

## Schlussbericht

---

Zuwendungsempfänger:

Ernst-Moritz-Arndt Universität Greifswald

Förderkennzeichen:

50 RS 1101

---

Vorhabenbezeichnung:

Entwicklung und Validierung eines Simulationspakets für Ionentriebwerke in der Raumfahrt

---

Laufzeit des Vorhabens:

1.9.2011 bis 31.8.2014

---

Berichtszeitraum:

1.9.2011 bis 31.8.2014

---

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

# 1 Zusammenfassende Darstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Gesamtvorhabens an der Ernst-Moritz-Arndt Universität Greifswald, kurz EMAU, war die Entwicklung und Validierung eines modular aufgebauten Simulationspakets zur Beschreibung der Plasma- und Wandprozesse in Ionentriebwerken. Dabei erfolgte die Entwicklung der Software zur numerischen Simulation des Triebwerksplasmas durch die Arbeitsgruppe Prof. Schneiders und die Validierung anhand experimenteller Untersuchungen im Rahmen eines Unterauftrags an die Fa. Thales Electron Devices GmbH Ulm, kurz TEDG.

Der Einsatz von Ionentriebwerken auf wissenschaftlichen und kommerziellen Satelliten erfährt zunehmende Bedeutung, da sich durch den im Vergleich zu herkömmlichen chemischen Triebwerken um einen Faktor 5 bis 10 erhöhten spezifischen Impuls die Startmasse des Satelliten im Bereich von einigen 100 bis zu 1000 kg reduzieren lässt. Dies führt im Bereich der kommerziellen Anwendungen zu klaren Kostenvorteilen und zu einer größeren Flexibilität bei der Auswahl der Trägerrakete. Bei wissenschaftlichen Missionen lassen sich tief ins Planetensystem vordringende Raumsonden realisieren; ebenso ergeben sich Einsatzmöglichkeiten bei der Schub-Feinkorrektur, wie sie z.B. für tief fliegende Satelliten zur Kompensation der Luftreibung benötigt wird. Die benötigten Schubwerte bewegen sich im Bereich von Micro-Newton bis hin zu einigen Newton bei Eingangsleistungen von einigen 10 bis einigen 10.000 Watt und sind durch die vom solarelektrischen System an Bord des Satelliten bereitgestellte Leistung limitiert. In Deutschland werden im Bereich der Ionentriebwerke im Wesentlichen zwei Entwicklungslinien verfolgt: Radiofrequenz-angeregte Gitterionentriebwerke, kurz: RIT, bei denen der Treibstoff in einer Hochfrequenz-Gasentladung ionisiert und die entstandenen Ionen über ein Gittersystem elektrostatisch beschleunigt werden und das sog. Hocheffizienz Mehrstufen Plasma-Triebwerk, kurz: HEMP-T, das von Thales TEDG in Ulm entwickelt wird und bei dem die Ionisation in einem magnetisch fokussierten Gleichfeldplasma erfolgt und die Ionen ebenfalls elektrostatisch durch sich im Plasma selbstkonsistent aufgrund des magnetischen Einschlusses einstellende elektrische Potentialgradienten beschleunigt werden. Die Entwicklung von Ionentriebwerken war bisher aufgrund nicht hinreichender Modellierungswerkzeuge durch ein überwiegend empirisches Herangehen bei Einbeziehung von qualitativen und semi-quantitativen Beschreibungen der gasentladungsphysikalischen Prozesse gekennzeichnet.

Hauptfragestellungen waren dabei die Untersuchung des wesentlich gegenüber reinen Stoßprozessen erhöhten Transports der Elektronen, der fluktuationsinduziert oder wandinduziert sein kann, sowie das Detailverständnis der langskaligen Plume-Dynamik und ihrer Auswirkung auf die Ionenverteilung oder Effizienz des Triebwerks und schließlich die Beschreibung der Erosions/Depositionsdynamik sowohl im Entladungskanal als auch der Wechselwirkung mit anderen Satellitenstrukturen (etwa Solarzellen).

Im Rahmen des Vorhabens wurde auch eine Doktorarbeit zur Frage des anomalen Transports finanziert, wodurch erstmalig eine direkte und spezialisierte Ausbildung für Raumfahrtfragestellungen an der EMAU ermöglicht wurde, was als Einstieg in eine Hochleistungstechnologie auch für das Land Mecklenburg-Vorpommern von großem Interesse ist.

Die modulare Simulationssoftware ist so allgemein angelegt, dass zum Vorhabenende nicht nur die Physik des auf magnetischen Einschluss eines gleichfeldangeregten Plasmas basierenden HEMP-Triebwerks selbstkonsistent beschrieben werden konnte, sondern auch der zylindrische Hall-Thruster aus Princeton (USA).

Es ist herauszustellen, dass das vorgeschlagene Vorhaben eine reine Grundlagenentwicklung darstellt, die dazu diente, eine validierte selbstkonsistente Beschreibung der Physik für HEMP-Triebwerke zu erreichen.

Bisherige Schwerpunkte der nationalen Förderung zur Entwicklung von Ionentriebwerken in Deutschland bilden die RIT-Gittertriebwerke und die HEMP-Triebwerke. HEMP-Triebwerke werden von TEDG in unterschiedlichen Schub- und Leistungsklassen entwickelt. Das hier durchgeführte Vorhaben diente einer generellen Vertiefung der theoretischen Grundlagen zum besseren Verständnis von Plasmaprozessen in Ionenantrieben. Darauf basierend wurde ein Simulationswerkzeug entwickelt, das anhand experimenteller Messdaten validiert und in einem sukzessiven Iterationsprozess verbessert werden soll. Das Vorhaben, das auf einer intensiven Zusammenarbeit zwischen EMAU und TEDG gestützt war, beschränkte sich zunächst auf die Beschreibung des dichten, magnetisch eingeschlossenen Plasmas der HEMP-Triebwerke. Eine weiterführende Anwendung im Raumfahrtbereich ist die Simulation der Wechselwirkung von Ionenantriebssystemen mit der jeweiligen Satellitenplattform, um so Erosions- oder Aufladungseffekte abschätzen zu können. Die Simulationssoftware ist nicht nur auf Applikationen im Raumfahrtbereich beschränkt, sondern auch für terrestrische Problemstellungen im Plasmabereich anwendbar und kann hier für die Weiterentwicklung von Plasma- und Ionenquellen und z.B. einer verbesserten Beschreibung der Plasma-Wand-Wechselwirkung bei plasma- und ionenstrahlgestützten Oberflächenprozessen dienen.

Zusammenfassend schafft die erfolgreiche Entwicklung der Modellierungsmethoden damit die Basis für neue innovative Produkte im Bereich der Plasmatechnologie und trägt damit zur Sicherung und zum Ausbau des Hochtechnologiestandortes Deutschland sowohl im universitären und institutionellen als auch im industriellen Bereich bei.

## 1.2 Voraussetzungen

Die wesentlichen Voraussetzungen des Vorhabens waren die langjährige Erfahrung in der Entwicklung von Teilchenmethoden (Particle-in-Cell, PIC) und deren erfolgreiche Anwendung in der Plasmamodellierung von Fusionsplasmen in der Arbeitsgruppe von Prof. Schneider an der EMAU, die auch auf Ionentriebwerke übertragen werden konnte. Hierzu entwickelte die EMAU Module zur Beschreibung der verschiedenen Prozesse bzw. nutzte bereits vorhandene (etwa bei der Plasmabeschreibung Particle-in-Cell Codes), um die oben genannten Hauptfragestellungen bearbeiten zu können. Die Validierung der Simulationsrechnungen erfolgte im Rahmen eines Unterauftrags durch TEDG anhand des Vergleichs mit Daten von bereits vorhandenen und charakterisierten HEMP-Triebwerksmodellen sowie durch zusätzliche experimentelle Charakterisierungstests mit vorhandener Diagnostik. Zusätzlich sollten Datensätze der Universität Giessen und der Princeton University für weitere Validierung benutzt werden.

Hinsichtlich der zentralen physikalischen Mechanismen dienen als Basis modulare Codebausteine, die bereits in einem vorherigen Vorhaben entwickelt wurden oder solche, die im Rahmen der Simulation von magnetisch eingeschlossenen Fusionsplasmen erfolgreich eingesetzt wurden und werden. Die im Vorhaben vorgesehene Zusammenarbeit mit TEDG ermöglicht neben einer der physikalischen Situation bedarfsgerecht angepassten Wahl der Codemodule eine unmittelbare Validierung der Simulationsergebnisse anhand experimenteller Messdaten. Über die Lehrtätigkeit von Prof. Schneider an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald werden die Ergebnisse auch in die Lehre und Ausbildung einfließen. So haben Studenten im Zuge von sogenannten Laborpraktika einige Wochen in der Arbeitsgruppe von Prof. Schneider gearbeitet und wurden dabei auch in die Prinzipien und Anwendungen der in diesem Vorhaben benutzten Teilchenmethoden eingeführt und exemplarisch mit Grundlagenergebnissen in Kontakt gebracht werden. Diese Ausbildung ermöglicht damit Erstkontakte von Studenten zu ihnen sonst nicht zugänglichen Fragestellungen. Weiterhin wurde im Rahmen des Vorhabens auch eine Doktorarbeit zur Frage des anomalen Transports finanziert, die damit erstmalig eine direkte und spezialisierte Ausbildung für Raumfahrtfragestellungen an der EMAU ermöglicht, was als Einstieg in eine Hochleistungstechnologie auch für das Land Mecklenburg-Vorpommern von großem Interesse ist.

Die modulare Simulationssoftware wurde so allgemein entwickelt, dass auch der Hall Thruster der Universität Princeton, USA zu beschreiben war. Das ist möglich, da die grundlegenden Algorithmen zur Lösung der kinetischen Gleichungen der Plasmakonstituenten (Ionen, Elektronen, Neutralteilchen) mittels Teilchenmethoden allgemein gehalten sind und nur die Kenntnis der entsprechenden Wirkungsquerschnitte für die Stoßprozesse als zusätzliche Information benötigen. Somit bleibt als Anpassungsarbeit die Übernahme der jeweiligen Geometrien (einschließlich externer

magnetischer und elektrischer Felder), sowie die Festlegung und Einbau der Randbedingungen für Teilchen und Felder (z. B. Reflektion, Absorption, Stromzufluss).

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die erhöhten Anforderungen an zukünftige elektrische Ionenantriebssysteme hinsichtlich deren Leistungs- und Betriebsparameter aber auch deren Langzeitstabilität verlangen ein tieferes Verständnis der Prozesse im Triebwerksplasma und deren Auswirkungen sowohl auf das Triebwerk selbst (thermische Verlustleistung, Erosionsmechanismen, Entladungsstabilität) als auch auf den extrahierten Ionenstrahl (Winkelverteilung der Ionen inklusive deren Energie- und Ladungszustandsverteilung im jeweiligen Raumwinkel). Die Arbeiten innerhalb des Vorhabens streben eine geschlossene, selbstkonsistente und auf grundlegenden physikalischen Wirkmechanismen basierende numerische Simulation der Triebwerksphysik im Hinblick sowohl auf Plasma- als auch Wandprozesse an. Eine derartige Simulation, die im Idealfall auf phänomenologische Anpassungsparameter verzichtet, erlaubt dann nicht nur die Beschreibung der Vorgänge unter existierenden Triebwerksrandbedingungen, sondern ist durch ihren vorhersagenden Charakter auch als Werkzeug für die weitere Triebwerksentwicklung geeignet.

