass EP zur Zeit das favorisierte Antriebskonzept im Weltraum ist [4]. Alle diese Antriebssysteme benötigen entsprechend einen Treibstoff zur Schuberzeugung. Als Treibstoff kommt prinzipiell jeder Stoff in Frage, der sich ohne größeren technischen Aufwand verdampfen und effektiv ionisieren lässt. Eine Zusammenstellung untersuchter Treibstoffe findet man z.B. in Ref.[5]. Bei Ionentriebwerken hat sich zunächst Quecksilber durchgesetzt, welches dann langsam in den 90er-Jahren durch Xenon ersetzt wurde. Nachteil von Quecksilber war seine metallische Natur. Da immer ein Teil des Treibstoffs als elektrisch neutrales Material auf Satellitenoberflächen kondensieren kann, war durch Quecksilber ein hohes Ausfallpotential gewisser funktionaler Gruppen wie z.B. den Solarpanelen gegeben. Xenon hat als inertes Gas den Vorteil, dass es nicht mit Oberflächen reagiert und somit keine Beschädigungen nach sich zieht. Man erkaufte

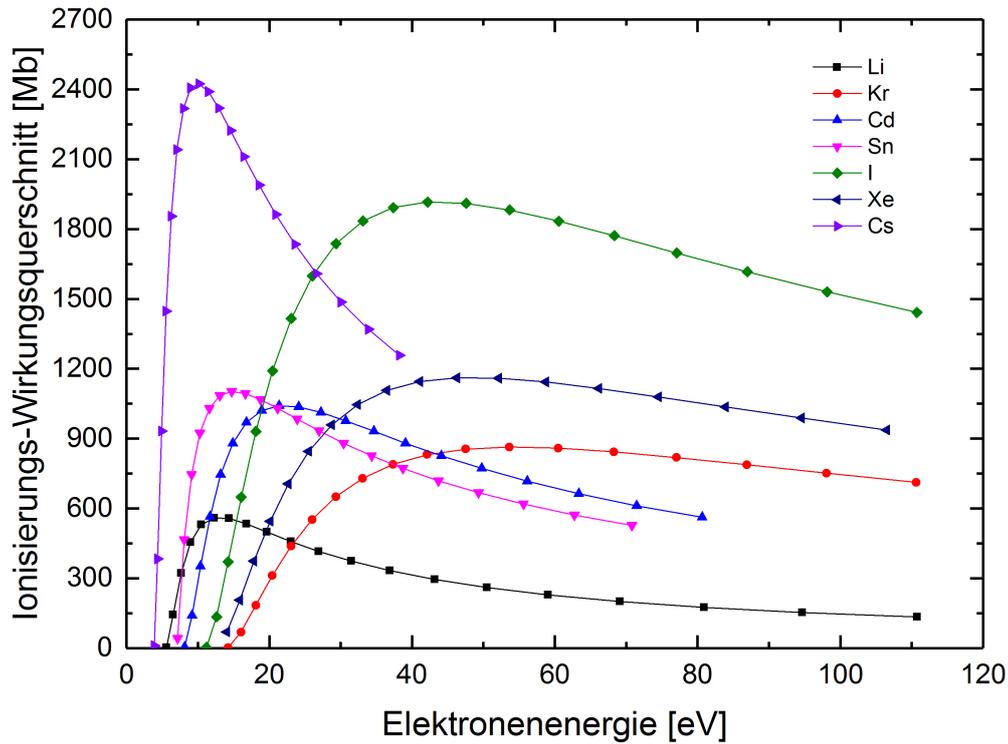


Abbildung 1: Auswahl einiger berechneter Ionisierungs-Wirkungsquerschnitte aus dem atomaren Spektrum, die für EP-Systeme in Betracht gezogen wurden.

sich allerdings dieses chemisch träge Verhalten über ein erhöhtes Ionisierungspotential und - im Vergleich zu vielen anderen Elementen - moderaten Ionisierungsquerschnitt. In Abb. 1 sind eine Reihe von berechneten atomaren Ionisierungsquerschnitten zusammengefasst. Die Rechnungen wurden mit Hilfe des LANL-Codes (*Los Alamos National Laboratory Code*) durchgeführt, welcher auf dem bekannten Cowan-Code basiert. Man sieht deutlich, dass es bei der Beurteilung eines Treibstoffs hinsichtlich seiner Ionisierungseffizienz zwei Faktoren gibt: die Ionisierungsschwelle und den absoluten Verlauf des Wirkungsquerschnitt. Anzustreben sind niedrige Schwellenwerte bei hohen Absolutwerten, um effektiv, d.h. energieeffizient, zu ionisieren. Ein weiterer wichtiger Aspekt betrifft die technische Seite: der Treibstoff muss einfach zu verdampfen sein, d.h. bei moderaten Temperaturen in die Gasphase übergehen, ohne dabei die Peripherie thermisch zu stark zu belasten. Zudem spielen praktische Aspekte wie ein geringes gesundheitliches Risikopotential eine nicht zu unterschätzende Rolle. Da eine der Hauptproblematiken bei Xenon auch der sehr hohe Preis ist (> 1500 Euro pro kg) sollte eine Alternative auch einfach zu bekommen und entsprechend günstig sein (bei hoher chemischer Reinheit). Im Bereich der atomaren Treibstoffkandidaten gibt es daher zum Xenon kaum richtige Alternativen, viele Arbeiten auf diesem Gebiet beschäftigen sich daher z.B. mit den leichteren Edelgasen wie Krypton und Argon. Diese haben aber höhere Ionisierungsschwellen und deutlich geringere atomare Massen. Bereits bei Krypton wird die

Schubeffizienz nur aufgrund der geringeren Masse des Kryptonatoms um etwa 25% geringer sein. Der Ansatz, der in diesem Projekt verfolgt wurde, ist die Ausdehnung des Spektrums alternativer Treibstoffe in den molekularen Bereich. Als aussichtsreiche Kandidaten wurde die Stoffklasse der Diamantoide identifiziert, da sie die grundlegenden Eigenschaften eines idealen Treibstoffs erfüllen, d.h. sie sind leicht in die Gasphase zu bringen, haben eine vergleichbare Masse wie Xenon, haben niedrige Ionisierungsschwellen, sind kostengünstig und liegen bei Standardbedingungen als Feststoff vor. Durch die spezielle räumliche (diamantgitterartige) Struktur der Diamantoidmoleküle bilden sie die stabilsten Verbindungen im Bereich der Kohlenwasserstoffe. Die Fragestellungen sind demnach: Wie stabil sind diese Moleküle, wenn sie mit den Elektronen im Plasma wechselwirken? Welche Reaktionskanäle sind möglich und wie effektiv sind diese Kanäle als Funktion der Elektronenenergie? Hierzu wurde im Projekt ein Experiment aufgebaut, welches in der Lage ist, diese Fragestellungen zu beantworten. Dabei handelt es sich um ein sog. DETOF-Experiment (*delayed extraction time of flight*), bei dem ein Elektronenpuls definierter Energie und Ladungsmenge durch eine Gasstrecke bekannter Teilchendichte geschickt wird (das Gas ist in diesem Fall der zu untersuchende Treibstoff). Dabei entstehende geladene Gasteilchen können aus einem definierten Wechselwirkungsbereich über einen Hochspannungspuls auf einen Teilchendetektor gelenkt und dort nachgewiesen werden. Über eine entsprechend lange Flugstrecke vom Entstehungsort der Teilchen zum Detektor erfolgt eine Massentrennung, um z.B. energiselektive molekulare Fragmentation zu untersuchen. Details zu diesem Experiment sind in Kapitel 2 zu finden.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde ohne Zusammenarbeit mit anderen Stellen durchgeführt.

