

# Abschlussbericht

---

Zuwendungsempfänger:

Ernst-Moritz-Arndt Universität Greifswald

Förderkennzeichen:

50 RS 1510

---

Vorhabenbezeichnung:

OpASimlon - Optimierung und Anwendung eines Simulationspakets für Ionenantriebe in der Raumfahrt

---

Laufzeit des Vorhabens:

1.10.2015 bis 30.9.2019

---

Berichtszeitraum:

1.10.2015 bis 30.9.2019

---

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 Vorhabens war die zusätzliche Optimierung, Anwendung und Validierung eines PIC Codes, der im Rahmen des Vorhabens 50 RS1101 für die HEMP-Technologie von Thales Deutschland entwickelt worden war. Die Validierung der Simulationsrechnungen sollte dabei durch Thales Deutschland anhand des Vergleichs mit Daten eines neuen HEMP-Triebwerksmodells erfolgen. Wichtigste Fragestellungen waren die Effizienzerhöhung, Skalierungsmöglichkeiten und Betriebszustände bei niedrigen Anodenspannungen, hierbei insbesondere die Untersuchung von Operationslimits. Die Simulationen sollten hier bisher fehlendes Grundlagenverständnis schaffen. Die Möglichkeit ein zusätzliches System mit sehr guter experimenteller Charakterisierung zur Codevalidierung nutzen zu können, demonstriert die Leistungsfähigkeit und mögliche Grenzen des im Vorhaben 50 RS1101 entwickelten PIC Codes. Zusätzlich sollten die Möglichkeiten der physikalisch bestimmten Größenskalierung für HEMP-Triebwerke untersucht werden. Der Unterauftrag an Prof. Norbert Koch von der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm ermöglichte die Relevanz der Ergebnisse für HEMP einzuordnen und gemeinsam mit Thales Deutschland die sich daraus ergebende Projektstrategie abzuleiten.

Im Rahmen des Vorhabens wurden auch zwei Doktorarbeiten finanziert, wodurch eine direkte und spezialisierte Ausbildung für Raumfahrtfragestellungen an der EMAU ermöglicht wird, was als Einstieg in eine Hochleistungstechnologie auch für das Land Mecklenburg-Vorpommern von großem Interesse ist.

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 zielten auf eine geschlossene, selbstkonsistente und auf grundlegenden physikalischen Wirkmechanismen basierende numerische Simulation der Physik. Eine derartige Simulation, die im Idealfall auf phänomenologische Anpassungsparameter verzichtet, erlaubt dann nicht nur die Beschreibung der Vorgänge unter existierenden Bedingungen, sondern erlaubt durch entsprechende Ergänzungen des Modells auch den Einsatz als Werkzeug für die weitere Entwicklung.

Die Entwicklung eines derartigen Simulationswerkzeugs erfolgte in der Arbeitsgruppe von Prof. Schneider des Antragstellers EMAU anhand von und in Iteration mit der experimentellen Charakterisierung der HEMP-Triebwerke durch Thales Deutschland und hatte folgende Arbeiten zum Inhalt:

## **Optimierung, Anwendung und Validierung des im Vorhaben 50 RS1101 entwickelten Simulationspakets:**

2D PIC und selbst-konsistentes Plume-Modell für eine realistische Beschreibung der gemessenen Ionenenergieverteilungen durch Kopplung von PIC-Modellen unterschiedlicher Ortsauflösung, sowie der Verbindung von Plasma- und Wandmodellen zu einer selbstkonsistenten Beschreibung der Erosion und Depositionsdynamik, sowie deren Rückwirkungen auf das Plasma.

Anwendung und Validierung des existierenden Simulationspakets auf existierenden HEMPT-3050 und -30250

- Es erfolgte die Anpassung des Simulationspakets auf die neuen HEMPT-Modelle 3050 und ggf. 30250 oder 30110

Zuarbeit durch Thales Deutschland der Magnetfeld- und Geometriedaten für die Simulation

- Es wurde ein Vergleich mit dem Experiment, insbesondere in Bezug auf Operationslimits durchgeführt.

Untersuchung der Nutzung von physikalischen Ähnlichkeitsgesetzen für eine Größenskalierung der existierenden HEMPs um den Entwicklungsaufwand für höhere Schübe physikalisch geführt zu minimieren

- Ein Vergleich von Simulationsergebnissen mit der analytisch berechneten Skalierung machte eine Bewertung der Stärken und Schwächen dieses Ansatzes möglich.

Entwicklung und Nutzung vereinfachter Hybridmodelle (kinetische Beschreibung von Ionen und Neutralen, Flüssigkeitsmodell für Elektronen), insbesondere für den Plume, um rechentechnisch schnellere Modelle zu entwickeln

- Es erfolgte der Vergleich der Ergebnisse von Hybridmodellen mit voll kinetischen Modellen für eine Bewertung der Stärken und Schwächen dieses Ansatzes.