Die Entwicklung eines derartigen Simulationswerkzeugs beinhaltete folgende Arbeiten:

- Selbstkonsistente Beschreibung des Elektronentransports (elektrostatische Turbulenz) über 3D PIC Modelle
- Selbst-konsistentes Plume-Modell für eine realistische Beschreibung der gemessenen Ionenenergieverteilungen durch Kopplung von PIC-Modellen unterschiedlicher Ortsauflösung
- Verbindung von Plasma- und Wandmodellen zu einer selbstkonsistenten Beschreibung der Erosion und Depositionsdynamik, sowie deren Rückwirkung auf das Plasma
- Experimentelle Charakterisierung der HEMP-Triebwerke im Rahmen eines Unterauftrags durch TEDG zur Validierung der Modelle

Das Projekt lief entsprechend der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung. Der Meilenstein im August 2013 wurde erfolgreich erreicht und durch die Präsentationen auf der IEPC auch international dargestellt. Die Kontakte mit der Universität Giessen sind nach Weggang von Dr. Feili leider abgebrochen. Dafür wurde der Austausch mit PPPL intensiv fortgeführt, um die Frage des im dortigen Thruster beobachteten rotierenden Spoke in Kombination von Simulation und Experiment anzugehen.

Bei den Ausgaben gab es eine zeitliche Verschiebung des Unterauftrags an TEDG von 2012 nach 2013, da kein Zeitfenster für die Messungen vorhanden war. Das Projekt wurde durch die Verzögerung nicht negativ beeinflusst.

Es wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Definition der Systembausteine, der Schnittstellen und der Datenformate
- Der direkte Austausch mit der experimentnahen Gruppe bei THALES (Martin Schirra, Benjamin Reijen) diente als nicht zu ersetzende Leitlinie der Arbeiten, da durch häufige Kontakte (Telefon, e-mail) die Abbildung des Experiments und der dort relevanten Arbeitsfragen auf die Simulation möglich wurde.
- Ein erster direkter Vergleich mit Experimenten wurde sowohl mit HEMP als auch dem zylindrischen Hall-Thruster des PPPL durchgeführt.
- Bei HEMP stand die Frage der Erosion im Vordergrund und die Modellierung unterstützte die Optimierung der Testkammergeometrie mittels Baffles. Diese Arbeiten erfolgten in direktem Austausch mit TEDG.
- Beim zylindrischen Hall Thruster gelang es mit 3D Rechnungen selbstkonsistent den rotierenden Spoke zu reproduzieren. Die 3D Ergebnisse bestätigen für HEMP die 2D Rechnungen, da bei HEMP ein starkes radiales magnetisches Feld, das anomalen Elektronentransport über elektrostatische Turbulenz induziert, nur in den Cusp-Bereichen existiert und somit im Gegensatz zu herkömmlichen Hall Thrustern der Beitrag des radialen turbulenten Transports nicht entscheidend für den Betrieb des Thrusters ist, der durch die klassischen Stoßprozesse dominiert wird.
- Evaluierung von nicht-äquidistanten PIC-Methoden für eine bessere Simulation des langskaligen Plumes: Korrektur des Fehlers im elektrischen Feld am Gittersprung, verallgemeinerter Poisson-Solver, numerische Optimierung.
- Selbstkonsistente Simulationen von Ionen Thruster-Antrieben mit langskaligem Plume: Ausweitung des Gitters auf Meter-Dimension, Kopplungsstrategie von Plasma- und Stoßkaskadenmodellen.
- Weiterführung der Arbeiten zu Erosion im Beschleunigungskanal und in Testkammern: Validierung von Monte Carlo und analytischen Modellen, Baffleoptimierung für Testkammern, 3D-Analyse der Zerstäubungsflüsse für nicht-achsensymmetrische Anordnungen in Testkammern.
- Detailrechnungen zum Problem der Ionenwinkelverteilungen im Plume: Einfluss von Gittergröße und Position des Neutralisators.

## 1.4 Anknüpfung an wissenschaftlichen und technischen Stand

Im Folgenden wird der wissenschaftliche und technische Stand erläutert, auf dem die Arbeiten in diesem Vorhaben beruhen. Da die für das Vorhaben wichtigen Methoden und experimentellen Ergebnisse für HEMP durch die Projektpartner autark entwickelt bzw. gemessen wurden kamen keine neuen Erkenntnisse von dritter Seite während des Förderzeitraums hinzu. Im Zuge der Zusammenarbeit mit PPPL wurden neue experimentelle Ergebnisse direkt in das Vorhaben zur Modellvalidierung eingebracht.

Daher ist dieser Abschnitt zum größten Teil mit dem entsprechenden Abschnitt im Antrag identisch.

Die Simulation von Ionenantrieben gründet sich auf Plasmamodelle, die allerdings meist Flüssigkeits- oder Hybridmodelle (d.h. nur eine Komponente wird kinetisch beschrieben) sind. Es existieren nur wenige voll kinetische Rechnungen und schon gar nicht in 3D. Diese Komplexitätsstufe ist allerdings nötig um den anomalen radialen Transport der Elektronen zu verstehen. Hier bilden sich Turbulenzstrukturen aus, die für diesen Prozess verantwortlich sind und nur als 3D Effekt zu untersuchen sind.

Die Wechselwirkung des Plasmas mit den Wänden ist in den Modellen auch eher simpel abgebildet, allerdings ist dieser Aspekt sowohl für das Grundlagenverständnis als auch für technische Anwendungen sehr wichtig. So ist die Lebenszeit der Triebwerke limitiert durch Zerstäubung der Wände und zusätzlich auftretende Deposition kann die Richtcharakteristik und den Schub über Veränderung der Geometrie und damit verbundener Änderung der Potenzialstruktur beeinflussen.

Für den Bereich des Plumes und der Wechselwirkung mit dem Satelliten, etwa Zerstäubung und Deposition von Ionen und Neutralen auf Solarzellen, existieren noch weniger gekoppelte Beschreibungen, meist werden hier Testteilchenansätze oder Hybridmodelle eingesetzt. Allerdings ist auch dieser Bereich noch durch kinetische Effekte bestimmt, insbesondere im Übergangsbereich zwischen Triebwerk und Plume, was komplexere Modelle erfordert.

Zusätzliche Probleme entstehen durch die Wechselwirkung der Ionentriebwerke bei der terrestrischen Qualifizierung mit dem Restgas und den Gefäßwänden der Testanlagen. Auch hier fehlt noch ein Modell, das erlaubt die Grundeffekte zu verstehen, etwa Veränderung der Winkelverteilung der austretenden Ionen in Abhängigkeit von Restgasdruck oder Effekte des Rückflusses von zerstäubten Teilchen der Gefäßwände in das Triebwerk, welche Schichten bilden können, die dann Potentialverteilung und damit die Ionenverteilung beeinflussen.

Insgesamt existieren viele Arbeiten, die Einzelaspekte untersuchen und häufig mit Näherungen arbeiten um Laufzeitprobleme zu vermeiden. Im Gegensatz dazu gibt es nur sehr wenig Arbeiten, die eine Gesamtbeschreibung des Ionentriebwerks, des Plumes und der Wechselwirkung mit der Umgebung versuchen. Daher wurde in diesem Projekt der Versuch unternommen, solch ein Paket modular zu entwickeln und anzuwenden, wobei zur Plasmabeschreibung auf eine voll kinetische Plasmabeschreibung im Rahmen der *Particle-in Cell* (PIC) Methode zurückgegriffen wird. Diese wurde in den 1970er Jahren geschaffen, das klassische Buch von Birdsall und Langdon [1] gibt eine gute Einführung. Felder sind nur an diskreten Punkten gegeben (Rechengitter), während die Teilchen bezüglich Ort und Geschwindigkeit kontinuierlich im Raum definiert sind. Teilchen und Felder werden in Zeitschritten weiterentwickelt. Zur Modellierung der Stöße zwischen den Teilchen werden Monto-Carlo-Stoßmodelle genutzt. Durch die Beschränkung der Feldberechnung auf ein Rechengitter erhält man eine effektive Skalierung mit der Teilchenanzahl.

Ein Beispiel für die erfolgreiche Verwendung von PIC Teilchenmethoden ist die Beschreibung von Niedertemperaturplasmen in der Arbeitsgruppe Prof. Schneider, wobei

hier eine enge Verbindung zu den Experimenten an der Universität und mit dem Transregio TR-24 existiert. Speziell wurden Hochfrequenzentladungen [2] untersucht, wobei auch die Bildung negativer Ionen in Sauerstoff einbezogen wurde [3]. Die Beschreibung der Bildung von negativen Ionen ist insbesondere auch wichtig für die Plasmaheizung in der Fusion (NNBI für ITER [4]). Weltweit einzigartig ist die komplette ab-initio Beschreibung von Staub in solchen Entladungen (Verbindung von PIC und Molekulardynamik [5]) um damit sowohl die Mikroschicht von Nanoteilchen [6] als auch die Strukturbildung und Dynamik zu verstehen (Plasmakristalle [7]).

Die ersten Arbeiten zur Modellierung des Plasmas in einem Ionentriebwerk stammen von Brophy *et al* [8] und Arakawa *et al* [9]. Hall Thruster sind die am besten beschriebenen Ionenantriebe, für die auch relativ aufwändige Flüssigkeits-Teilchen-Hybrid-Modelle [10] entwickelt wurden. An der Stanford University, USA, wurde 2-H Hybrid Particle in Cell – Flüssigkeitsmodell [11,12] zur Simulation des Stanford Laboratory Hall Thrusters [13] benutzt. Das Modell beschreibt die radial-axial Ebene mit einer Auflösung von 13 Gitterpunkten in radialer und 101 in axialer Richtung. Elektronen werden als 1-D magnetisierte Flüssigkeit angenommen, Ionen und Neutrale bewegen sich als diskrete Teilchen innerhalb eines 2d PIC Modells. Die Kopplung geschieht über die Annahme von Ladungsneutralität in der ganzen Domäne. Für den anomalen Transport, der nur über 3D Rechnungen behandelbar ist, wird eine Bohm-ähnliche Diffusion angenommen. Die starken Vereinfachungen des Modells erlauben lediglich qualitative Vergleiche mit dem Experiment. So führt die Annahme von Maxwell-verteilten Elektronen in der Beschreibung der Plasma-Wand–Wechselwirkung zu einem Entladungsstrom, der um den Faktor 100 kleiner ist als gemessen. Realistischere Ergebnisse konnten nur mit der Annahme erzielt werden, dass der Energieverlust der Elektronen auf Wände künstlich verkleinert wurde [11].