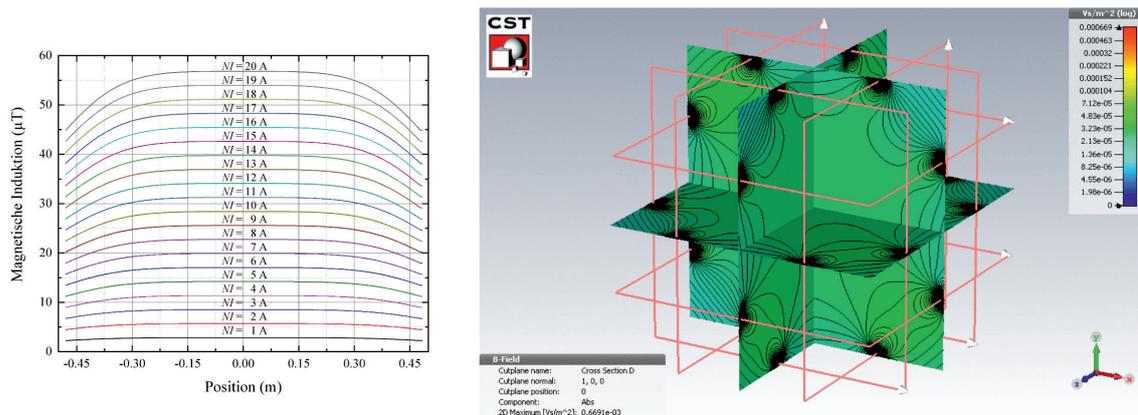


Abbildung 2: Auslegung der Magnetfelder in x-y-z-Richtung zur Kompensation des Erdmagnetfelds. Typische Ionisierungsschwellen für Atome und Moleküle liegen in der Größenordnung einiger eV. Bei diesen geringen Elektronenenergien muss das Erdmagnetfeld signifikant reduziert werden, um eine annähernd gerade Trajektorie durch das Experiment zu ermöglichen. Für das DETOF-Experiment wurde ein System von drei Helmholtz-Spulenpaaren entwickelt, das eine solche Kompensation ermöglicht. Eine dazu angepasste Spulenstrom-Regleinheit wurde von der Elektronikwerkstatt des Fachbereichs entwickelt.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Zuwendung wurde für den Aufbau eines Experiments zur Untersuchung der Verwendbarkeit von Diamantoiden und deren Derivaten als Treibstoff für Ionentriebwerke genutzt. Die Diamantoide wurden von der AG Schreiner am Institut für Organische Chemie synthetisiert, aufgereinigt und bereitgestellt. Parallel dazu wurden Experimente mit einem Ionentriebwerk unter Verwendung von reinen Diamantoiden durchgeführt. Hierzu wurde das Experiment für die Strahldiagnose entsprechend optimiert, um eine Massenspektrometrie des extrahierten Ionenstrahls zu ermöglichen. Die erzielten Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten präsentiert.

2.1.1 DETOF-Magnetfeldkompensation

Für das DETOF-Experiment musste zunächst eine geeignete Möglichkeit der Kompensation des Erdmagnetfeldes gefunden werden, da sich ansonsten der Elektronenstrahl aufgrund der Lorentzkraft auf einer Kreisbahn bewegen und nicht den Detektor treffen würde. Hierzu wurde eine Konfiguration von drei rechteckigen Helmholtz-Spulenpaaren gewählt, die eine Kompensation des Erdmagnetfeldes (und anderer Feldquellen) in allen drei Raumrichtungen innerhalb der Laufstrecke des Elektronenstrahls ermöglicht. Als relevante Länge wurde die Größe der Vakuumkammer (CF-160 Doppelkreuz; Länge etwa 40 cm) abzüglich der Position des Faraday-Cups genommen; die relevante Länge ergibt sich damit zu etwa 25 cm. Wie man in Abb. 2 sehen kann, ist damit zunächst eine hinreichende Homogenität der magnetischen Felder

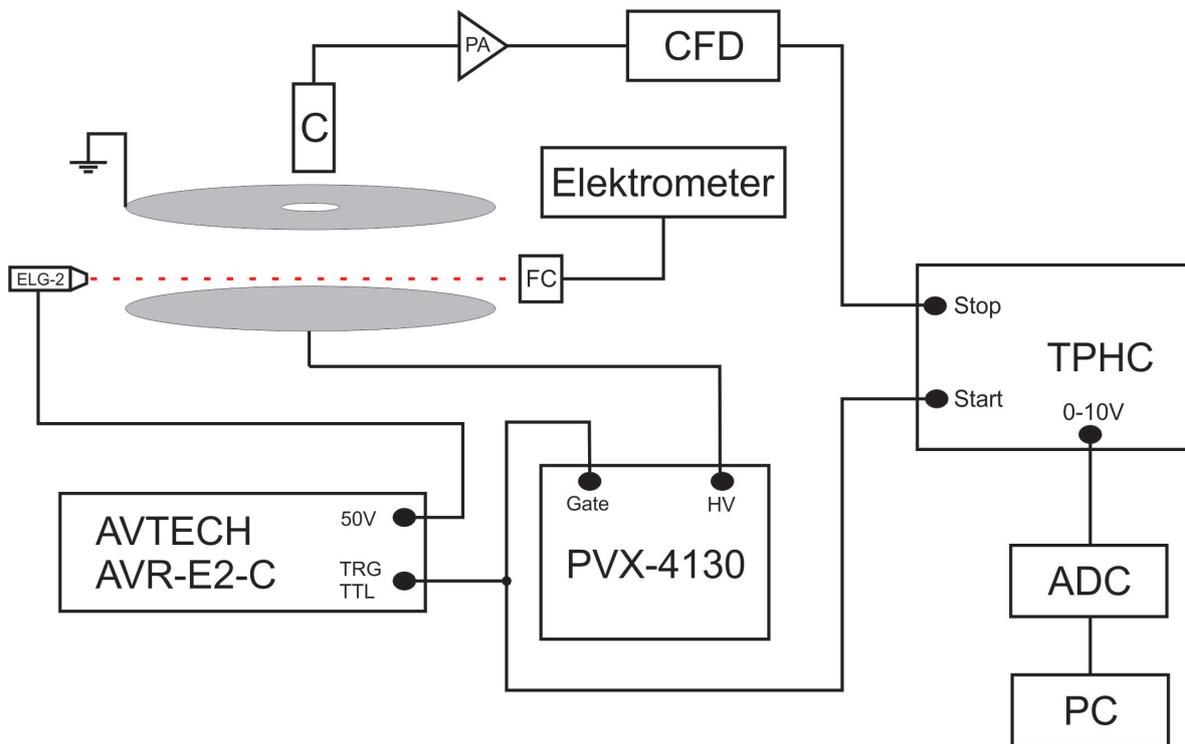


Abbildung 3: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus des DETOF-Experiments. Die Steuerung des Experiments sowie die Flugzeitmessung erfolgt über geeignete NIM-Module. Zeitmessungen werden mittels eines Analog-Digital-Wandlers (ADC) über eine digitale I/O-Karte in einem PC akkumuliert.