## **1.2 Voraussetzungen**

Die wesentlichen Voraussetzungen zur Umsetzung des Vorhabens waren die langjährige Erfahrung und erfolgreiche Anwendung in der Plasmamodellierung von Fusionsplasmen mittels Teilchenmethoden (Particle-in-Cell, PIC). Diese wurden auf den Entladungsraum von Ionentriebwerken im Rahmen zweier erfolgreicher DLR Projekte (50 RS0804, 50

RS1101) angewendet, die die Leistungsfähigkeit von Teilchensimulationen zur Beschreibung von Ionenantrieben belegen konnten.

Die grundlegenden Algorithmen zur Lösung der kinetischen Gleichungen der Plasmakonstituenten (Ionen, Elektronen, Neutralteilchen) mittels Teilchenmethoden sind so allgemein gehalten, dass sie nur die Kenntnis der entsprechenden Wirkungsquerschnitte für die Stoßprozesse als zusätzliche Information benötigen. Somit ist als Anpassung für verschiedene Anwendungen die Übernahme der jeweiligen Geometrie, sowie die Festlegung und Einbau der Randbedingungen für Teilchen und Felder, durchzuführen.

Die enge Zusammenarbeit mit Thales Deutschland und mit der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm haben die experimentnahe Diskussion gewährleistet, da dort Detailwissen über die zu beschreibenden Experimente existiert, das erlaubte die Experimente kritisch einzuordnen und zu bewerten, gerade auch im internationalen Kontext.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Ziel des Vorhabens war die zusätzliche Optimierung, Anwendung und Validierung eines PIC Codes, der im Rahmen des Vorhabens 50 RS1101 entwickelt worden ist, für die HEMP-Technologie von Thales Deutschland. Die Validierung der Simulationsrechnungen erfolgte dabei durch Thales Deutschland anhand des Vergleichs mit Daten eines neuen HEMP-Triebwerksmodells. Die Simulationen schafften hier bisher fehlendes Grundlagenverständnis. Damit konnte die Leistungsfähigkeit und mögliche Grenzen des im Vorhaben 50 RS1101 entwickelten PIC Codes demonstriert werden. Zusätzlich wurden die Möglichkeiten der physikalisch bestimmten Größenskalierung für HEMP-Triebwerke untersucht. Der Unterauftrag an Prof. Norbert Koch von der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm ermöglichte die Relevanz der Ergebnisse für HEMP einzuordnen und gemeinsam mit Thales Deutschland die sich daraus ergebende Projektstrategie abzuleiten.

Die vorgesehene Zusammenarbeit mit Thales Deutschland ermöglichte neben einer der physikalischen Situation bedarfsgerecht angepasster Wahl der Codemodule eine unmittelbare Validierung der Simulationsergebnisse anhand experimenteller Messdaten. Die Ergebnisse wurden in Fachzeitschriften veröffentlicht und auf Fachkonferenzen präsentiert. Über die Lehrtätigkeit von Prof. Schneider an der Universität Greifswald gingen sie auch in die Lehre und Ausbildung ein. So arbeiteten Studenten im Zuge von sogenannten Laborpraktika einige Wochen in der Arbeitsgruppe von Prof. Schneider und wurden dabei auch in die Prinzipien und Anwendungen der in diesem Vorhaben benutzten Teilchenmethoden eingeführt und exemplarisch mit Grundlagenergebnissen in Kontakt gebracht. Diese Ausbildung ermöglichte damit den Studenten Erstkontakte zu ihnen sonst nicht zugänglichen Fragestellungen. Die Weiterbeschäftigung eines Doktoranden als wissenschaftlicher Mitarbeiter verhinderte das Abwandern qualifizierter Arbeitskräfte aus

Mecklenburg-Vorpommern. Die Finanzierung von zwei Doktoranden, die eine direkte und spezialisierte Ausbildung für Raumfahrtfragestellungen im Rahmen ihrer Doktorarbeit an der Universität Greifswald erhielten, war als Einstieg in eine Hochleistungstechnologie auch für das Land Mecklenburg-Vorpommern von großem Interesse.

Ziel des Vorhabens war, das Grundlagenverständnis solcher Systeme auf eine qualitativ neue Stufe zu heben.

Es ergab sich folgende Projektstruktur:

Programmentwicklung und -anpassung:

6 Monate, 1. September 2015 bis 28. Februar 2016

Arbeitspaket 1:

- Rechentechische Anpassung der Modelle an das neue HEMP-Ionentriebwerk
- Erweiterung von diagnostischen Werkzeugen in der Simulationssoftware
- Entwicklung und Vergleich vereinfachter Hybridmodelle (kinetische Beschreibung von Ionen und Neutralen, Flüssigkeitsmodell für Elektronen), insbesondere für den Plume, mit den voll kinetischen Modellen

Studien zu HEMPT-3050:

36 Monate, 1. März 2016 bis 28. Februar 2019

Weiterführung von Arbeitspaket 1

Arbeitspaket 2:

- Vergleich mit Experimenten, insbesondere bzgl. Winkel- und Energieverteilungen der austretenden Ionen, Erosions- und Redepositionseffekten
- Identifikation der Ursache von Operationslimits (z.B. bei kleinen Beschleunigungsspannungen)
- Untersuchungen zum Einfluss des Hintergrunddrucks auf den Rückfluss von Wandverunreinigungen in das Ionentriebwerk

Studien zu Ähnlichkeitsgesetzen:

36 Monate, 1. März 2016 bis 28. Februar 2019

Weiterführung von Arbeitspaket 1, 2 und 3

### Arbeitspaket 3:

- Untersuchung der Möglichkeit der Nutzung physikalischer Ähnlichkeitsgesetze zur Größenskalierung von HEMP-Triebwerken
- Identifikation der Bedeutung von Oberflächenprozessen für mögliche Grenzen und die praktische Anwendung der Skalierung

### Hauptaufgaben des Antragstellers Universität Greifswald:

Projektleitung und Projektmanagement (Prof. Schneider), Koordination der Aktivitäten, Berichtswesen

### Hauptaufgaben von Thales Deutschland innerhalb eines Unterauftrags:

1. Erstellung der gesamten Datenpakete für die zu simulierenden HEMP-Triebwerke (physikalische Randbedingungen, Triebwerkscharakteristika, Strahlparameter, Messdaten, Magnetfelddaten, etc.)
2. Physikalische Diskussion der Modellierungsergebnisse und Einordnung der Relevanz für HEMP
3. Diskussion der Projektstrategie

### Aufgaben der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm (innerhalb eines Unterauftrags durch Prof. Dr. Norbert Koch):

1. Physikalische Diskussion der Modellierungsergebnisse und Einordnung der Relevanz für HEMP
2. Diskussion der Projektstrategie

**Meilenstein 1: Kick-off**

**Zeit: 1. September 2015**

**Meilenstein 2: Abschluss der Paketanpassung**

**Zeit: 1. März 2016**

**Meilenstein 3: Projektende und Abschlussdokumentation**

**Zeit: 28. Februar 2019**

**Kostenneutrale Verlängerung: 1. März 2019 bis 30. September 2019**

In der **Anpassungsphase** von 6 Monaten standen im Fokus die Definition und Anpassung der jeweiligen Module der jeweiligen Arbeitspakete, sowie ihrer Schnittstellen für die Modellierung basierend auf in der Gruppe existierenden Modellen, für ein neues HEMP-Ionentriebwerk. Grundlage der Arbeiten waren die selbst entwickelten Module zur kinetischen Beschreibung von Plasmen mit Hilfe von Teilchenmethoden (sogenannte Particle-in-Cell-Methode), einschließlich von Wandprozessen, etwa Sekundärelektronenemission, sowie Stoßkaskadenmodelle zur Behandlung von Erosion und Redeposition an Wänden.

**Meilenstein 1** war die erfolgte Anpassung des Codes an die experimentelle Situation als Simulationswerkzeug für HEMP zur Validierung des Codes und zur Optimierung des Systems.

Danach gab es drei parallele und sich teilweise ergänzende Arbeitsphasen: die Anwendungsphase des angepassten Codes, die Untersuchung der Anwendbarkeit von Ähnlichkeitsgesetzen zur Größenskalierung von Triebwerken, deren Grenzen mit Hilfe von Simulationen ausgelotet werden und dann für die Entwicklung neuer Systeme genutzt werden sollen sowie die Entwicklung und Anwendung eines Hybridmodells mit kritischem Vergleich zum kompletten Modell. In Absprache mit Thales Deutschland konzentrierten sich die Arbeiten hier auf das DM3a-Triebwerk, da dort die experimentelle Datenbasis für eine kritische Überprüfung der Modelle bereits vorhanden war. Detailstudien zum neuen 3050-Triebwerk wurden mit Hilfe der in diesem Vorhaben entwickelten Methoden in einem Horizon2020 Projekt durchgeführt. Insofern waren die Grundlagenstudien in diesem Vorhaben die Basis der anwendungsnahen Arbeiten im EU-Projekt.

Die kostenneutrale Verlängerung erlaubte, alle wissenschaftlichen Ziele des Vorhabens zu erreichen. Insbesondere war es möglich, einen Optimierungscode in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Hideaki Ogawa an der RMIT University in Melbourne zu entwickeln und anzupassen. Grundidee ist hier die Kombination einfacher empirischer Bilanzgleichungsmodelle mit Particle-in-Cell Simulationen. Für die Bestimmung der Parameter der Bilanzgleichungsmodelle, in die z.B. Potentialverlauf, Ionisationsverluste und Wahrscheinlichkeiten zum Erreichen der Cusps eingehen, konnten sowohl experimentelle Messdaten als auch Simulationsdaten genutzt werden. Dies erlaubte eine realistische Abdeckung des experimentellen Operationsbereichs der betrachteten Thruster, berücksichtigte aber auch Erkenntnisse der Simulationen über physikalische Prozesse und deren Einfluss auf die Parameter. Das relativ einfache Bilanzgleichungsmodell konnte danach mit einem bereits implementierten evolutionären Algorithmus für bestimmte Betriebsszenarien optimiert werden.