Ein 2D Hybrid PIC-MCC–Flüssigkeitsmodell zur Simulation des Stationary Plasma Thruster (SPT) einschließlich der Nahfeld-Plume-Region wurde in der Gruppe von Prof. Boeuf an der Paul Sabatier University Toulouse in Frankreich [14,15,16] entwickelt. Das Modell basiert auf der Flüssigkeitsbeschreibung der Elektronen (Kontinuitäts-, Impuls- und Energiegleichungen) und einem Teilchenmodell für den Ionen- und Neutralentransport. Unter der Annahme von Quasineutralität wird die Plasmadichte aus der PIC Rechnung erhalten und das elektrische Feld aus der Lösung der Flüssigkeitsgleichungen der Elektronen. Neutrale und Ionen werden als Maxwell-verteilt in der Simulation eingeführt, Schwereteilchenstöße mit einer Monte Carlo Methode behandelt. Die über Elektronenstoßionisation entstehenden Ionen werden unter Annahme einer Maxwell Verteilung der Elektronen berechnet. Entlang der Feldlinien wird für die Elektronen ein Boltzmann-Gleichgewicht angenommen: der Elektronenfluss auf Grund von Druckunterschieden wird ausgeglichen durch den Fluss, der durch das elektrische Feld getrieben wird. Der radiale Transport der Elektronen wird empirisch über einen zusätzlichen Impulsaustauschstoß mit den Wänden innerhalb des Beschleunigungskanals und über eine Bohm-ähnliche Mobilität außerhalb eingeführt, wobei die Stoßrate und die Mobilität freie Parameter sind. Zusätzlich wird ein weiterer empirischer Verlust für die Elektronen eingeführt, da die elektronischen Energieverluste durch Stöße mit Gasatomen

nicht die gemessenen Elektronenenergien erklären können. Der Koeffizient dieses empirischen Verlustterms wird ebenfalls als freier Parameter angepasst. Damit können zwar die experimentellen Ergebnisse gut wiedergegeben werden, allerdings hängen die Resultate sehr stark von der Wahl der empirischen Parameter ab [14].

An der Tokyo University in Japan existiert ein 2d3v Particle-in-Cell - Direct Simulation Monte Carlo (PIC-DSMC) Modell zur Simulation des Anode Layer Hall Thrusters [17,18]. Hier wurden sowohl Elektronen, als auch Ionen und Neutrale kinetisch beschrieben. Als Stöße sind berücksichtigt: Elektronen Coulomb Stöße, elastische Stöße von Elektronen und Xenon Atomen, Ionisation und Anregung, sowie elastische Stöße zwischen den Xenon Atomen. Als zusätzlicher virtueller Stoß wird Bohm Diffusion eingeführt. Der Code ist mittels Message Passing Interface (MPI) parallelisiert, da er großen Rechenaufwand und Speicherbedarf hat. Allerdings ist in den Rechnungen das Ionen- zu Elektronenmassenverhältnis von 250000 auf 100 reduziert, um Rechenzeiten in realistischen Dimensionen zu halten. Zusätzlich beschreibt das Modell nur den Beschleunigungsbereich des Thrusters ohne Außenraum. Methodisch ist die Benutzung von nicht-uniformen Gittern fragwürdig, da damit die Impulserhaltung verletzt wird, was zu unphysikalischen Ergebnissen führen kann.

Ein ähnlicher Code wurde am Harbin Institute of Technology, China [19], entwickelt. Die Rechendomäne erstreckt sich hier sowohl auf den dielektrischen Beschleunigungskanal als auch auf den Nahfeldbereich des Plumes. Allerdings wird zur Berechnung des elektrischen Potentials angenommen, dass das elektrische Feld an der dielektrischen Grenzfläche nur durch die lokale Ladungsdichte bestimmt wird, wodurch der Einfluss der Volumenladungen und nicht-lokaler Effekte vernachlässigt wird. Damit ergeben sich Fehler bei der Berechnung des Potentials nahe der dielektrischen Wände in der Plasmaschicht. Außerdem ist das Ionen- zu Elektronenmassenverhältnis um einen Faktor 100 kleiner und die Vakuumpermittivität um einen Faktor 1600 größer angenommen um die Rechnung zu beschleunigen, wodurch direkte Vergleiche mit dem Experiment unmöglich werden.

In der Gruppe von Prof. Schneider ist ein Teil der Paketmodule exemplarisch in Arbeiten zu Hall-Thrustern entwickelt worden. Für den Hall Thruster SPT-100 wurde ein voll kinetisches 2D-achsensymmetrisches PIC-MCC Modell [20] des Beschleunigungskanals unter Berücksichtigung der Sekundärelektronenemission von den dielektrischen Wänden entwickelt [21]. Unter Benutzung dieser Ergebnisse konnte dann die Oberflächenerosion durch Ionenzerstäubung untersucht werden, die den wichtigsten Prozess für die Lebensdauer dieses Triebwerksystems darstellt. Dazu wurde die Zerstäubung durch die räumlich variierenden Ionenflüsse mit einem Stoßkaskadenmodell (SDTrimSP [22,23]), das auch in der Arbeitsgruppe von Prof. Schneider weiterentwickelt wird, berechnet. Ein entscheidendes Element für die rechnerische Machbarkeit solcher Untersuchungen ist wie bereits vorher erwähnt die Reduktion der Dimensionen über Ähnlichkeitsgesetze. So war es möglich die komplette Anlaufphase dieses Triebwerks zu simulieren, inklusive aller auch experimentell auftretenden Phasen [24] einschließlich der Auswirkung unterschiedlicher Oberflächenrauigkeiten auf die Sekundärelektronenemission [25].

Diese Untersuchungen zeigten den Übergang von normalen Schichtlösungen zu instabilen Bedingungen für sehr glatte Oberflächen.

Ein weiteres Element zum Verständnis der Physik von Hall Thrustern ist die Beschreibung von Mikroturbulenz durch ExB-Driften. Durch ein entsprechendes 2D( $r,\theta$ )-Modell ist diese Physik und dieser wichtige Mechanismus für den anomalen Transport erfassbar [26].

Im Rahmen eines sehr erfolgreichen DLR Projekts wurden für Untersuchungen zum HEMP-Triebwerk neue Teilchenmodelle entwickelt, optimiert und angepasst.

Ein 2d3v, sowie ein 3d3v Particle-in-Cell Code mit Monte Carlo Stößen (PIC-MCC) wurde zur Simulation des stationären Operationsbereichs des HEMP Thrusters verwendet [27]. Das Modell beinhaltet folgende Stöße: Coulomb-Stöße zwischen geladenen Teilchen, Elektronen-Neutrale elastische, Ionisations- und Anregungsstöße, Ionen-Neutrale Impulsaustausch- und Ladungsaustauschstöße. Die Dynamik des Hintergrundgases wird selbstkonsistent über ein Direct-Simulation-Monte-Carlo (DSMC) Modell behandelt. Das elektrische Potential wird ebenfalls selbstkonsistent in der ganzen Rechendomäne, die sowohl den Beschleunigungskanal als auch den Nahfeld-Plume einschließt, berechnet, wobei die dielektrischen Wände als interne Randbedingungen ohne Näherung behandelt werden [28]. Sekundärelektronenemission von Oberflächen ist über ein Monte Carlo Modell beschrieben. Anomaler radialer Elektronentransport ist über Bohm-Diffusion berücksichtigt.

Die PIC Simulation liefert eine komplett selbstkonsistente mikroskopische Beschreibung, die in der Lage ist, jede beliebige Zustandsgröße zu liefern: Potential und Feld, Teilchendichten, Teilchenflüsse, Teilchengeschwindigkeitsverteilungsfunktionen, Temperaturen, ... Damit erlauben die PIC Simulationen tieferes Verständnis der Physik von Ionenthrustern zu erhalten, oftmals jenseits der Möglichkeiten experimenteller Studien.

Zur Quantifizierung der Zerstäubungsraten der dielektrischen Wände in einem HEMP DM3a Thruster wurde der Stoßkaskadencode SDTrimSP [23] mit der Plasmabeschreibung gekoppelt. SDTrimSP ist ein Monte Carlo Modell, welches für amorphe Targets mittels der Zweierstoßnäherung atomare Stöße in Festkörpern beschreibt. Einfallende und Recoil-Atome werden in 3D im Festkörper verfolgt bis ihre Energie einen Schwellwert unterschreitet oder sie das Target verlassen. SDTrimSP liefert Erosionsraten und Reflektionskoeffizienten, aber auch Tiefenverteilungen der implantierten Teilchen, sowie Energieverteilungen von rückgestreuten und zerstäubten Atomen. Die energie-, winkel- und raungelösten Ionenflüsse aus dem PIC-MCC Code dienen als Input für SDTrimSP. Die berechneten Erosionsraten entlang der Thrusterwände zeigen im Gegensatz zu SPT100 ML beim HEMP DM3a Thruster extrem kleine Werte in Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen [29].

## 1.4.2 Verwendete Fachliteratur

- [1] C. K. Birdsall, A. B. Langdon, *Plasma Physics via Computer Simulation*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2000.
- [2] K. Matyash and R. Schneider, *PIC-MCC modeling of a capacitive RF discharge*, Contributions to Plasma Physics, Vol. 44, Issue 7-8, November 2004, Pages 589-593.
- [3] F.X. Bronold, K. Matyash, D. Tskhakaya, R. Schneider, H. Fehske, *Radio-frequency discharges in Oxygen: I. Modeling*, 2007, submitted to J. Phys. D
- K. Matyash, R. Schneider, K. Dittmann, J. Meichsner, F.X. Bronold, D. Tskhakaya, *Radio-frequency discharges in Oxygen: III. Comparison of Modeling and Experiment*, 2007, submitted to J. Phys. D
- [4] F. Taccogna, R. Schneider, U. Fantz, S. Longo, M. Capitelli, *Proc. of XI Symposium on production and neutralization of negative ion beams*, Santa Fe' (NM), 2006.
- F. Taccogna, R. Schneider, K. Matyash, S. Longo, M. Capitelli and D. Tskhakaya, *Negative ion production near a divertor plate*, Journal of Nuclear Materials, In Press, Corrected Proof, Available online 23 January 2007.
- [5] K. Matyash and R. Schneider, *Finite size effects on charging in dusty plasmas*, Journal of Plasma Physics **72** (2006) 809
- [6] K. Matyash, R. Schneider, F. Taccogna and D. Tskhakaya, *Finite size effect of dust charging in the magnetized edge plasma*, Journal of Nuclear Materials, In Press, Available online 23 January 2007
- [7] K. Matyash, M. Fröhlich, H. Kersten, G. Thieme, R. Schneider, M. Hannemann and R. Hippler, *Rotating dust ring in an RF discharge coupled with a dc-magnetron sputter source. Experiment and simulation*. J. Phys. D: Appl. Phys. **37** (2004) 2703–2708.
- K. Matyash and R. Schneider, *Kinetic Modeling of Dusty Plasmas*, Contributions to Plasma Physics, Vol. 44, Issue 1-3, April 2004, Pages 157-161.
- [8] J. Brophy, P. Wilbur, *Simple Performance Model for Ring and Line Cusp Ion Thrusters*, AIAA Journal, 23 (1985) 1731-36.
- [9] Y. Arakawa, T. Yamada, *Monte-Carlo Simulation of primary electron motions in cusped discharge chamber*, paper AIAA-1990-2654, 21st Int. Electric Propulsion Conf., 18.-20.7.1990.
- [10] Hagelaar G. J. M., Bareilles J., Garrigues L. and Bœuf J.-P., *J. Appl. Phys.* Vol. 91(9), 5592, 2002.
- [11] M. K. Scharfe, N. Gascon, M.A. Cappelli, and E. Fernandez, *Comparison of Hybrid Hall Thruster Model to Experimental Measurements*, Physics of Plasmas **13** (2006) 083505.