gewährleistet. Es hat sich bei den Experimenten gezeigt, dass bedingt durch Magnetfelder, die z.B. durch magnetische Schrauben oder das mechanische Lager der Turbopumpe auftreten, eine vollständige Kompensation schwerlich möglich gewesen ist, so dass sich die Methode der Spulenpaare zur Abschirmung ab Elektronenergien > 30 eV geeignet hat. Unterhalb dieser Energie waren die Messwerte zur Bestimmung absoluter Ionisierungsquerschnitte nicht zuverlässig; Fragmentierungsanalysen sind dennoch auf einer qualitativen Ebene möglich gewesen. Eine vollständig magnetisch abgeschirmte Kammer (z.B. aus μ -Metall) wurde hier als mögliche Lösung identifiziert.

2.1.2 DETOF-Experiment

In Abb. 3 ist der experimentelle Aufbau des DETOF-Experiments schematisch dargestellt. Das gesamte Experiment ist in einem CF-160-Doppelkreis eingebaut. Das Doppelkreis wurde mitsamt dem Vakuumsystem auf ein passendes Gestell aus Item-Industrieprofilen integriert. Das System verfügt über eine Turbomolekularpumpe (300 l/s) sowie eine Scroll-Vorpumpe, um ein ölfreies Vakuum zu erzeugen. Die Vakuumkammer ist mit Heizbändern ausgestattet, die ein Ausheizen des Systems ermöglichen, um einen möglichst geringen Basisdruck zu realisieren. Typische Basisdrücke nach dem Ausheizen liegen bei $< 2.0 \times 10^{-9}$ mbar. Das Ausheizen der

Vakuumkammer ist notwendig, um die Oberflächen von ihrer Wasseradsorptionsschicht zu befreien, da ansonsten Wasserdampf auch bei geringen Partialdrücken mit hoher Effizienz als Untergrundsignal bei den Messungen auftritt. Elektronen werden in einer kommerziellen Elektronenkanone (ELG-2; Fa. Kimball Physics; Energie 1 bis 2000 eV; Ströme: 1 nA bis 10 μ A, gaußförmiger Strahl; Energiebreite: 0.5 eV) über thermionische Emission erzeugt. Die Kanone kann in einem kapazitiven Pulsmodus betrieben werden. Über einen Pulsgenerator (Fa. AVTECH; AVR-E2-C;) können Pulsbreiten von etwa 20 ns bei Anstiegszeiten < 1 ns erreicht werden. Die Repetitionsfrequenz bei den Experimenten liegt in der Größenordnung von etwa 3 kHz. Die Elektronenpakete werden durch einen Plattenkondensator (runde Platten; Durchmesser 15 cm) geschickt und in einem nachfolgend angebrachten Faraday-Cup als elektrischer Strom mit Hilfe eines Elektrometers gemessen. Die gesamte Vakuumkammer wird über ein Nadelventil mit dem Targetgas gefüllt; typischer Betriebsdruck während der Experimente liegt bei 1.0×10^{-5} mbar. Der Druck bzw. die Teilchendichte wird so gewählt, dass die Einzelstoßbedingung erfüllt ist, d.h. von allen Elektronen innerhalb eines Pulses wird maximal nur eine Kollision mit einem Targetteilchen stattfinden. Etwa 200 ns, nachdem der Elektronenpuls getriggert wurde, wird auf die untere Platte des Kondensators ein positive Hochspannungspuls (etwa 3 kV, Pulsbreite 4 μ s) gegeben. Damit werden alle positiv geladenen Reaktionsprodukte innerhalb des Kondensators auf die obere Platte beschleunigt. Über eine zentrale Öffnung der oberen Platte (Durchmesser 2 cm) werden alle Produkte, die unterhalb dieser Öffnung gebildet werden, auf einen Einteilchendetektor beschleunigt und dort nachgewiesen. Als Detektor kommen Channeltrons bzw. Mikrokanalplatten in Frage. Das dort erzeugte Signal (negativer Spannungspuls) wird über einen Vorverstärker aufbereitet und in einem *Constant-Fraction*-Diskriminator (CFD) weiterverarbeitet. Die eigentliche Zeitmessung findet mit Hilfe eines TPHC (*time-to-pulse height converter*) statt. Über das Trigger-TTL-Signal des AVTECH-Pulsgenerators wird eine Zeitmessung gestartet; das Signal des CFDs wird als Stop-Signal genommen. Sofern innerhalb eines eingestellten Zeitintervalls ein Stop-Signal am TPHC ankommt, gibt dieser einen Spannungspuls aus, dessen Höhe der Flugzeit entspricht. Diese Flugzeiten werden über einen ADC gezählt, die Messung mittels einen PC dargestellt. Für dieses Experiment wurde eine Linux-basierte Software entwickelt, die mit der schnellen Datenaufnahme (kHz-Bereich) zurechtkommt. Die Neutralteilchendichte wird mit einer kommerziellen kapazitiven Messeinheit (Fa. MKS) vorgenommen, die in der Lage ist, gasartunabhängig Drucke im genannten Bereich zu messen.

2.1.3 Positionsempfindliche Teilchenmessung

Für den Nachweis der durch Elektronenstoß erzeugten Teilchen wurde ein MCP-Detektor der Fa. Quantar Technology verwendet. Dieser besteht aus zwei Mikrokanalplatten (MCPs) in Chevron-Anordnung mit nachgeschalteter resistiver Anode. Die Anode ermöglicht durch Messung des Stromes, der an ihren vier Ecken abfließt, eine Bestimmung des Auftreffortes auf der Oberfläche.