Für den Plume konnte ein Hybridcode angewendet werden, in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Mario Merino in Spanien. Die Ergebnisse hierzu sind über eine gemeinsame Veröffentlichung dokumentiert. Die genäherte Beschreibung der Elektronenbewegung als Bewegung eines Gyrozentrums erlaubte wesentlich größere Zeitschritte, da die schnelle Gyrobewegung der Elektronen um das Magnetfeld nicht mehr aufgelöst werden musste und man als kleinsten Zeitschritt die Auflösung der Ionenbewegung berücksichtigen konnte. Daraus resultierte ein Zeitschrittgewinn um ca.

einen Faktor 200. Zumindest für den nicht-magnetisierten Plume und für Übergangsszenarien (z.B. veränderte Beschleunigungsspannung) konnte damit die nötige Rechenzeit drastisch reduziert werden.

## 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.

Der im Folgenden beschriebene Stand der Wissenschaft und Technik sowie die Auflistung der im Themenbereich geleisteten Vorarbeiten bezieht sich auf die Aufgabenstellung der Anwendung der Simulationssoftware. Grundlagen sind die Erfahrungen im Projekt 50 RS1101, die die Leistungsfähigkeit von Teilchensimulationen zur Beschreibung von Ionenantrieben belegten.

Die Simulation von Ionenantrieben gründet sich in den meisten Fällen auf Plasmamodelle, die allerdings meist Flüssigkeits- oder Hybridmodelle (d.h. nur eine Komponente wird kinetisch beschrieben) sind. Es existieren nur wenige voll kinetische Rechnungen. 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 wird die Lebenszeit der Triebwerke durch Zerstäubung der Wände limitiert 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 die 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.



## 1.4.1 Simulationsgrundlagen

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 wurde. Diese wurde in den 1970er Jahren geschaffen; hierzu gibt das klassische Buch von Birdsall und Langdon [1] 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 Monte-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 für die Plasmaheizung in der Fusion (NNBI für ITER [4]) wichtig. 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-verteilter 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, Schwerteilchenstöße 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.

## 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

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das im durchgeführten Vorhaben durch den Antragsteller Universität Greifswald erstellte Simulationspaket zur Beschreibung sowohl des Plasmas als auch der Wandprozesse in Ionentriebwerken legt die Grundlage für ein umfassendes physikalisches Verständnis für elektrostatische Ionentriebwerke und ermöglicht damit auch die numerische Optimierung solcher Systeme. Eine enge Verzahnung mit dem Experiment über die Partner Thales Deutschland und Technische Hochschule Nürnberg im Rahmen von Unteraufträgen war unabdingbare Voraussetzung für eine erfolgreiche Projektdurchführung. Darüber hinaus ist eine mögliche Anwendung für die terrestrische Nutzung der Plasmasimulationen, z.B. bei Ionenquellen, gegeben, die sich auch in einigen Veröffentlichungen im Anhang finden. Gegenseitige Besuche von und mit Kollegen der Universität Bari brachten international hochrangige Expertise nach M-V. Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der Gruppe von Mario Merino aus Madrid wurde ein Hybridmodell mit dem PIC Modell verbunden. Zusätzliche Zusammenarbeiten gab es mit der Gruppe von Prof. Koch in Nürnberg, sowie mit der Universität Bremen (mikro-HEMP). Die Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Dr. Hideaki Ogawa von der RMIT University in Melbourne erlaubte die Entwicklung eines neuen Multi-Design-Optimierungs-Algorithmus (MDO-Algorithmus). Diese erlaubten optimierte Triebwerksentwürfe unter Berücksichtigung bestimmter Leistungsparameter, nämlich Schubkraft, Effizienz und Impuls.

Der Besuch internationaler Konferenzen ermöglichte die Präsentation der Projektergebnisse im internationalen Rahmen durch Vorträge und Diskussionen.

## 2 Eingehende Darstellungen

Im Folgenden werden eingehend die erzielten Ergebnisse berichtet, sowie die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises erläutert. Detaildiskussionen der wissenschaftlichen Ergebnisse finden sich in den Publikationen.

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

Im Vorhaben konnten alle im Antrag beschriebenen Ziele erreicht werden.

Zunächst wurde die gesamte Simulationsstrategie abgesprochen und die Definition der Systembausteine und nötiger Diagnostikmodule durchgeführt.

Das Projekt lief entsprechend der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung. Beim Kick-off Meeting wurde mit allen Partnern die Projektstrategie abgestimmt.

Der Particle-in-Cell Code wurde an das bestehende Problem und die damit einhergehenden Experimentbedingungen angepasst.

#### 1. Anwendung und Validierung des existierenden Simulationspakets auf HEMPT-3050 und -30250

- Anpassung des Simulationspakets auf die neuen HEMPT-Modelle 3050 und ggf. 30250 oder 30110:

Das Codepaket wurde im Hinblick auf verallgemeinerte Randbedingungen für Potential und Teilchen, die über ein Nutzerinterface einzupflegen sind, angepasst. Insbesondere die Diskretisierung allgemeiner und komplizierter Geometrien (z.B. schräge Wände) wurde damit für den Nutzer vereinfacht, da keine Indexverwaltung und Matrixveränderung per Hand mehr nötig sind, sondern alles automatisiert verarbeitet werden kann.

Zuarbeit durch Thales Deutschland der Magnetfeld- und Geometriedaten für die Simulation

- Vergleich mit dem Experiment, insbesondere in Bezug auf Operationslimits

Die entsprechenden Inputdaten sind von Thales Deutschland zugearbeitet worden. Szenarien für unterschiedliche Operationsparameter wurden untersucht und sind im Rahmen der IEPC 2017 als gemeinsamer Beitrag präsentiert worden.