- [12] E. Sommier, M. K. Scharfe, N. Gascon, M. A. Cappelli, and E. Fernandez, Simulating Plasma-Induced Hall Thruster Wall Erosion With a Two-Dimensional Hybrid Model, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 35 (2007) 1379.
- [13] N. B. Meezan, W. A. Hargus, Jr. and M. A. Cappelli, Anomalous electron mobility in a coaxial Hall discharge plasma, *Phys. Rev. E*, 63 (2001) 026410
- [14] G. J. M. Hagelaar, J. Bareilles, L. Garrigues, and J.-P. Bœuf, Role of anomalous electron transport in a stationary plasma thruster simulation , *J. Appl. Phys.* 93 (2003) 67.
- [15] G. J. M. Hagelaar, J. Bareilles, L. Garrigues, and J. P. Boeuf, Two-dimensional model of a stationary plasma thruster, *J. Appl. Phys.*, .91 (2002) 5592.
- [16] J. Bareilles, G.J.M. Hagelaar, L. Garrigues, C. Boniface, N. Gascon, and J.P. Boeuf, Critical assessment of a two-dimensional hybrid Hall thruster model: Comparisons with experiments, *Phys. of Plasmas* 11 (2004) 3035.
- [17] K. Komurasaki, S. Yokota, S. Yasui, and Y. Arakawa, Particle Simulation of Plasma Dynamics Inside an Anode-Layer Hall Thruster, 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA2004-3945, Fort Lauderdale, Florida, 11-14 Jul., 2004.
- [18] S. Yokota, K. Komurasaki, Y. Arakawa, Numerical Analysis of Anode Sheath Structure Transition in an Anode-Layer Type Hall Thruster, 30th International Electric Propulsion Conference, IEPC2007-95, Florence, Italy, Sep. 17-20, 2007.
- [19] H. Liu, D. R. Yu, G. J. Yan and J. Y. Liu, Investigation of the Start Transient in a Hall Thruster, *Contrib. Plasma Phys.*, 48 (2008) 603.
- [20] F. Taccogna, S. Longo, M. Capitelli, R. Schneider, *Phys. Plasmas*, 12, 43502, 2005.
- [21] F. Taccogna, S. Longo, M. Capitelli, R. Schneider, *Contr. Plasma Phys.*, 46(10), 781, 2006.
- [22] W. Eckstein, *Computer Simulation of Ion-Solid Interactions*, Springer Series in Material Science, Vol. 10, Springer Berlin, Heidelberg 1991.
- [23] W. Eckstein, R. Dohmen, A. Mutzke, R. Schneider, "SDTrimSP: A Monte-Carlo Code for Calculating Collision Phenomena in Randomized Targets", IPP 12/3, 2007.
- [24] F. Taccogna, S. Longo, M. Capitelli, R. Schneider, *Phys. Plasmas*, **12**, **043502**, 2005.
- F. Taccogna, S. Longo, M. Capitelli, R. Schneider, *Phys. Plasmas*, **12**, **053502**, 2005.
- F. Taccogna, S. Longo, M. Capitelli, *Phys. Plasmas* **12**, **093506**, 2005.
- F. Taccogna, S. Longo, M. Capitelli, R. Schneider, *AIAA 2006-4662*, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, Ca, 2006.
- [24] F. Taccogna, R. Schneider, S. Longo, M. Capitelli, *AIAA paper 2007-5211*, 2007.

- [25] F. Taccogna, S. Longo, M. Capitelli, *J. Spac. & Rock.* 39(3), 409, 2002.
- [26] F. Taccogna, S. Longo, M. Capitelli, *Europ. Phys. J., Appl. Phys.* 28, 113, 2004.
- [27] R. Schneider, K. Matyash, O. Kalentev, F. Taccogna, N. Koch & M. Schirra, *Contributions to Plasma Physics*, Vol. 49 , pp. 655-66, 2009.
- [28] K. Matyash, R. Schneider, A. Mutzke, O. Kalentev, F. Taccogna, N. Koch & M. Schirra, *IEEE Transactions on Plasma Science* Vol. 99 , pp. 1-7, 2010.
- [29] N. Koch, H.-P. Harmann, G. Kornfeld, "Development and Test Status of the Thales High Efficiency Multistage Plasma (HEMP) Thruster Family", Proceedings of the 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton, October 31 – November 4, 2005, IEPC-2005-297.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das im durchgeführten Vorhaben erstellte Plasmasimulationspaket soll die Grundlage für ein umfassendes physikalisches Verständnis für elektrostatische Ionentriebwerke legen und damit auch die Möglichkeit numerischer Optimierung solcher Systeme möglich machen. Eine enge Verzahnung mit dem Experiment (berücksichtigt über einen Unterauftrag an TEDG) war unabdingbare Voraussetzung für ein erfolgreiches Projekt. Spezielle Kontakte wurden zu dem langjährigen Partner in der Entwicklung der Modelle für Hall Thruster Dr. F. Taccogna (jetzt Universität Bari, Italien) gehalten. Die enge Abstimmung mit all diesen Partnern durch eine entsprechend Ausstattung mit Reisegeldern ermöglichte einen aktiven und intensiven Dialog.

Der direkte Austausch mit der experimentnahen Gruppe bei TEDG (Martin Schirra, Benjamin Reijen) diente als nicht zu ersetzende Leitlinie der Arbeiten, da durch häufige Kontakte (Telefon, e-mail) die Abbildung des Experiments und der dort relevanten Arbeitsfragen auf die Simulation möglich wird.

Die Teilnahme von Julia Duras am „Electric Propulsion Workshop“ in Göttingen (5.-8.11.2012) erlaubte eine Vorstellung der ersten Projektergebnisse. Der Besuch von Dr. Jürgen Geiser bei der Tagung „Num Diff-13“ gab die Möglichkeit neue numerische Verfahren auf einer internationalen Tagung vorzustellen, die im Projekt entwickelt wurden. Diese Reisen waren nicht im Antrag vorgesehen und wurden durch Umwidmung von Projektmitteln durch das DLR genehmigt. Dr. Oleksandr Kalentev, Julia Duras und Karl-Felix Luskow konnten auf der IEPC (Washington D.C., USA, 6.-10.10.2013) einem internationalen Fachpublikum die Projektergebnisse vorstellen. Die Reise von Karl-Felix Luskow war nicht im Antrag vorgesehen und wurde durch Umwidmung von Projektmitteln durch das DLR genehmigt.

## 2 Eingehende Darstellungen

Im Folgenden werden eingehend die erzielten Ergebnisse berichtet sowie die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises erläutert.

### 2.1. Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse

Zunächst wurde die gesamte Simulationsstrategie abgesprochen und die Definition der Systembausteine, der Schnittstellen, der Datenformate und nötiger Diagnostikmodule durchgeführt. Die Nutzung von Ähnlichkeitsskalierungen zur Erhöhung der Recheneffizienz ist wesentlich für effektive Rechenzeiten. Die Simulationen für den HEMP Thruster belegen, dass das HEMP Thruster Konzept aufgrund minimaler Energiedissipation und hoher Beschleunigungseffizienz eine hohe thermische Effizienz ermöglicht. Der HEMP weist einen fast konstanten Potentialverlauf bis zum Austrittsbereich auf, wodurch die Ionen erst am Ausgang des Beschleunigungsrohrs beschleunigt werden, so dass damit die Ionenenergie im Kanal so niedrig gehalten werden kann, dass praktisch keine Erosion auftritt. Beim zylindrischen 100 W Hall Thruster CHT 2,6 cm des PPPL gelang es mit 3D Rechnungen selbstkonsistent den rotierenden Spoke zu reproduzieren. Detailvergleiche von 3D Rechnungen zum rotierenden Spoke mit Messungen waren möglich und bestätigten die Modellergebnisse, insbesondere die Vorhersage erhöhter Fluktuationen des azimuthalen elektrischen Feldes in den Spoke-Bereichen. Signaturen des Spokes tauchen in der Verteilung der Plasma- und Neutralteilchen, sowie des Potentials auf (Fig. 1). Die Rotationsgeschwindigkeit von 1,8 km/s entspricht den gemessenen Werten und die Dynamik ist durch die Wechselwirkung zwischen Neutralgas und Plasma bestimmt, die einen azimuthalen Verlust im Spoke der Neutralen verursacht.

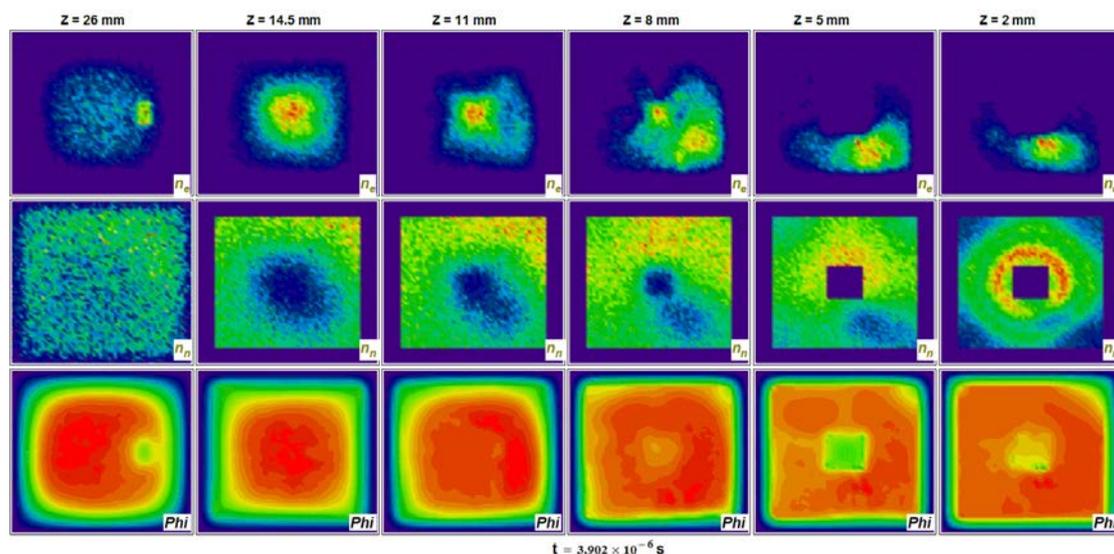


Fig.1: Schnappschuss von Elektronen-, Neutralendichte und Potential an verschiedenen lateralen Positionen einer CHT-ähnlichen Simulation.

Die 3D Ergebnisse bestätigen für HEMP die 2D Rechnungen, da ein starkes radiales magnetisches Feld, das anomalen Elektronentransport über elektrostatische Turbulenz induziert, nur in den Cusp-Bereichen existiert und somit im Gegensatz zu herkömmlichen Hall Thrustern der Beitrag des radialen turbulenten Transports nicht entscheidend für den Betrieb des Thrusters ist, der durch die klassischen Stoßprozesse dominiert wird.