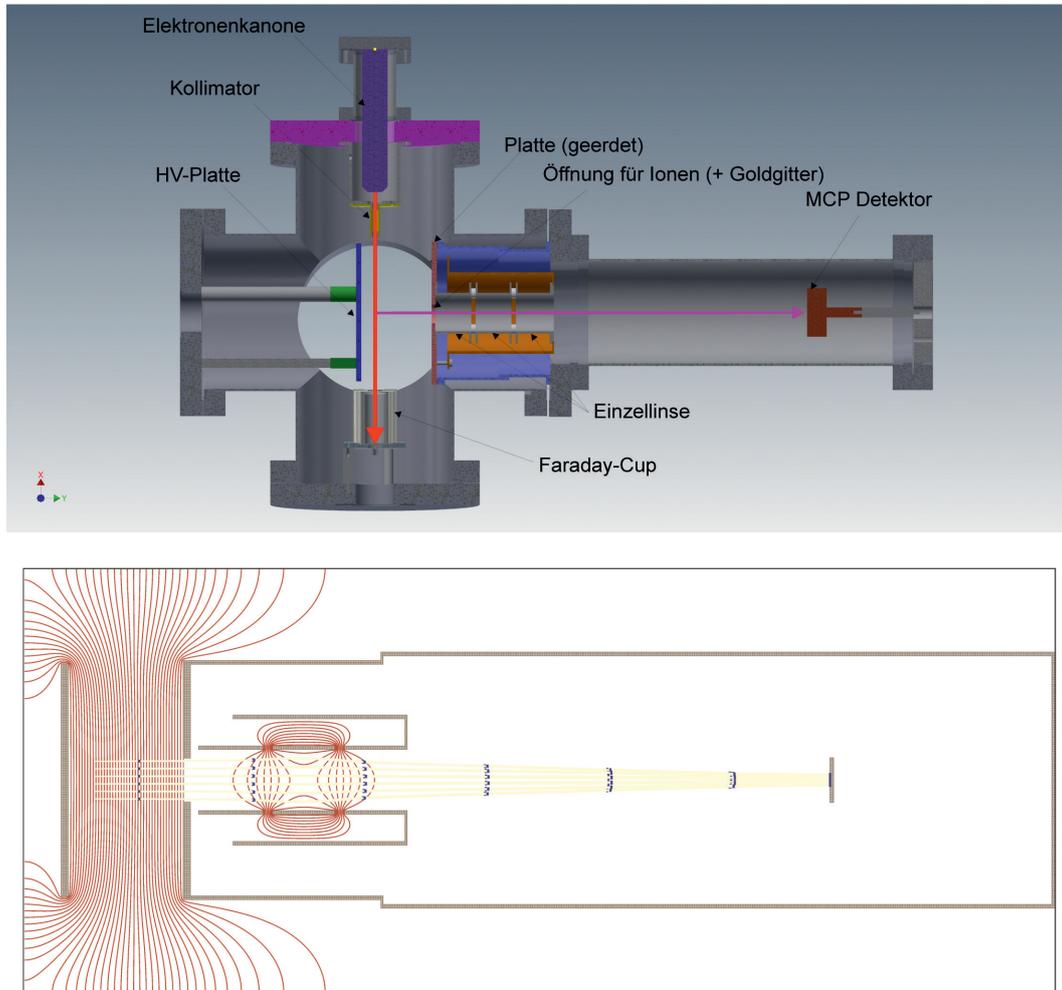


Abbildung 4: (Oben) CAD-Zeichnung des DETOF-Experiments mit allen verbauten Einheiten (außer Druckmess-System). (Unten) Simulation des Experiments mit SIMION. Im Bereich der feldfreien Flugstrecke ist eine Einzellinse verbaut, die eine Nachfokussierung der Teilchen erlaubt. Dies mag nötig sein, um durch Randfelder erzeugte leichte Bahndivergenzen auszugleichen. Als Detektor ist ein MCP-Detektor verbaut, der einen positionsempfindlichen Teilchennachweis ermöglicht. Die Auftreffpunkte der Teilchen auf der Detektoroberfläche werden mit einem Positionscomputer gemessen, die entsprechenden Orte mit Hilfe einer selbstgeschriebenen LabView-Software gezählt und in einem Histogramm dargestellt. Die Öffnung der geerdeten Platte ist mit einem hochtransparenten Goldgitter ausgestattet, um Feldverkrümmungen auszugleichen. In der Simulation sind Zeitmarker (blaue Punkt) mit Zeitabständen von $1 \mu\text{s}$ sowie zwei verschiedene Teilchenmassen (101 und 102 atomare Masseneinheiten) dargestellt, die mit der gewählten Flugstrecke von etwa 40 cm zeitlich getrennt dargestellt werden können.

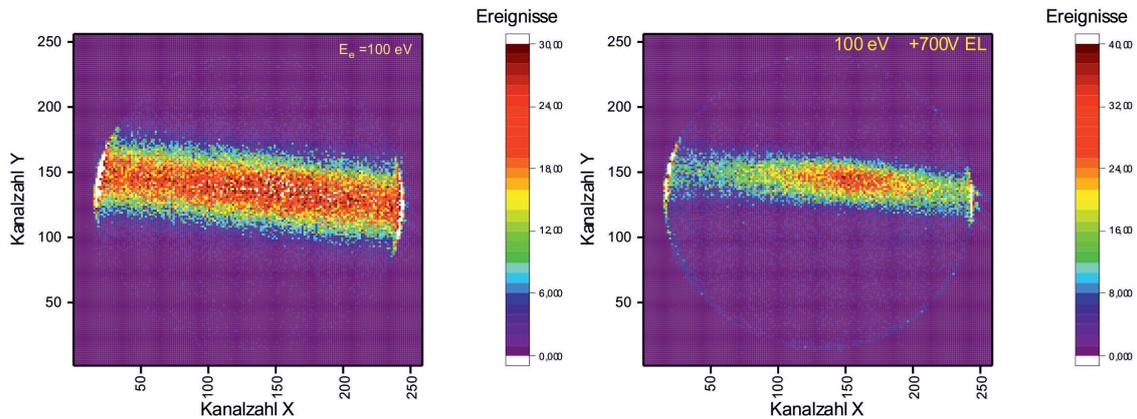


Abbildung 5: Positionsempfindlicher Nachweis der durch Elektronenstoß erzeugten Ionen auf der Oberfläche des MCP-Detektors ohne (links) und mit (rechts) Nachfokussierung durch die Einzellinse. Mit einer solchen Positionsmessung der auftreffenden Teilchen, die durch Elektronenstoß erzeugt wurden, kann die Elektronenbahn durch den Kondensator abgebildet werden und erlaubt eine Bestimmung der Wechselwirkungslänge, die mit dem Detektor abgebildet werden. Diese Größe ist fundamental für die Messung von Wirkungsquerschnitten auf absoluten Skalen.

Diese Analyse wird mit einem Positionscomputer der Fa. Surface Science Labs (Modell 2401) durchgeführt. Dieser ermöglicht das Auslesen der Positionen über eine digitale I/O-Karte, die in einem Messcomputer verbaut ist. Die Position wird dabei in 256 Positionsinformationen pro Achse ausgegeben. In Abb. 5 sind beispielhaft zwei solcher Messungen dargestellt, einmal ohne (links) und einmal mit Nachfokussierung (rechts) durch die Einzellinse. Für die Messung absoluter Wirkungsquerschnitte ist die genaue Kenntniss der Ansprechwahrscheinlichkeit des MCP-Detektors notwendig; dieser liegt typischerweise in der Größenordnung von 60%, was in etwa der Transparenz der Mikrokanalplatten entspricht. Dieser Wert wurde durch Vermessung bekannter Wirkungsquerschnitte, z.B. von Argon, bestätigt. Da es sich allerdings um eine teilchenartabhängige Größe handelt, sind u.U. weiterführende Messungen für unbekannte Teilchenspezies notwendig, um die Messunsicherheit zu minimieren.