#### 2. Untersuchung der Nutzung von physikalischen Ähnlichkeitsgesetzen für eine Größenskalierung der existierenden HEMPs um den Entwicklungsaufwand für höhere Schübe physikalisch geführt zu minimieren

- Vergleich von Simulationsergebnissen mit der analytisch berechneten Skalierung macht eine Bewertung der Stärken und Schwächen dieses Ansatzes möglich

Die Anpassungen des Codepakets von Arbeitspunkt 1 hatten auch die automatische Rechengittergenerierung für beliebige Ähnlichkeitsfaktoren zum Inhalt, wodurch entsprechende Scans einfach umzusetzen sind. Entsprechende Rechnungen liegen für unterschiedliche Skalierungsfaktoren vor und wurden ausgewertet. Der Einfluss von Randbedingungen und Ähnlichkeitsfaktor auf die Lösung der Poisson-Gleichung wurde im Rahmen einer Masterarbeit bearbeitet.

3. Entwicklung und Nutzung vereinfachter Hybridmodelle (kinetische Beschreibung von Ionen und Neutralen, Flüssigkeitsmodell für Elektronen), insbesondere für den Plume, um rechentechnisch schnellere Modelle zu testen
  - Vergleich der Ergebnisse von Hybridmodellen mit voll kinetischen Modellen für eine Bewertung der Stärken und Schwächen dieses Ansatzes

Durch den Kontakt mit Mario Merino wurden Vergleiche der unterschiedlichen Modelle für Modellszenarien für Thrusterplumes durchgeführt und auf der IEPC 2017 vorgestellt. Ein vereinfachtes Modell, das für die Elektronen nur die Bewegung der Gyrozentren verfolgt und damit größere Zeitschritte ermöglicht, ist entwickelt worden. Die Annahme einer kreisförmigen Gyrobewegung ist Voraussetzung dieses Modells und wird durch Testrechnungen für die HEMP Szenarien überprüft. Es zeigt sich, dass innerhalb des Beschleunigungschanals diese Methode versagt, da hier die kinetischen Effekte, insbesondere in den Cusps, dominieren.

Zusätzliche Zusammenarbeiten gab es mit der Gruppe von Prof. Koch in Nürnberg, sowie mit der Universität Bremen (mikro-HEMP), sowie mit der Gruppe von Hideaki Ogawa (RMIT University, Melbourne, Australia). Zusätzlich war Prof. Schneider für eine Vortragsreise nach Yokohama eingeladen. Die Vorträge finden sich ebenfalls in den Anlagen.

### **Hauptergebnisse:**

Das Grundkonzept des HEMP-T basiert auf erhöhter Plasmaproduktion im Triebwerk durch die Magnetfeldgeometrie. Die Cusps wirken dabei als magnetische Flaschen, die die Elektronen einschließen und heizen. Da die Stoßlängen des Systems so sind, dass keine Relaxation auf der Systemlänge stattfindet, benötigt man ein kinetisches Modell (Abb.1). Hier wird die „Particle-in-Cell“ Methode zur selbstkonsistenten Beschreibung des Plasmas im Beschleunigungsrohr und im Nahfeld benutzt. Dabei reicht für die hier diskutierten Probleme die elektrostatische Näherung aus, da die durch interne Ströme

erzeugten Magnetfelder gegenüber den extern angelegten Magnetfeldern vernachlässigt werden können.

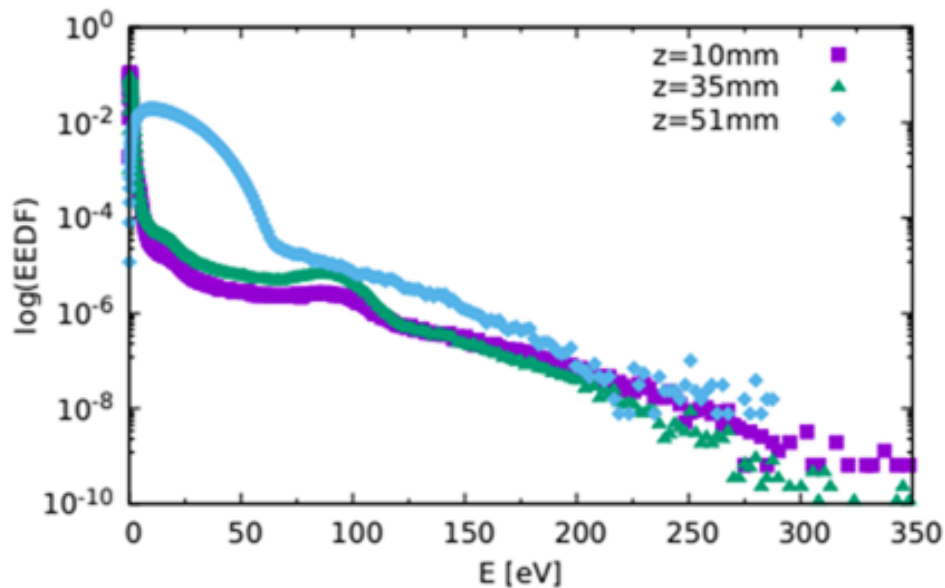


Abbildung 1: Radial gemittelte Elektronenenergieverteilungen an unterschiedlichen axialen Positionen, zeitgemittelt über  $10^6$  Zeitschritte. Deutlich sind die Unterschiede zu einer Maxwell-Verteilung zu erkennen, die sich als Gerade zeigen würde. Daher ist ein kinetisches Modell zu benutzen. Flüssigkeitsbeschreibungen können dies nicht wiedergeben.