Eine realistischere Rechnung für den Vergleich mit den experimentellen Ionenenergieverteilungen erfordert eine wesentlich größere Rechendomäne um den Einfluss der Randbedingungen weiter zu verkleinern. Hierfür wurden nicht-äquidistante PIC-Methoden für eine bessere Simulation des langskaligen Plumes evaluiert. Es gelang eine neue Korrektur des Fehlers im elektrischen Feld am Gittersprung (Fig. 2 und 3), sowie einen verallgemeinerten Poisson-Solver für die Kopplung von Gittern unterschiedlicher Auflösung zu entwickeln.

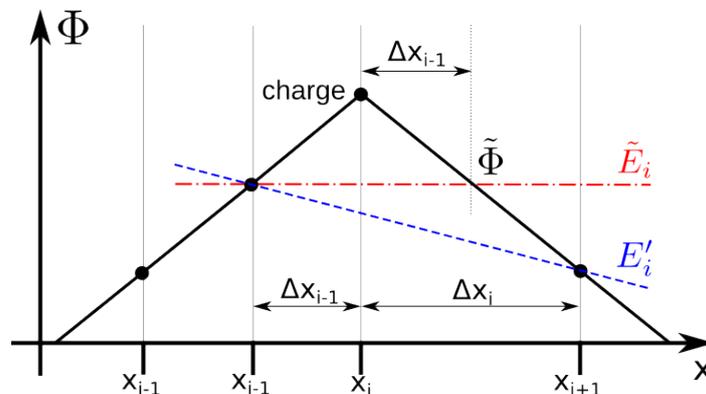


Fig. 2: Potentialverlauf einer Einzelladung. Bei unterschiedlicher Gittergröße ergibt sich ein falsches elektrisches Feld, das sich als Selbstkraft auf die Bewegung des Elektrons auswirkt. Durch Einführung eines interpolierten Werts des Potentials und Berechnung des elektrischen Feldes mit diesem Wert wird der korrekte, feldfreie Wert berechnet.

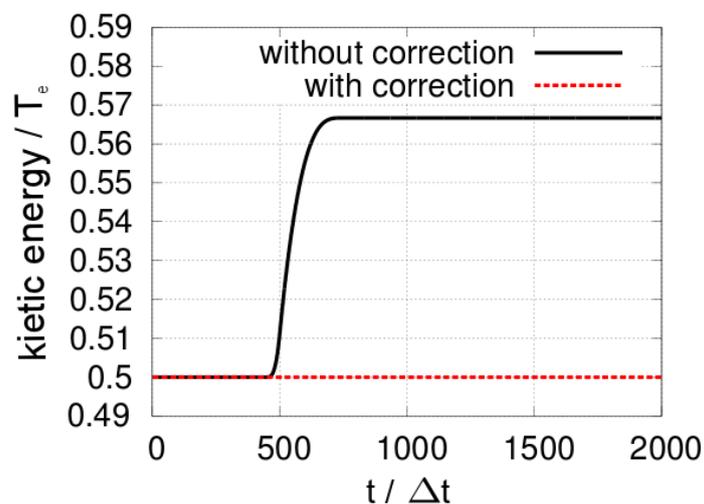


Fig. 3: Zeitlicher Verlauf der kinetischen Energie eines Elektrons. Beim Überschreiten einer Gittergrenze, bei der sich die Gitterauflösung ändert, wirkt sich die artifizielle Selbstkraft in einer Änderung der kinetischen Energie aus. Bei modifizierter Berechnung ist dies nicht der Fall.

Diese numerische Neuentwicklung erlaubte eine Ausweitung des Gitters auf wesentlich größere Domänen, wodurch der Einfluss der Randbedingungen auf die Resultate wesentlich reduziert werden kann. Speziell wurden damit Detailrechnungen zu Ionenwinkelverteilungen im Plume möglich, die den Einfluss von Gittergröße (Fig. 4 und 5) und Position des Neutralisators zeigen.

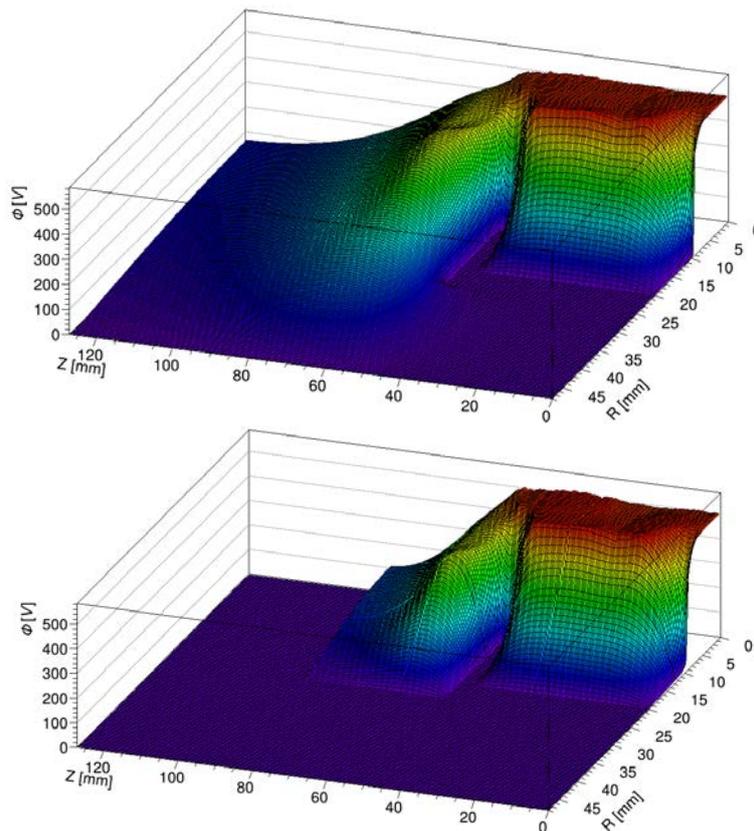


Fig. 4: Potentiallösung für HEMP in einer kleineren und größeren Domäne. In der kleinen Domäne sind die Potentialgradienten am Plume-Rand wesentlich stärker und führen zu Modifikationen in den Ionenwinkelverteilungen.

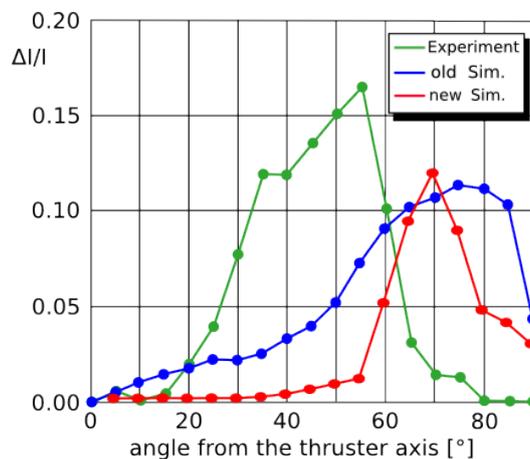


Fig. 5: Einfluss der Domänengröße auf die berechneten Ionenwinkelverteilungen

In einem weiteren Projekt wurde der Einfluss von Erosion und Deposition in einer Testkammer auf die Qualifizierungsmessungen des HEMP Ionenantriebes simuliert, die während der obligatorischen Validierung jedes anwendungsreifen Antriebs auftreten. Treffen die beschleunigten Plasmateilchen auf die Wände der Vakuumtestkammer, so zerstäuben sie Teilchen aus der Wand welche zum Antrieb zurückfliegen können und sich dort ablagern oder Erosion verursachen können. Innerhalb der Laufzeit von mehreren 1000 Stunden kann sich so die Geometrie der Austrittsdüse, sowie des Entladungskanals und somit die Performance des Ionenantriebes verändern.

Es wurde ein Monte-Carlo Modell erstellt, welches leicht an eine veränderte Geometrie angepasst werden kann. Dieses wurde mit einem analytischen Modell für eine spezielle Geometrie (Fig. 6) validiert. In beiden Modellen wurde die Erosionsrate der beschleunigten Ionen, die auf die Kammerwand einfallen, mit dem Zweier-Stoß-Kaskaden-Code TRIM berechnet.

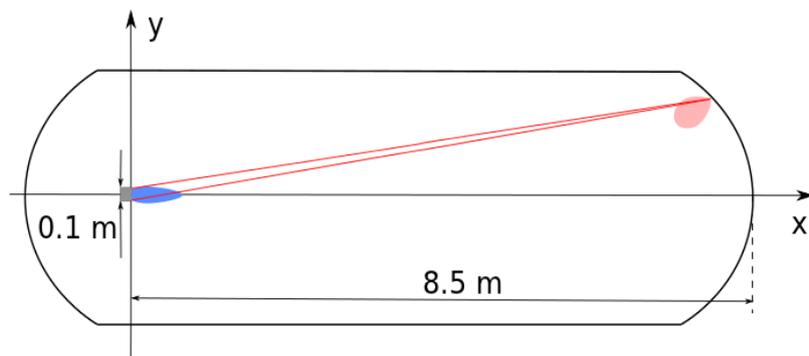


Fig. 6: Geometrie der Testkammer. In Blau ist die Winkelverteilung des Ionenthusters angedeutet, in Rot eine typische Winkelverteilung von zerstäubten Teilchen, die dann entlang der roten Linien einen Rückfluss zum Thruster verursachen können.

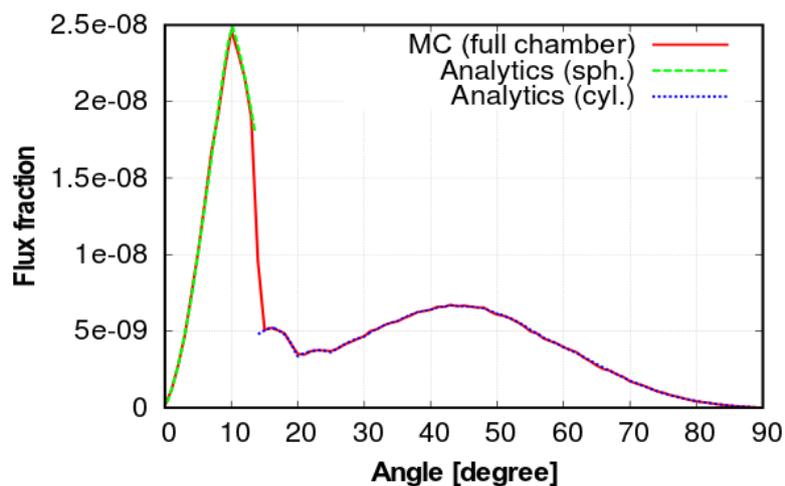


Fig. 7: Vergleich der Ergebnisse von Monte Carlo und analytischem Verfahren für die Geometrie aus Fig. 6.

Der berechnete Teilchenrückfluss (Fig. 7) in Abhängigkeit des Einfallswinkels auf den Ionenantrieb zeigt einen hohen Anteil an zurück gestreuten Teilchen aus dem sphärischen Teil der Testkammer. Eine Strategie zur Verringerung des Rückflusses ist der Einbau von Baffles in die Vakuumkammer. Damit kann dieser um 30-50% gesenkt werden, wobei ein Neigungswinkel von  $15^\circ$  die größte Verringerung bringt.

Das Monte-Carlo-Modell wurde dann benutzt um eine 3D-Analyse der Zerstäubungsflüsse für nicht-achsensymmetrische Anordnungen in Testkammern durchzuführen. Hierzu wurde eine Anordnung von vier Triebwerken in einer Kleeblatt-Konfiguration untersucht.