2.1.4 Spezielle Messelektronik

Bei der Inbetriebnahme des Experiments hat sich gezeigt, dass die hohe Sensitivität des MCP-Detektors Fehlmessungen auslösen kann, wenn der Hochspannungspuls auf die Kondensatorplatte gegeben wird. Dies liegt daran, dass die typischen Anstiegszeiten dieser Pulse in der Größenordnung einiger Nanosekunden liegen, in der hohe Ströme (einige Ampere) fließen. Diese Schaltströme induzieren elektromagnetische Felder, die vom Detektor registriert und als Mess-Signal interpretiert werden. Um diese Störungen von den eigentlichen Signalen zu trennen, wurde eine spezielle Filterschaltung entwickelt (siehe Abb. 6), die die Amplituden der Störungen deutlich reduziert, so dass über die passende Einstellung der Diskriminator-

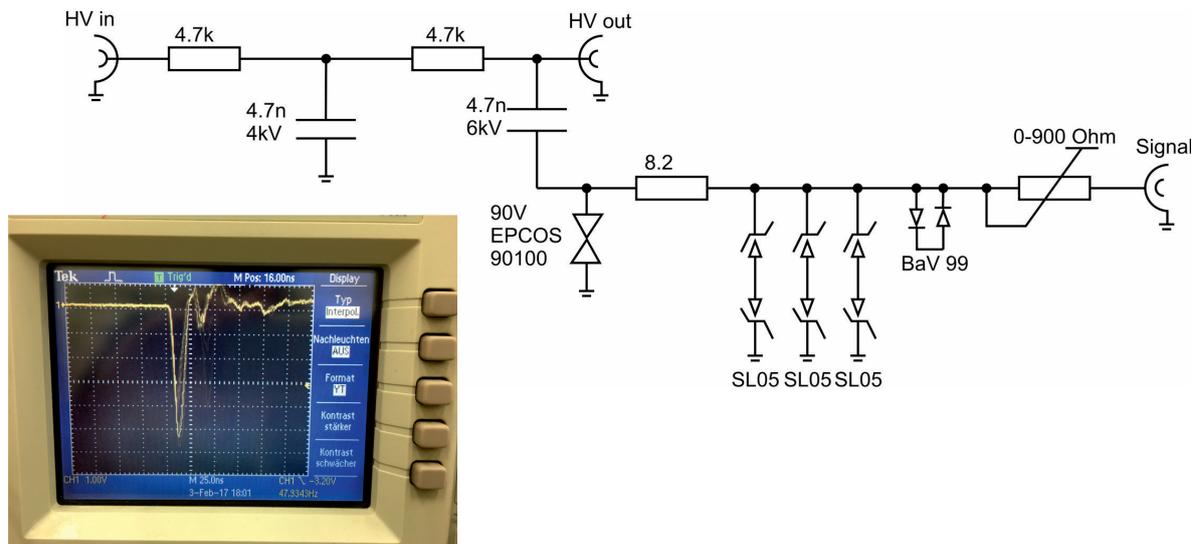


Abbildung 6: Filterschaltung zur Reduzierung störender Signale ausgelöst durch den Hochspannungspuls auf die Kondensatorplatte sowie Darstellung eines typischen Mess-Signals mit einem Oszilloskop.

schwelle des CFD der störender Einfluss auf die Messung unterdrückt werden kann. Mit dieser Filterschaltung sind die Mess-Signale in etwa 20 ns breit, was der typischen Signalbreite von MCP-Signalen entspricht und keine Verschlechterung der Zeitauflösung zur Folge hat.

2.1.5 Kandidatensubstanzen

Neben den sog. Basis-Diamantoiden (Adamantan, Diamantan, Triamantan) wurden vom Institut für Organische Chemie weitere Substanzen in hochreiner Form in hinreichender Menge für das DETOF-Experiment zur Verfügung gestellt, z.B. 1-Fluoradamantan, 1-Methyladamantan und Di-Adamantan. Hier war die Idee zunächst den Einfluss der Veränderung der Molekülstruktur durch Einbau einer funktionalen Gruppe auf die Stabilität des Moleküls zu untersuchen. So könnte z.B. durch Einbau einer Sollbruchstelle eine gezielte Dissoziation des Moleküls in mindestens ein positiv geladenes Fragment mit geringem Energieaufwand erreicht werden.

2.1.6 DETOF-Messungen

Das DETOF-Experiment wurde zunächst mit Argon und Methan in Betrieb genommen, da für diese Systeme die Elektronenstoß-Ionisierungsquerschnitte mit hoher Genauigkeit bekannt sind. Insbesondere für Argon konnte der Wirkungsquerschnitt für den Prozess $\text{Ar} + e^- \rightarrow \text{Ar}^+ + 2e^-$ mit guter Genauigkeit nachgemessen werden. Mit Methan wurde die energieabhängige Dissoziation des Moleküls in Fragmente CH_3^+ , CH_2^+ , CH^+ und C^+ vermessen (siehe Abb. 7 (links)). Gerade für diese leichten Fragmente konnte eine sehr gute Massenauflösung erreicht werden. In Abb. 7 (rechts) ist exemplarisch ein Massenspektrum für Adamantan bei einer Energie von

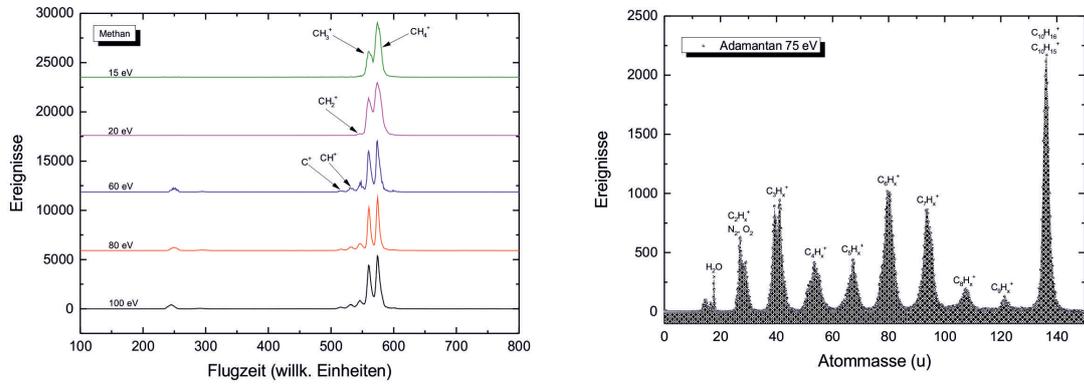


Abbildung 7: (Links) Energieabhängige Dissoziation von Methan. (Rechts) Massenspektrum von Adamantan bei einer Elektronenenergie von 75 eV.