Um auch das Ausströmgebiet („Plume“) des Ionenantriebs zu betrachten, in dem wesentlich geringere Plasmadichten als im Beschleunigungsrohr vorliegen, wurde auch ein Hybrid-Modell genutzt, das Elektronen mit einem Flüssigkeitsmodell beschreibt, Ionen dagegen kinetisch.

Die Physik des Einschlusses in HEMP-T ist durch die Magnetfeldkonfiguration der zylindrischen Magnete mit unterschiedlicher Parität bestimmt (Abb.2). Die Magnetfeldstärke ist typisch für Niedertemperaturplasmaanwendungen, d.h. die Elektronen sind magnetisiert und folgen den Magnetfeldlinien, die Ionen dagegen nicht. Der dominante Transportmechanismus ist damit der Transport der Elektronen entlang der Feldlinien, die Ionen folgen durch die Quasineutralitätsbedingung. Zusätzlich wirken an den sich bildenden Cusp-Bereichen magnetische Spiegeleffekte, die die Elektronen zwischen den Cusps hin- und herpendeln lassen und damit die Ionisation des von der Anode einströmenden Neutralgases erhöhen. Nahe der Achse zwischen den Cusps sind vorwiegend axiale Feldlinien vorhanden, die damit ein fast flaches elektrisches Potential im Beschleunigungsrohr durch den starken parallelen Transport der Elektronen erzwingen. Die Bereiche der Plasma-Wand-Wechselwirkung und damit möglicher Erosion werden damit nur auf die schmalen Cusp-Bereiche reduziert. An diesen Stellen garantiert aber das Dielektrikum des Kanals nur relativ geringe radiale Potentialgradienten. Damit

kann erreicht werden, dass die auf die Wand treffenden Ionen unterhalb der Zerstäubungsenergie bleiben.

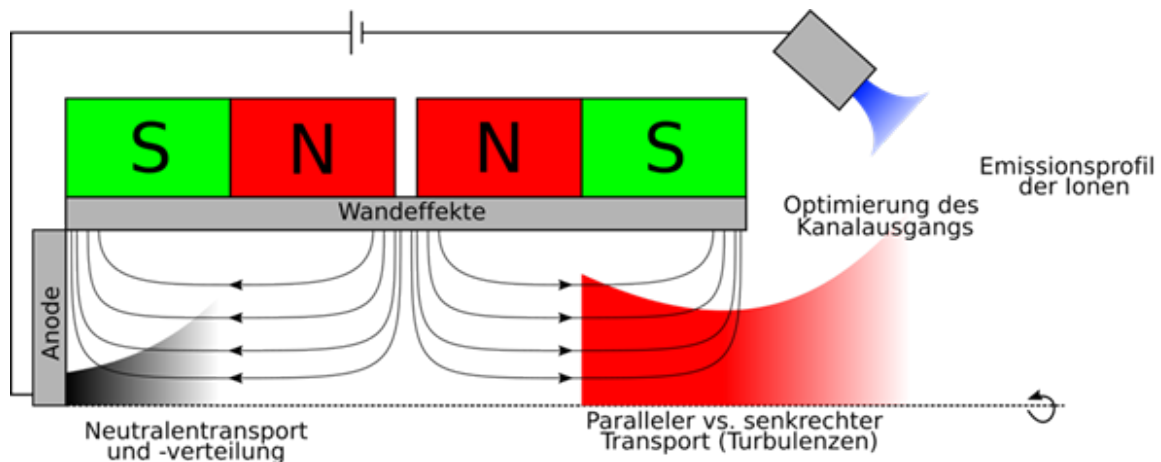


Abbildung 2: Prinzip eines HEMP-T mit den physikalischen Haupteffekten. Neutraltransport und -verteilung bestimmen im Zusammenwirken mit dem Plasmatransport die Thrusterparameter. Im Plasmatransport ist empirisch ein starker Einfluß von Turbulenz zu erkennen, der die Ionisationseffizienz mit definiert. Über die Optimierung des Magnetfelds am Kanalausgang und der Positionierung des Potentialabfalls des Plasmas kann das Emissionsprofil der Ionen (Winkelverteilung) beeinflusst werden. Wandeffekte, insbesondere die Nutzung von Sekundäremission von Elektronen am Dielektrikum, können die Plasma-Wand-Verluste reduzieren.