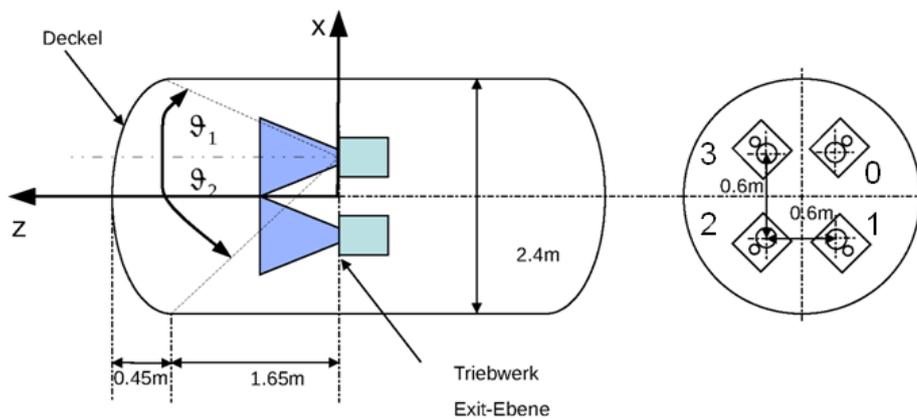


Fig. 8: Geometrie der untersuchten Triebwerks-Konfiguration

Die 3D Effekte für ein Szenario, bei dem nur ein Triebwerk (Thruster 0) aktiv betrieben wird, zeigen sich in den Rückflüssen auf die Thruster (Fig.9 und 10). Bestimmender Parameter ist der Abstand der Thruster von der aktiven Quelle.

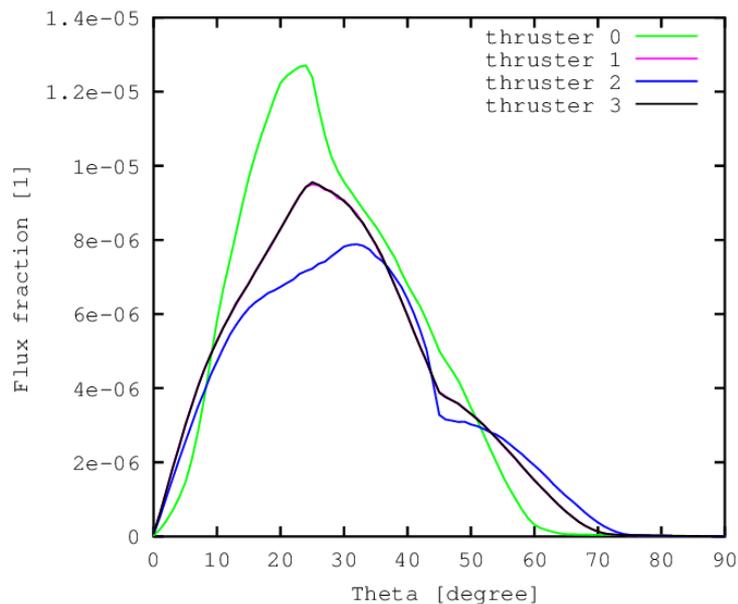


Fig. 9: Rückflüsse auf die Thruster bei Betrieb des Thrusters 0

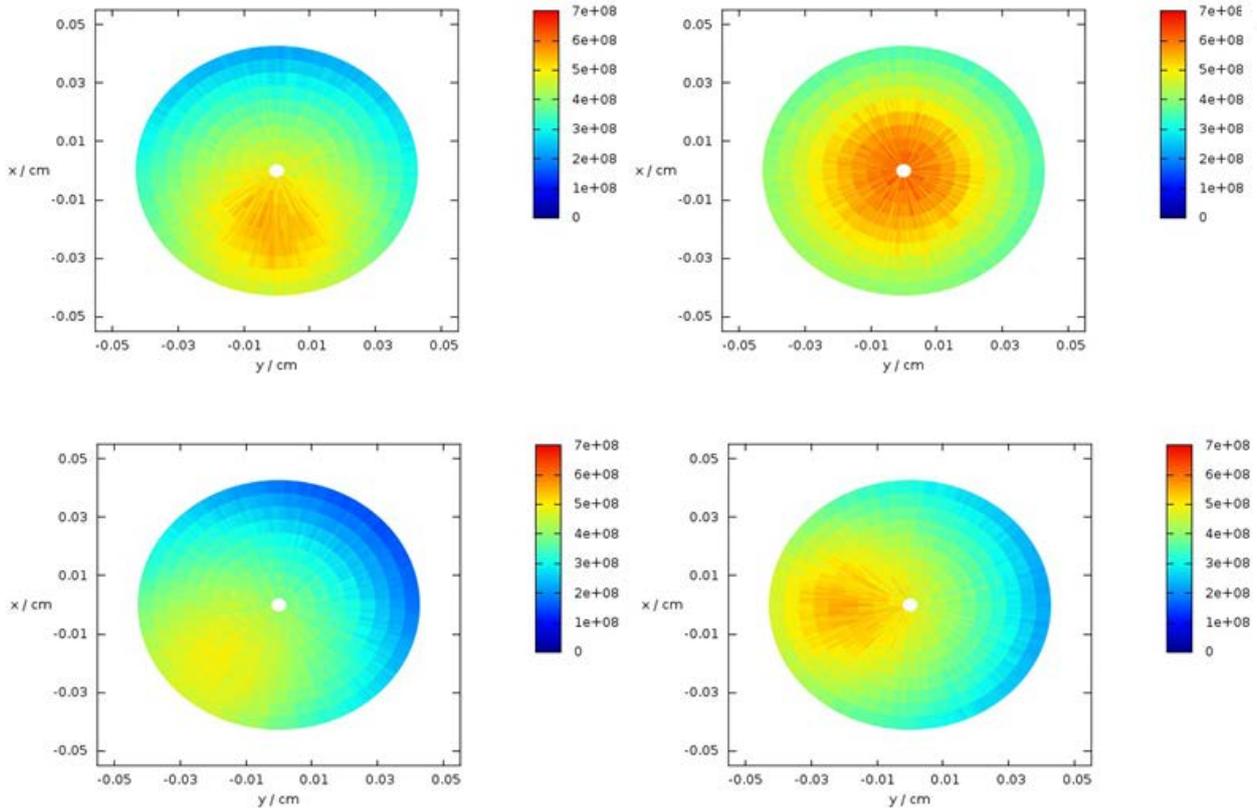


Fig. 10: Azimutale Verteilung der Rückflüsse auf die Thruster bei Betrieb des Thrusters 0 am Ausgang der Thruster

## 2.2 Kostennachweis

Bei den Ausgaben gab es eine zeitliche Verschiebung des Unterauftrags an TEDG von 2012 nach 2013, da kein Zeitfenster für die Messungen vorhanden war. Das Projekt wurde durch die Verzögerung nicht negativ beeinflusst

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeitsschritte waren notwendig um die Ziele in diesem Projekt auf dem Gebiet der Grundlagenforschung zu erreichen. Die geleisteten Arbeiten waren der auf diesem Gebiet vorhandenen Erkenntnislücke angemessen um diese zu schließen.

## 2.4 Verwertung

Bei den durchgeführten Arbeiten handelt es sich um Grundlagenforschung auf innovativen Gebieten. Allerdings wurden durch die Zusammenarbeit mit TEDG die praxisrelevanten Problemstellungen berücksichtigt. Die Ergebnisse fanden über die Tätigkeit von Herrn Schneider als Professor an der Ernst-Moritz-Arndt Universität in Greifswald Eingang in die Lehre und eine anwendungsnahe Ausbildung. Es gab zu diesem Thema Laborpraktika von Studenten in der Arbeitsgruppe von Herrn Schneider, die an der Ernst-Moritz-Universität verpflichtend über mehrere Wochen innerhalb des Diplom- bzw. Masterstudiengangs vorgeschrieben sind. Weiterhin wurde in diesem Vorhaben eine Doktorarbeit in diesem Fachgebiet ermöglicht. Die in diesem Vorhaben bearbeitete Fragestellung stellt gleichzeitig eine Förderung der interdisziplinären Zusammenarbeit (Wechselwirkung von Physik und Ingenieurwissenschaften) und des wissenschaftlichen Nachwuchses (Übernahme von Doktoranden auf PostDoc-Stellen) dar. Die Publikation der wissenschaftlichen Ergebnisse und der Besuch von Fachkonferenzen garantieren eine über das spezielle Projekt hinausgehende allgemeine Aufmerksamkeit und Einordnung der Arbeiten.

Insgesamt legt das Projekt den Grundstein für eine neue Qualität für die Beschreibung von Ionentriebwerken. Im Zusammenwirken mit TEDG ist eine führende Rolle weltweit auf dem Gebiet der Plasmasimulation für elektrische Raumantriebe erreicht worden.

Die erfolgreiche Durchführung des Vorhabens erschließt neue Möglichkeiten zur Optimierung von elektrischen Triebwerken für Raumfahrtanwendungen, aber auch für terrestrische Anwendungen wie die Optimierung von Plasma- und Ionenquellen und die Beschreibung von plasma- und ionenstrahlgestützten Oberflächen- und Volumenprozessen. Durch konsequente modulare Struktur in der Codeentwicklung werden außer den direkten Beschreibungen des Niedertemperaturplasmas in den Ionenstrahltriebwerken auch die von Auswirkungen auf das Raumfahrzeug selbst, z.B. durch Oberflächenprozessen im Triebwerk oder im Plume, möglich. Diese neue Qualität der Beschreibung, mit der Möglichkeit eine komplette numerische Beschreibung und Optimierung solcher Systeme durchzuführen, definiert auch Anschlussfähigkeit dieser Arbeiten im europäischen Kontext, da genau die gleichen Probleme auch bei ESA Fragestellungen zu bearbeiten sind.

## 2.5 Fortschritte bei anderen Stellen

Aufgrund der fast einzigartigen Stellung der Projektpartner auf dem Gebiet des HEMP-Ionenantriebs kamen keine neuen Erkenntnisse von dritter Seite während des Förderungszeitraumes hinzu.

## 2.6 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Arbeiten wurden bei wissenschaftlichen Konferenzen und in Journalen veröffentlicht.

### Bücher und Buchbeiträge:

1. Meichsner J (Hrsg.), Schmidt M (Hrsg.), Schneider R (Hrsg.), Wagner H (Hrsg.). *Nonthermal Plasma Chemistry and Physics*. CRC Press Taylor & Francis Group; 2013. 564 p.
2. Rosenbusch M, Kemnitz S, Schneider R, Schweikhard L, Tschiersch R, Wolf R. *Towards systematic investigations of space-charge phenomena in multi-reflection ion traps*. In: CONFINEMENT AND DYNAMICS OF NON-NEUTRAL PLASMAS. AIP Conference Proceedings; 2013. p. 53-62.