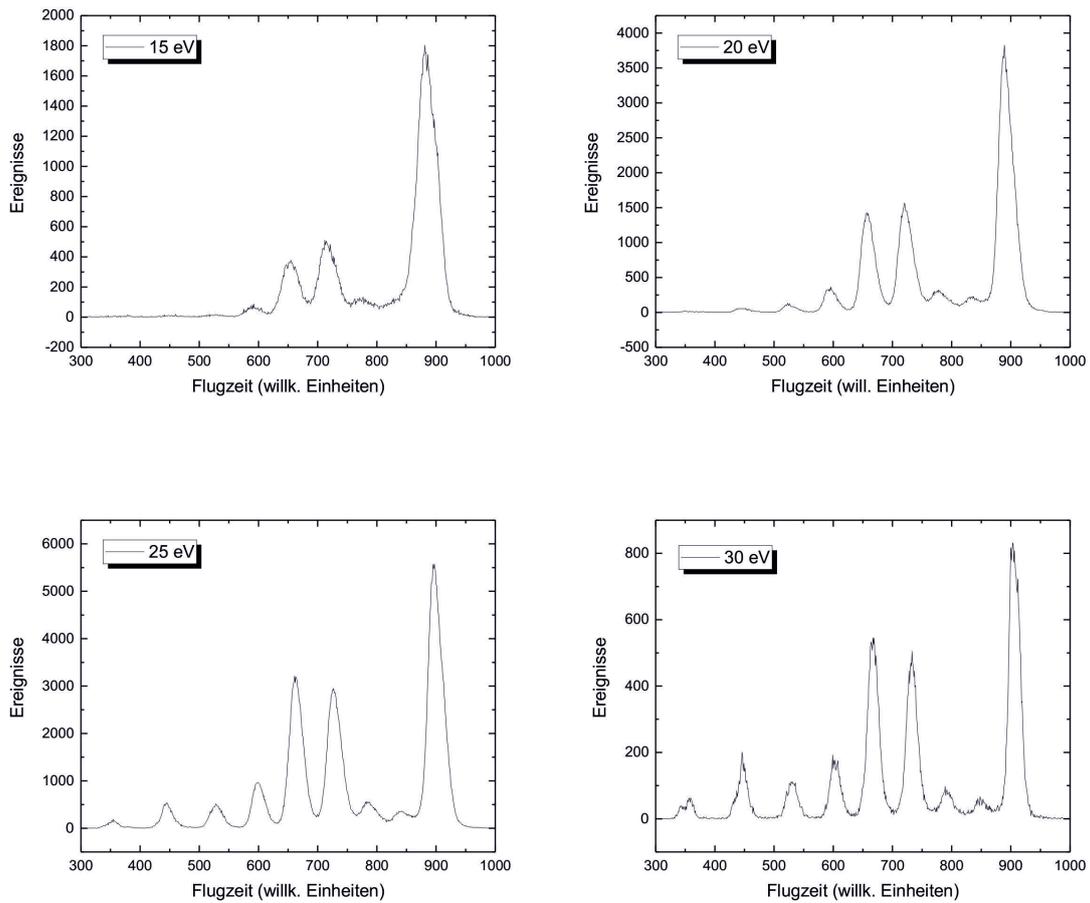


Abbildung 8: Energieabhängige Dissoziation des Adamantan-Moleküls für vier ausgewählte Energien.

75 eV dargestellt. Hier hat sich gezeigt, dass sich trotz der in der Simulation hinreichend langen Flugstrecke keine optimale Massenauflösung erreichen ließ. Diese Problematik ließ sich innerhalb des Projektzeitraums nicht lösen; Lösungsansätze werden in einer weiteren Optimierung der Messelektronik vermutet. In Abb. 8 ist für vier ausgewählte Energien die Dissoziation des Moleküls durch Elektronenstoß gezeigt. Bei einer typischen Elektronentemperatur von einigen Elektronenvolt im Plasma eines Iontriebwerks werden diese hoch erscheinenden Elektronenenergien bedingt durch den exponentiellen Auslauf der Maxwell-Boltzmann-Verteilung der Elektronenenergien von einigen Elektronen erreicht.

2.1.7 Ionenstrahl-Massenspektrometrie

Ein weiterer Teil des Projektes hatte den Ausbau der Anlage zur Ionenstrahl-Massenspektrometrie sowie den Betrieb von einem Iontriebwerk im Mischgasbetrieb zum Inhalt. Für das Strahl-Massenspektrometer wurde ein Gerät zur präzisen Messung des Magnetfeldes im Dipolmagnet mitsamt einer Mess-Sonde gekauft und installiert. Für den Mischgasbetrieb eines RITs wurde das Treibstoff-Versorgungs-System so modifiziert, dass man das Triebwerk primär mit einem Supportgas (Argon oder Xenon) betreiben und geringe Mengen an Diamantoiden beimischen kann. Eine Schwierigkeit, die überwunden wurde, war ein Konflikt in den Regelmechanismen der verwendeten Massenflussregler. Während man für Argon bzw. Xenon typischerweise etwa 1 bar Vordruck auf den MFC gibt, hat man bei Diamantoiden nur einige 10 mbar auf der Vordruckseite. Da sich der Druck hinter dem MFC nicht deutlich vom Vordruck bei den Diamantoiden unterscheidet, gab es zunächst Regelungsschwierigkeiten. Durch passende Gaswiderstände konnte dennoch ein Mischgasbetrieb erreicht werden. Hier hat sich in den gemessenen Ionenstrahl-Massenspektren gezeigt, dass die Diamantoiden im Plasma signifikant dissoziieren. Dies lag v.a. daran, dass die Ionisierungsenergien für Argon und Xenon deutlich höher sind als für typische Diamantoiden (Argon: 15.7 eV; Xenon: 12.1 eV; Adamantan: 9.2 eV), währenddessen die ersten Dissoziationsenergien z.B. bei Adamantan bei etwa 10.6 eV liegen. Für die Aufrechterhaltung eines Argon- bzw. Xenon-Plasmas sind die erforderlichen Elektronentemperaturen daher zu hoch, wodurch die deutliche Fragmentierung der Moleküle zustande kommt. Lösungsansatz war hier eine Vermeidung des Gasmischbetriebs; die erforderlichen Informationen lassen sich prinzipiell mit der DETOF-Anlage messen.

2.1.8 Flussregelung für Diamantan und Triamantan

Die entwickelte Massenfluss-Regeleinheit ist prinzipiell geeignet, ein Triebwerk mit Adamantan und Diamantan zu versorgen. Der MFC kann bis etwa 150°C beheizt werden, um Resublimation des Materials zu verhindern, was für beide Moleküle hinreichend hoch ist, da der MFC der heißeste Punkt der Regeleinheit ist (das Reservoir ist typischerweise 10°C kälter, um eine mögliche Kondensation in Richtung des Reservoirs zu erzwingen). Es hat sich beim alleinigen Betrieb des RIT mit Adamantan gezeigt, dass auch dort eine zu starke Fragmentation auftritt.

Abschätzungen der Elektronenenergien aus der Position des Adamantan-Peaks im Strahl-Massenspektrum haben ergeben, dass die Elektronenenergien sogar etwas höher sind als beim Betrieb mit Xenon. Die Ursache für diesen unerwartet hohen Wert konnten nicht abschließend geklärt werden. Vermutet wird, dass der verwendete Hochfrequenzgenerator, der für den Betrieb mit Xenon optimiert ist, zu einer zu starken Aufheizung des Adamantan-Plasmas führt. Insbesondere die elastischen Stoßquerschnitte von Adamantan und Xenon dürften deutlich verschieden sein, so dass hier optimale Betriebsparameter in weiterführenden Studien gefunden werden müssen.

2.1.9 Zusammenfassung

Eine Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse findet sich in Tab. 1.