Somit tritt im Gegensatz zu anderen Ionenantrieben fast keine Zerstäubung im Beschleunigungsrohr auf. Am Thrusterausgang fällt das Magnetfeld ab und die Verluste erhöhen sich stark, so dass dort ein Potentialabfall auftritt, der ähnlich einem Gittertriebwerk ist, die Ionen in den Ausstoßbereich beschleunigt und dadurch den Schub erzeugt. Der Vergleich berechneter Ionenverteilungen mit dem Experiment bestätigt die Simulationsergebnisse, da die Ionen praktisch alle mit der maximalen Energie des Anodenpotentials austreten.

Ein wichtiges Ergebnis des Vorhabens in Bezug auf verbessertes Grundlagenverständnis der HEMP-Technologie ist die Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung des Plasmas im „Plume“ und im Beschleunigungs kanal. Die notwendige gekoppelte Beschreibung wird insbesondere bei der sogenannten „Breathing Mode“ deutlich (Abb. 3). Solche Moden sind aus Hall-Effect Thrustern bekannt und treten auch beim Betrieb des HEMP-T auf, mit Frequenzen des Entladungsstroms im 100kHz Bereich. Die Variation entsteht durch starke Kopplung der Neutralendynamik mit dem Plasma, die sich in Räuber-Beute-Zyklen als periodische Modulation praktisch aller Größen ausprägen. Ihr Einfluss auf die Kenngrößen des Ionenantriebs (z.B. Strom, Dichte, Schub) wurde sowohl numerisch als auch analytisch ausgewertet. In Simulationen des HEMP-T DM3a beobachtet man eine Frequenz von 60kHz. Dies stimmt gut mit einer analytischen 0D Abschätzung überein, die mit den Daten aus der Simulation eine Frequenz von 75kHz liefert.



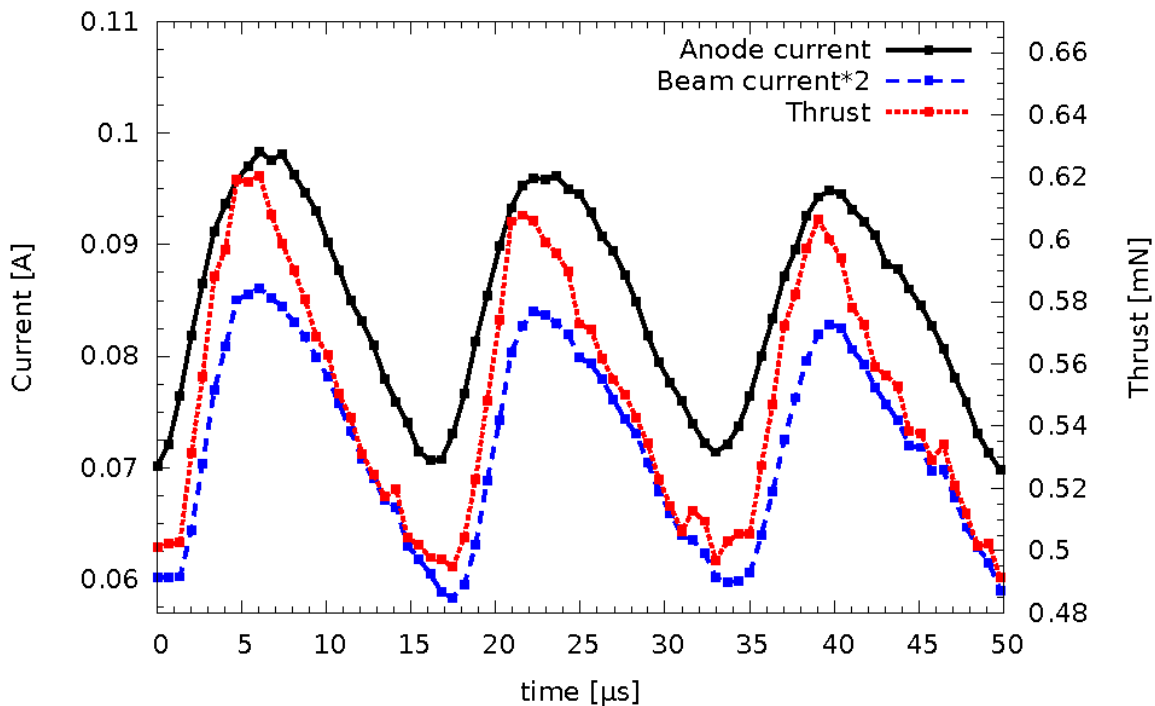


Abbildung 3: Oszillation des Anoden- und Ionenbeamstroms, sowie des Schubes.

Die Oszillation tritt im Ausgangsbereich des Entladungskanals auf und zeigt sich in allen relevanten Plasmaparametern. Die erhöhte Ionisationsrate am Oszillationsmaximum zeigt sich im gesamten Entladungskanal. Die Oszillation entsteht durch eine lokale Verarmung von Neutralen und Ladungsträgern im Ausgangsbereich während des Oszillationsmaximums, welche in der darauffolgenden Abnahme des Entladungsstroms wieder aufgefüllt werden und den Prozess umkehren. Die Elektronentemperatur ist am Oszillationsminimum am größten und trägt damit zur Umkehr der Abnahme bei. Während des folgenden Anstiegs sinkt die Elektronentemperatur wieder. Die optische Emission als leicht zugängliche experimentelle Größe zeigt ebenfalls ein oszillierendes Verhalten.