### Veröffentlichungen (referiert):

#### 2011

3. Hundur Y\*, Warriar M, Schneider R. *Numerical Analysis of Producing CNTs from Graphite by Thermal Processes*, JOURNAL OF COMPUTATIONAL AND THEORETICAL NANOSCIENCE. 2011; 8:2327-2330.
4. Kalentev O\*, Rai A, Kemnitz S, Schneider R. *Connected component labeling on a 2D grid using CUDA*, JOURNAL OF PARALLEL AND DISTRIBUTED COMPUTING. 2011; 71(4):615-620.
5. Melzer A\*, Hübner S, Lewerentz L, Matyash K, Schneider R, Ikkurthi V. *Phase-resolved optical emission of dusty rf discharges: Experiment and simulation*, PHYSICAL REVIEW E. 2011; 83(3):036411.
6. Melzer A\*, Hübner S, Lewerentz L, Matyash K, Schneider R, Ikkurthi V. *Optical Emission of Dusty RF Discharges: Experiment and Simulation*, AIP CONFERENCE PROCEEDINGS. 2011; 1397(1):134-137.
7. Mutzke A\*, Bizyukov I, Schneider R, Davis J. *Nano-scale modification of 2D surface structures exposed to 6 keV carbon ions: Experiment and modeling*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION B-BEAM INTERACTIONS WITH MATERIALS AND ATOMS. 2011; 269:582-589.
8. Schneider R\*. *Tischtennis und Physik - wozu ist das denn gut?*, TRAINERBRIEF VERBAND DEUTSCHER TISCHTENNISTRAINER. 2011; 1:18-21.
9. Schneider R\*, Mutzke A, Bizyukov I, Davis J. *Bombardment of a Si pitch grating by C+ ions at an inclined incident angle parallel to the structure*, JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS. 2011; 415:200-203.
10. Taccogna F\*, Minelli P, Diomede P, Longo S, Capitelli M, Schneider R. *Particle modelling of the hybrid negative ion source*, PLASMA SOURCES SCIENCE & TECHNOLOGY. 2011; 20:024009.
11. Timko H\*, Matyash K, Schneider R, Djurabekova F, Nordlund K, Hansen A, Descoeur A, Kovermann J, Grudiev A, Wuensch W, Calatroni S, Taborrelli M. A

- One-Dimensional Particle-in-Cell Model of Plasma Build-Up in Vacuum Arcs*, CONTRIBUTIONS TO PLASMA PHYSICS. 2011; 51(1):5-21.
12. Warmbier R\*, Schneider R. *Ab initio potential energy surface of CH<sub>2</sub> and reaction dynamics of H + CH<sub>2</sub>*, PHYSICAL CHEMISTRY CHEMICAL PHYSICS. 2011; 13:10285-10294.
13. Zhang W\*, Harff J, Schneider R, Meyer M, Wu C. *A Multiscale Centennial Morphodynamic Model for the Southern Baltic Coast*, JOURNAL OF COASTAL RESEARCH. 2011; 27(5):890-917.
14. Zhang W\*, Harff J, Schneider R. *Analysis of 50-year wind data of the southern Baltic Sea for modelling coastal morphological evolution - a case study from the Darss-Zingst-Peninsula*, OCEANOLOGIA. 2011; 53(1):489-518.

## 2012

15. Bizyukov I\*, Mutzke A, Mayer M, Langhuth H, Krieger K, Schneider R. *Macroscopic parameters of the interaction of an Ar<sup>+</sup> ion beam with a Si pitch grating*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION B-BEAM INTERACTIONS WITH MATERIALS AND ATOMS. 2012; 278:4-7.
16. Bizyukov I\*, Mutzke A, Schneider R. *Effect of increasing surface roughness on sputtering and reflection*, PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY. 2012; 6:111-113.
17. Küllig C\*, Dittmann K, Wegner T, Sheykin I, Matyash K, Loffhagen D, Schneider R, Meichsner J. *Dynamics and Electronegativity of Oxygen RF Plasmas*, CONTRIBUTIONS TO PLASMA PHYSICS. 2012; 52(10):836-846.
18. Mutzke A\*, Bizyukov I, Langhuth H, Mayer M, Krieger K, Schneider R. *Study of C<sup>+</sup> ion beam with Si a pitch grating on a macro-scale level*, NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION B: BEAM INTERACTIONS WITH MATERIALS AND ATOMS. 2012; 293:11-15.
19. Mutzke A\*, Rai A, Schneider R, John A, Hippler R. *Modeling of altered layer formation during reactive ion etching of GaAs*, APPLIED SURFACE SCIENCE. 2012; 263:626-632.
20. Rai A\*, Schneider R, Mutzke A, Ravikant M. *Modeling of hydrogen isotope exchange from porous graphite*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION B-BEAM INTERACTIONS WITH MATERIALS AND ATOMS. 2012; 291:58-64.
21. Raites Y\*, Ellison L, Griswold M, Fisch N, Matyash K, Schneider R, Mazouffre S, Lejeune A. *Rotating spoke phenomena in hall thrusters*, IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PLASMA SCIENCE. 2012; 5E-1.
22. Rosenbusch M\*, Böhm C, Borgmann C, Breitenfeldt C, Herlert A, Kowalska M, Kreim S, Marx G, Naimi S, Neidherr D, Schneider R, Schweikhard L. *A Study of Octupolar Excitation for Mass-Selective Ion Centering in Penning Traps*, INTERNATIONAL JOURNAL OF MASS SPECTROMETRY. 2012; 314:6-12.
23. Sang C\*, Bonnin X, Warrier M, Rai A, Schneider R, Sun J, Wang D. *Modelling of hydrogen isotope inventory in mixed materials including porous deposited layers in fusion devices*, NUCLEAR FUSION. 2012; 52:043003.

24. Taccogna F\*, Minelli P, Bruno D, Longo S, Schneider R. *Kinetic divertor modeling*, CHEMICAL PHYSICS. 2012; 398:27-32.
25. Timko H\*, Crozier P, Hopkins M, Matyash K, Schneider R. *Why Perform Code-to-Code Comparisons: A Vacuum Arc Discharge Simulation Case Study*, CONTRIBUTIONS TO PLASMA PHYSICS. 2012; 52(4):295-308.
26. Toma M\*, Bonnin X, Hoshino K, Hatayama A, Schneider R, Coster D. *Development of Coupled IMPGYRO-SOLPS Codes for Analyzing Tokamak Plasmas with Tungsten Impurities*, CONTRIBUTIONS TO PLASMA PHYSICS. 2012; 52:450-454.

## 2013

27. Geiser J\*, Luskow K, Schneider R. *Levitron: multi-scale analysis of stability*, DYNAMICAL SYSTEMS-AN INTERNATIONAL JOURNAL. 2013; 1-17.
28. Kalentev O\*, Lewerentz L, Duras J, Matyash K, Schneider R. *Infinitesimal Analytical Approach for the Backscattering Problem*, JOURNAL OF PROPULSION AND POWER. 2013; 29(2):495-498.
29. Killer C\*, Bandelow G, Matyash K, Schneider R, Melzer A. *Observation of ? mode electron heating in dusty argon radio frequency discharges*, PHYSICS OF PLASMAS. 2013; 20:083704.
30. Rai A\*, Mutzke A, Bandelow G, Schneider R, Ganeva M, Pipa A, Hippler R. *Operational limit of a planar DC magnetron cluster source due to target erosion*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION B-BEAM INTERACTIONS WITH MATERIALS AND ATOMS. 2013; 316:6-12.
31. Ramisch E\*, Mutzke A, Schneider R, Stroth U. *Mechanisms of layer growth in microwave-PECVD silan plasmas - Experiment and simulation*, NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION B-BEAM INTERACTIONS WITH MATERIALS AND ATOMS. 2013; 316:249-256.
32. Rosenbusch M\*, Kemnitz S, Schneider R, Schweikhard L, Tschiersch R, Wolf R. *Towards systematic investigations of space-charge phenomena in multireflection ion traps*, AIP CONFERENCE PROCEEDINGS. 2013; 1521(53).
33. Schneider R\*, Kalentev O, Ivanovska T, Kemnitz S. *Computer simulations of table tennis ball trajectories for studies of the influence of ball size and net height*, INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE IN SPORT. 2013; 12(2).
34. Taccogna F\*, Minelli P, Capitelli M, Longo S, Schneider R. *Plasma grid shape and size effects on the extraction of negative ions*, AIP CONFERENCE PROCEEDINGS: THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEGATIVE IONS, BEAMS AND SOURCES (NIBS 2012). 2013; 1515:3-11.
35. Teichmann T\*, Küllig C, Dittmann K, Matyash K, Schneider R, Meichsner J. *Particle-In-Cell simulation of laser photodetachment in capacitively coupled radio frequency oxygen discharges*, PHYSICS OF PLASMAS. 2013; 20:113509.
36. Toma M\*, Bonnin X, Sawada Y, Homma Y, Hatayama A, Hoshino K, Coster D, Schneider R. *Comparison of kinetic and fluid models for tungsten impurity transport using IMPGYRO and SOLPS*, JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS. 2013; 438(S):S260-S264.

37. Zhang W\*, Deng J, Harff J, Schneider R, Dudzinska-Nowak J. *A coupled modeling scheme for longshore sediment transport of wave-dominated coasts-A case study from the southern Baltic Sea*, COASTAL ENGINEERING. 2013; 72:39-55.

## 2014

38. Deng J\*, Zhang W, Harff J, Schneider R, Joanna D, Pawel T, Andrzej G, Kazimierz F. *A numerical approach for approximating the historical morphology of wave-dominated coasts - A case study of the Pomeranian Bight, southern Baltic Sea*, GEOMORPHOLOGY. 2014; 204:425-443.
39. Duras J\*, Matyash K, Tskhakaya D, Kalentev O, Schneider R. *Self-Force in 1D Electrostatic Particle-in-Cell Codes for Non-Equidistant Grids*, CONTRIBUTIONS TO PLASMA PHYSICS. 2014; 54(8):697-711.
40. Jenssen S\*, Kaup C, Lewerentz H. *Mobilität neu denken*, LANDINFORM - MAGAZIN FÜR LÄNDLICHE RÄUME. 2014; 3:24-25.
41. Kalentev O\*, Matyash K, Duras J, Luskow K, Schneider R, Koch N, Schirra M. *Electrostatic Ion Thrusters - Towards Predictive Modeling*, CONTRIBUTIONS TO PLASMA PHYSICS. 2014; 54(2):235-248.
42. Lewerentz H\*. *Der Beitrag des Verkehrs zur regionalen Wertschöpfungskette*, MOBILOGISCH! ZEITSCHRIFT FÜR ÖKOLOGIE, POLITIK & BEWEGUNG. 2014; 3.
43. Yamoto S\*, Hoshino K, Toma M, Homma Y, Hatayama A, Bonnin X, Coster D, Schneider R. *Systematic Study of Tungsten Impurity Transport in Representative Regimes of Divertor Plasma*, CONTRIBUTIONS TO PLASMA PHYSICS. 2014; 54(4-6):421-425.
44. Zhang W\*, Harff J, Schneider R, Meyer M, Zorita E, Hünicke B. *Holocene morphogenesis at the southern Baltic Sea: Simulation of multi-scale processes and their interactions for the Darss-Zingst peninsula*, JOURNAL OF MARINE SYSTEMS. 2014; 129:4-18.