2.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Eine Auflistung der Positionen des zahlenmäßigen Nachweises findet sich in Tab. 2. Für das Projekt wurden insgesamt 240.000,00 EURO bewilligt. Im Projekt verausgabt wurden 200.801,29 EURO. Im Detail sind Investitionen (Pos. 0850) getätigt worden für:

- Gaussmeter Modell 8010 inkl. Tranversalfeld-Mess-Sonde; Fa. Cunz GmbH
- Elektronenkanone mit Steuergerät; Fa. Kimball Physics (zusätzlich hierzu EUST, Zoll)
- Open-Face MCP/RAE Detektor; Fa. Quantar Technology (zusätzlich hierzu EUST, Zoll)

Personalausgaben (Pos. 0812) sind getätigt worden für:

- Doktorandenstelle Patrick Dietz (01.11.2015 bis 30.06.2016) 50% TV-H-13
- Postdoc-Stelle Christine Hofmann (01.11.2015 bis 31.03.2016) 100% TV-H-13
- Postdoc-Stelle Christian Kühn (01.04.2016 bis 30.06.2016) 100% TV-H-13
- Postdoc-Stelle Waldemar Gärtner (01.01.2016 bis 31.3.2017) 100% TV-H-13

Im Detail sind Sachkosten (Pos. 0843) entstanden für:

- Jod 99.5%, Fa. Carl Roth GmbH
- Hartferrit-Magnete; Fa. IBS Magnet
- Diverse Swagelok-Verschraubungen; Fa. B.E.S.T. GmbH
- Diverse Cu-Dichtungen und O-Ringe; Fa. Trinos GmbH
- LaB₆-Röhrchen; Fa. Sindlhauser Materials GmbH

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse und Erfüllung der Meilensteine (nach Zeitplan)

Regeleinheit Diamantan entwickelt bzw. angepaßt	erfolgreich
Fragmentationsanalyse für Adamantan und Diamantan	erfolgreich für Adamantan; wegen unerwartet hoher Fragmentation von Adamantan nicht für Diamantan durchgeführt. Ziel hier zunächst: Auffinden optimaler Betriebsbedingungen
Prototypen entwickelt	teilweise erfolgreich; simulative Auslegung eines Prototypen durchgeführt, jedoch kein mechanischer Aufbau, da auch hier zunächst der Schwerpunkt im fragmentationsarmen Betrieb mit Adamantan liegt
Performance-Mappings für Dia- und Triamantan (RIT-4)	nicht erfolgreich; siehe vorige Punkte
Identifikation dreier bester Kandidaten	erfolgreich
Bereitstellung dreier bester Kandidaten	erfolgreich
Konzeption und Synthese optimierter Diamantoide	erfolgreich
Angepasstes optimiertes Diamantoid	noch nicht abschließend erfolgt; dieser Punkt wird im Anschlussprojekt „Systematische Suche nach alternativen Treibstoffen für Iontriebwerke“ nach Umbau des DETOF-Experiments durchgeführt
Regeleinheit Mischgasbetrieb	erfolgreich; Mischgasbetrieb hat sich allerdings als bedingt tauglich erwiesen; hier bietet sich das DETOF-Experiment als Alternative an
Aufbau Experiment Wirkungsquerschnitte (DETOF)	erfolgreich
Fragmentationsanalyse Mischgasbetrieb	erfolgreich; jedoch Hinweis auf die bereits erwähnte bedingte Tauglichkeit des Mischgasbetriebs

Tabelle 2: Auflistung der Ausgaben

Posten	Bewilligt (insg.)	Ausgabe
2015		
0812 Personal	176.561,14	16.354,28
0843 Verbrauch	17.239,91	4.397,22
0850 Investitionen	43.048,95	34.206,69
0831 Gegenstände < 400 EURO	3.150,00	1.529,52
2016		
0812 Personal	176.561,14	120.579,81
0843 Verbrauch	17.239,91	15.283,39
0850 Investitionen	43.048,95	8.450,38
0831 Gegenstände < 400 EURO	3.150,00	0,00
2017		
0812 Personal		32.320,23
Gesamt	240.000,00	233.121,52

- AX05 Bornitrid; Fa. Saint-Gobain
- Reduzier- und Übergangsstück; Fa. Trinos GmbH
- PVC-Schlauch; Fa. VACOM GmbH
- Laborgase; Fa. Air Liquide GmbH
- Diverse Vakuumbauteile; Fa. LewVac
- Frachtkosten sowie Bankspesen

Für Gegenstände < 400 EURO (Pos. 0831) sind Kosten entstanden für:

- Heizschnüre; Fa. BriskHeat Corp.

Für Verbrauch (Pos. 0838) sind Kosten entstanden für:

- Chemikalien für AG Schreiner
- SHV-Stecker und Verbinder (Elektronikwerkstatt)
- Kabelkonfektionierung Heizbänder (Elektronikwerkstatt)
- Item-Gestell für DETOF-Experiment (Feinmechanische Werkstatt)
- Bauteile für Ionentriebwerk RIM-10 (Feinmechanische Werkstatt)
- Bauteile für Hohlkathode (Feinmechanische Werkstatt)
- Kabelkonfektionierung für KING-Stecker (DETOF-Anlage)(Elektronikwerkstatt)
- Aufbau Messbox-Einteilchendetektor (Elektronikwerkstatt)

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten haben zur Entwicklung bzw. zum Ausbau von Testanlagen geführt, mit deren Hilfe eine systematische Suche nach alternativen Treibstoffen für Ionentriebwerke durchgeführt werden kann. Entsprechende Untersuchungen werden von nationalen und internationalen Raumfahrtagenturen gefordert und sind dementsprechend notwendig für Weiterentwicklungen und Kommerzialisierung in großem Maßstab von elektrischen Raumfahrtantrieben.

2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Mit den in diesem Projekt aufgebauten Experimenten lassen sich systematische Untersuchungen durchführen, um Kandidaten für alternative Treibstoffe zu finden. Der große Vorteil des DETOF-Experiment besteht in der Verwendung kleinster Stoffmengen und erlaubt daher, eine Vielzahl von Materialien zu charakterisieren. Der Aufbau eines beheizbaren Massenfluss-Regelsystems für sublimierende Treibstoffe ermöglicht die Verwendung geeigneter Kandidatensubstanzen in einem Ionentriebwerk. Die aufgebaute Ionenstrahl-Massenspektrometrie ermöglicht die Bestimmung der Fragmentverteilung im Ionenstrahl und gibt wichtige Rückschlüsse auf die Masseneffizienz des verwendeten Triebwerks bzw. Treibstoffs. Die mechanische Auslegung der Treibstoffzufuhr (z.B. durch passende Rohrleistungsdimensionen und geeignete Gaswiderstände) ist ein wichtiger Aspekt, um in weiterführenden Studien eine vakuum(=weltraum)taugliche Massenfluss-Regelung zu konstruieren. Von den Raumfahrtagenturen wird momentan verstärkt die Untersuchung von Jod als Treibstoff gefordert. Aufgrund der ähnlichen Materialeigenschaften verglichen mit den Diamantoiden (hohe Sublimationsrate bei moderaten Temperaturen) ist die aufgebaute Testanlage ebenfalls für die Untersuchung von Jod geeignet. Anfragen z.B. von Airbus DS/Frankreich hinsichtlich der Verwendbarkeit von Jod in Hall-Triebwerken bestätigen dieses hohe Interesse an alternativen Treibstoffen. Neben dem Aspekt der Untersuchung von Materialien hinsichtlich ihres Einsatzes als Treibstoff ermöglicht die DETOF-Anlage auch die Untersuchung fundamentaler Wechselwirkungsprozesse bei Stößen von Elektronen mit Atomen. Plasmaprozesse, die einer komplexen Plasmachemie unterliegen, können mit Messungen aus diesem Experiment effektiver modelliert und optimiert werden. Vorstellbar wäre auch eine Erweiterung dieses Experiment mit anderen Projektilen, z.B. Protonen, um die Stabilität von Molekülen in astrophysikalischen Umgebungen zu untersuchen.

Das Projekt wird im Folgevorhaben „Systematische Suche nach alternativen Treibstoffen für Ionentriebwerke“ fortgeführt. Hier wird neben den Diamantoiden auch die Verwendbarkeit von Jod als Treibstoff untersucht. Ein wesentlicher Aspekt bei Jod wird die Materialverträglichkeit dieses Treibstoffs mit typischen Satellitenmaterialien sein, um der hohen chemischen Reaktivität Rechnung zu tragen. Sowohl bei Diamantoiden als auch bei Jod wird zudem die effektive Hochfrequenzkopplung zwischen Spule und Plasma bei gleichzeitiger Bestimmung

des Dissoziationsverhaltens mittels Massenspektrometrie des Ionenstrahls untersucht, um geeignete Betriebsparameter des Triebwerks zu finden. Unterstützt wird dies durch zeitlich hochaufgelöste Langmuir-Diagnostik der Triebwerksplasmen. Das DETOF-Experiment soll um die Messung von Anregungsprozessen durch Elektronenstoß erweitert werden.

2.5 Fortschritte bei anderen Stellen

Der Betrieb von Ionentriebwerken mit sublimierenden Treibstoffen wird gegenwärtig durch Arbeiten der NASA zusammen mit der Firma Busek dominiert. Hierbei wird anstelle der Diamantoide das Halogen Jod verwendet. Jod hat sehr ähnliche Eigenschaften wie die Diamantoide (hoher Dampfdruck bei moderaten Temperaturen, Festkörper unter Standardbedingungen usw.). Vorteil von Jod ist der diatomare Aufbau des Moleküls, der nur einen Dissoziationskanal zur Folge hat. Nachteil ist die hohe chemische Reaktivität des Halogens, die zu Beschädigungen des Triebwerks und des Satelliten führen könnte. Insbesondere die elektronenemittierenden Materialien von Hohlkathoden scheinen diesbezüglich sehr anfällig zu sein und wurden bisher - soweit den Autoren bekannt - weiterhin mit Xenon als Trägergas betrieben. Eine Zusammenstellung relevanter Arbeiten zu Jod findet man in den Referenzen [6–15]

2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des Projektes wurden bisher noch nicht in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift veröffentlicht. Entsprechende Publikationen sind aber in Vorbereitung.

Literatur

- [1] M. Martinez-Sanchez, J. E. Pollard. 1998. Spacecraft Electric Propulsion - An Overview. *J. Prop. Power* 14:(5) pp. 688-699. doi:10.2514/2.5331
- [2] S. Mazouffre. 2016. Electric Propulsion for satellites and spacecraft: established technologies and novel approaches. *Plasma Sources Sci. Technol.* **25** 033002. doi:10.1088/0963-0252/25/3/033002
- [3] D. R. Lev, D. Emsellem, A.K. Hallock. 2017. The Rise of the Electric Age for Satellite Propulsion. *New Space* 5:(1) pp. 4-14. doi:10.1089/space.2016.0020
- [4] D. Lev et. al. 2017. The Technological and Commercial Expansion of Electric Propulsion in the Past 24 Years *35rd International Electric Propulsion Conference*. Atlanta, Georgia, USA
- [5] A. Kieckhafer, L.B. King. 2007. Energetics of Propellant Options for High-Power Hall Thrusters. *Journal of Propulsion and Power* 23:(1) 21. doi: 10.2514/1.16376

-
- [6] R. Dressler, Y.-H. Chiu, D. Levandier. 2000. Propellant alternatives for ion and Hall effect thrusters. *Proc. 28th Aerosp. Sci. Meeting Exhibit*. Reno, NV, USA doi:10.2514/6.2000-602
- [7] R. Dressler, Y.-H. Chiu, D. Levandier. 2000. Propellant alternatives for ion and Hall effect thrusters. *Proc. 28th Aerosp. Sci. Meeting Exhibit*. Reno, NV, USA doi:10.2514/6.2000-602
- [8] O.S. Tverdokhlebov, A.V. Semenkin. 2001. Iodine propellant for electric propulsion - To be or not to be. *Proc. 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propuls. Conf.*. Salt Lake City, UT, USA doi:10.2514/6.2001-3350
- [9] Y.-H. Chiu, B.D. Prince. 2012. Optical Emission Spectra of the Iodine Hall Effect Thruster. *48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propuls. Conf.*. Atlanta, Georgia, USA doi:10.2514/6.2012-3872
- [10] J. Szabo, M. Robin, S. Paintal, B. Pote, V. Hrubby, C. Freeman. 2015. Iodine Plasma Propulsion Test Results at 1 - 10 kW *IEEE Transactions on Plasma Science*. 43:(1) 141–148 doi: 10.1109/TPS.2014.2367417
- [11] J. Szabo, M. Robin, S. Paintal, B. Pote, V. Hrubby, C. Freeman. 2013. Iodine Propellant Space Propulsion *33rd International Electric Propulsion Conference*. Washington, D. C., USA
- [12] K.A. Polzin, S.R. Peeples, A.O. Burt, A.K. Martin, A. Martinez, J.F. Seixal, S. Mauro. 2016. Development, Demonstration and Analysis of an Integrated Iodine Hall Thruster Feed System *52nd AIAA, SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. Salt Lake City, USA doi: 10.2514/6.2016-4730
- [13] K.A. Polzin, S. Peeples. 2014. Iodine Hall Thruster Propellant Feed System for a CubeSat *50nd AIAA, ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. Cleveland, USA doi: 10.2514/6.2014-3915
- [14] H. Kamhawi, T. Haag, G. Benaidés, T. Hickman, T. Smith, G. Williams, J. Myers, K. Polzin, J. Dankanich, L. Byrne, J. Szabo, L. Lee. 2016. Overview of Iodine Hall Thruster Development Activities at NASA Glenn Research Center *52nd AIAA, SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. Salt Lake City, USA doi: 10.2514/6.2016-4729
- [15] J.W. Dankanich, K.A. Polzin, D. Calvert, H. Kamhawi. 2014. The iodine Satellite (iSAT) Hall Thruster Demonstration Mission Concept and Development *50nd AIAA, ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. Cleveland, USA doi: 10.2514/6.2014-3910