## Veröffentlichungen (nicht referiert):

## 2013

1. Duras J\*, Kalentev O, Matyash K, Schneider R, Kemnitz S, Mutzke A. *Interactions between ion thruster plumes and vessel walls*, PROCEEDINGS OF THE 33RD IEPC, OCTOBER, 2013, WASHINGTON, DC, USA. 2013; IEPC-2013-059.
2. Kalentev O\*, Duras J, Luskow K, Matyash K, Schneider R. *Strategy of Multiscale Modelling for Thruster-Plume Models*, PROCEEDINGS OF THE 33RD IEPC, OCTOBER, 2013, WASHINGTON, DC, USA. 2013; IEPC-2013-126.
3. Luskow K\*, Duras J, Kalentev O, Matyash K, Geiser J, Schneider R, Tskhakaya D. *Non-Equidistant Particle-In-Cell for Ion Thruster Plumes*, PROCEEDINGS OF THE 33RD IEPC, OCTOBER, 2013, WASHINGTON, DC, USA. 2013; IEPC-2013-067.

4. Matyash K\*, Schneider R, Mazouffre S, Tsikata S, Raitses Y, Diallo A. *3D simulation of the rotating spoke in a Hall thruster*, PROCEEDINGS OF THE 33RD IEPC, OCTOBER, 2013, WASHINGTON, DC, USA. 2013; IEPC-2013-307.

## 2014

5. Clementson J\*, Lewerentz L, Grulke O, Schneider R, Sydora R, Klinger T. *Gyrokinetic simulations of magnetic reconnection in non-uniform plasmas*, EUROPHYSICS CONFERENCE ABSTRACTS. 2014; 38(F):P4.118.
6. Lewerentz L\*, Clementson J, Schneider R, Sydora R, Grulke O, Klinger T. *A gyrokinetic model for studies of magnetic reconnection in periodic and bounded plasmas*, EUROPHYSICS CONFERENCE ABSTRACTS. 2014; 38(F):P1.144.

## Vorträge:

### 2011

1. Harff J, Zhang W, Meyer M, Schneider R. *Coastline Change – From paleoenvironmental reconstruction to Future scenarios: A case study from the baltic*. Solution to Costal Desasters Conference; 2011 Jun 27; Anchorage, Alsaka. In: Solution to Costal Desasters Conference 2011.
2. Harff J, Zhang W, Meyer M, Schneider R. *Coastline Change - From Paleoenvironmental Reconstruction to Future Scenarios: A Case Study from the Baltic*. ASCE 14 1st Annual Civil Engeneering Conference; 2011 Okt 21; Memphis, USA. In: ASCE Conf. Proc..
3. Gunnar Bandelow, Meichsner J, Schneider R. *Kinetic simulations of low-temperature plasmas*. HEPP; 2011 Dec 1; Greifswald, Germany.
4. Schneider Ralf. *Challenges of computational material science for fusion*. IAEA; 2011 Dec 12; . Technical Meeting on Improving the Database for Physical and Chemical Sputtering
5. Schneider Ralf. *SDTRIMSP*. IAEA; 2011 Dec 12; . Technical Meeting on Improving the Database for Physical and Chemical Sputtering
6. Schneider Ralf. *Multi-scale modeling of hydrogen transport in porous graphite*. IAEA; 2011 Dec 12; . Technical Meeting on Improving the Database for Physical and Chemical Sputtering

### 2012

1. Gunnar Bandelow, Meichsner J, Schneider R. *Kinetic simulations of low-temperature plasmas*. HEPP; Project B5 in Transregio 24; 2011 Sep 27; Greifswald, Germany.
2. Gunnar Bandelow, Meichnsner J. Schneider R. *Simlations of low-temperature plasmas*. ICTP IAEA; 2012 Jan 24; Greifswald, Germany.

3. Duras Julia, Matyash K, Schneider R. *Plume Simulations of Ion thrusters*. Electric Propulsion Workshop; 2012 Nov 6; Göttingen Germany.
4. Duras Julia. *Plume Simulation of Ion Thrusters*. HEPP Seminar; 2012 Nov 29; Greifswald, Germany.
5. Schneider Ralf. *Multi-Scale Problems – Examples and Strategies*. 2012 Jul 9; Bayreuth, Germany. Research Centre for Modeling and Simulation of socio-economic phenomena, University of Bayreuth

## 2013

1. Duras Julia, Kalentev O, Matayash K, Schneider R. *Interaction between ion thruster plumes and vessel walls*. IEPC 2013 33rd International Electric Propulsion Conference; 2013 Oct 6; Washington D.C. , USA.
2. Luskow Karl Felix, Duras J, Matyash K, Schneider R. *Non-Equidistant Particle-In-Cell for Ion Thruster Plumes*. IEPC 2013 33rd International Electric Propulsion Conference; 2013 Oct 6; Washington D.C. , USA.
3. Kalentev O, Duras J, Luskow K, Matyash K, Schneider R. *Strategy of Multiscale Modelling for Combined Thruster-Plume Models*. IEPC 2013 33rd International Electric Propulsion Conference; 2013 Oct 6; Washington D.C. , USA.
4. Schneider Ralf, Matyash K, Kalentev O. *Electrostatic ion thrusters - towards predictive modeling*. PT-16; 2013 Feb 19; Greifswald, Germany.
5. Schneider Ralf. *Multi-Scale Problems: from plasmas and their interactions with walls to the development of the coastal region of the Baltic Sea*. 2013 Nov 26; Nürnberg, Germany.

## 2014

1. Duras Julia, Matyash K, Kalentev O, Schneider R, Tskhakaya D. *Non-equidistant Particle-In-Cell for Ion Thruster plume simulation*. DPG-Frühjahrstagung 2014, Sektion AMOP, HEPP Colloquium; 2014 Mar 17; Berlin, Germany.
2. Luskow Karl Felix. *2D simulation of heat flux distribution in space-relevant applications including electromagnetic fields in partially-ionized Argon plasmas*. Compus Workshop; 2014 Sep 1; Greifswald, Germany.
3. Schneider Ralf. *Plasma Modeling for Magnetic Fusion – Examples and Strategies*. Lecture in the 12th Kudowa Summer School 'Towards Fusion Energy'; Poland, 2014 Jun 13;
4. Schneider Ralf. *Physik und Sport*. 2014 Sep 25; Bayreuth, Germany; 39. Fortbildungsveranstaltung für Physiklehrer/innen – Physik und Sport, Bayerischer Philologenverband, Universität Bayreuth
5. Schneider Ralf, *Electrostatic ion thrusters – towards predictive modeling*, 27th Symposium on Plasma Physics and Technology, Prague, Czech Republic

## Poster:

1. K. Matyash, R. Schneider, A. Mutzke, O. Kalentev, F. Taccogna, N. Koch, M. Schirra, *Self consistent kinetic simulations of SPT and HEMP thrusters including the near-field plume region*. 6. bis 9. Oktober 2009, 21st International Conference on Numerical Simulation of Plasmas 2009 (ICNSP 09), Lisbon, Portugal
2. G. Bandelow, R. Schneider, J. Meichsner. *Modeling and sensitivity studies of cc-rf CF<sub>4</sub> plasma*. ESCAMPIG 2012; 2013 Jul 10.-14. Viana do Castelo, Portugal.
3. G. Stoppa, S. Stepanov, B. Krames, R. Schneider, J. Meichsner. *CC-RF discharge in CF<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>: simulation and experiment*. 2011 ;DPG Frühjahrstagung Kiel, Germany, 28. - 31. März 2011
4. Gunnar Bandelow, C. Küllig, T. Wegner, K. Dittmann J. Meichsner. *Dynamics and reactivity of electronegative plasmas*. Extension Meeting, Collaborative Research Centre Transregio 24; 13.-14.2.2013, Kiel
5. Julia Duras, R. Schneider, K. Matyash, O. Kalentev, N. Koch, M. Schirra. *Particle Simulation of Ion thrusters*. Joint ICTP-IAEA Workshop on Fusion Plasma Modelling using Atomic and Molecular Data in Trieste, Italy, 23.-27.1.2012.
6. Lars Lewerentz, R. Schneider, R. Sydora. *Modelling of Magnetic Reconnection*. ICTP 2012. Joint ICTP-IAEA Workshop on Fusion Plasma Modelling using Atomic and Molecular Data in Trieste, Italy, 23.-27.1.2012.

## Abschlussarbeiten:

### 2011

1. Luskow K. *Theory and Modeling of Gyroscopes*. Bachelor-Arbeit. Betreuer: Schneider R. Ernst-Moritz-Arndt-Universität Griefswald: Institut für Physik; 2011.
2. Mulsow M. *Modelling and optimisation of multi-stage water rockets*. Bachelor-Arbeit. Betreuer: Schneider R. Ernst-Moritz-Arndt-Universität Griefswald: Institut für Physik; 2011.
3. Duras J. *Instabilities in ion thrusters by plasma-wall interactions*. Diplomarbeit. Betreuer: Bestehorn M, Schneider R. Brandenburgisch Technische Universität Cottbus: Institut für Physik; 2011.
4. Warmbier R. *Ab initio based spectroscopic and reactive studies of small molecular systems*. Promotion. Betreuer: Schneider R. Ernst-Moritz-Arndt-Universität Griefswald: Institut für Physik; 2011.

### 2012

5. Kemnitz S. *Physikalische Simulation und Visualisierung der Korrektur von Zahnfehlstellungen mittels Spangen*. Bachelor-Arbeit. Betreuer: Ehrike H (Mitbetreuung: Schneider R). Fachhochschule Stralsund: Fachbereich Elektrotechnik und Informatik; 2012.

6. Nagel M. *Plasma-wall interaction in Fluorocarbon plasmas*. Master-Arbeit. Betreuer: Schneider R. Ernst-Moritz-Arndt-Universität Griefswald: Institut für Physik; 2012.
7. Teichmann T. *Kinetic modelling of complex plasmas*. Master-Arbeit. Betreuer: Schneider R. Ernst-Moritz-Arndt-Universität Griefswald: Institut für Physik; 2012.

## 2013

8. Nitzsche C. *Cellular automata modeling for pedestrian dynamics*. Bachelor-Arbeit. Betreuer: Schneider R. Ernst-Moritz-Arndt-Universität Griefswald: Institut für Physik; 2013.
9. Janke F. *Bewertung verschiedener verteilter Dateisysteme auf Linux-basierten Cluster-Rechnern*. Master-Arbeit. Betreuer: Koch M (Mitbetreuung: Noack A, Schneider R). Fachhochschule Stralsund: Fachbereich Elektrotechnik und Informatik; 2013.
10. Kullik M. *Konzeption und Implementierung einer plattformunabhängigen und nutzerfreundlichen Anwendung zur Umsetzung der Okklusogramm-Methode für die Zahnarztpraxis*. Master-Arbeit. Betreuer: Staemmler M, Schneider R. Greifswald: Poliklinik für Kieferorthopädie und Rechenzentrum Universität Greifswald; 2013.
11. Luskow K. *Physics of Ion Thrusters' Plumes*. Master-Arbeit. Betreuer: Schneider R. Ernst-Moritz-Arndt-Universität Griefswald: Institut für Physik; 2013.

## 2014

12. Klingelhöfer J. *Non-linear Monte Carlo methods for neutrals*. Bachelor-Arbeit. Betreuer: Schneider R. Ernst-Moritz-Arndt-Universität Griefswald: Institut für Physik; 2014.