Das Pulsieren des Plasmas mit Veränderung des Ionenemissionswinkels ist durch den Zusammenhang zwischen Ionenursprung und –emissionswinkel verständlich (Abb. 4). Die sich zeitlich verändernde Position des Potenzialabfalls, insbesondere relativ zum Ausgang des Entladungskanals, bestimmt die Winkelverteilung. Befindet sich der Abfall weiter innen im Beschleunigungsrohr werden durch geometrische Abschattung die hohen Winkel geblockt und es stellt sich ein insgesamt kleinerer Winkel ein. Allerdings ist hier die Ionisationseffizienz durch schlechteres Nachfüllen mit Elektronen und erhöhten Wandverlusten geringer. Ist der Abfall weiter außen, ergibt sich damit ein höherer Ionenemissionswinkel, aber auch höhere Effizienz, allerdings mit Zusatzionisation im Plume. Die Variation der Dichte passt sich diesem Verhalten durch die unterschiedlichen Ionisationseffizienzen an, d.h. ist der Potenzialabfall weiter innen hat man geringere Plasmadichte als wenn er sich weiter außen befindet.

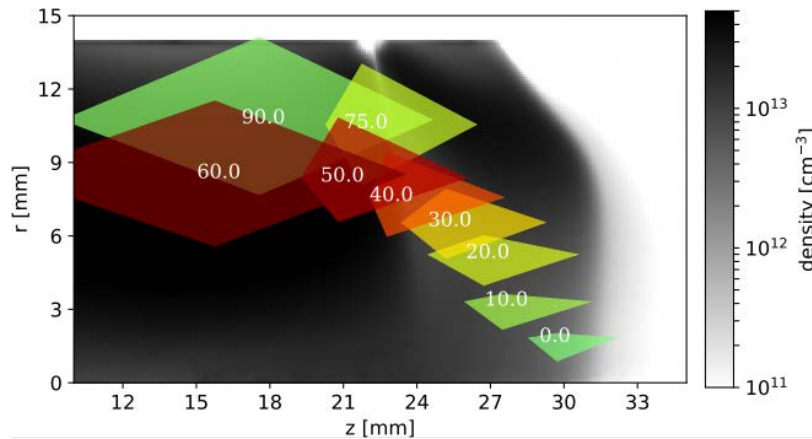


Abbildung 4: Ionisationsverteilungen der Ionen, die den S1 Thruster verlassen. Die Ionen mit kleinem Austrittswinkel entstehen innerhalb des Beschleunigungskanals, daher sollte der Potentialabfall möglichst in das Rohr verschoben sein. Die Farbe der Ursprungsbereiche zeigen den Anteil der Ionen aus dem spezifischen Winkelbereich zum Gesamtstrom der emittierten Ionen von niedrig (grün) zu hoch (rot). In Grau ist die Elektronendichteverteilung am Beschleunigungsrohr zu sehen.

Diese Analyse erklärt dann auch die Ergebnisse über den Einfluss der Anodenspannung: niedrigere Spannung bedeutet geringere Ionisationseffizienz und damit geringere Plasmadichte, weniger Schub und einen geringeren Anteil von zweifach geladenen Xe-Ionen. Das Operationslimit bei kleinen Anodenspannungen ist somit ein Ionisationslimit, da hier nicht genug Ionisation zum Aufrechterhalten der Entladung auftritt. Generell ist die minimal nötige Spannung aber etwas höher als im Experiment. Diese Abweichungen hängen vermutlich damit zusammen, dass im 2D Modell der über Turbulenz getriebene sogenannte anomale Transport der Elektronen nicht korrekt wiedergegeben ist, da er nur parametrisch als „Random walk“ mit empirischem Transportkoeffizienten repräsentiert wird. Dies wird nur durch selbstkonsistente 3D Rechnungen zu klären sein, da dort dann auch die elektrostatische Turbulenz im Modell mitberechnet wird.

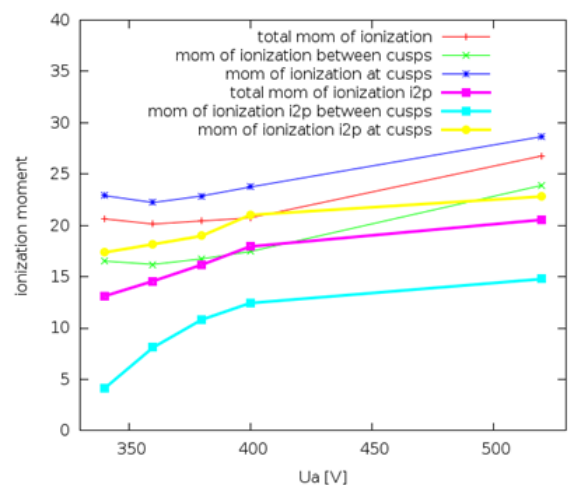


Abbildung 5: Ionisationsgewichtete Einfach- und Doppelionisationsprozesse für unterschiedliche Anodenspannungen.

Allerdings werden Trends sehr gut abgebildet (z.B. Veränderung von Neutralenfluss im 3050, Abb. 5). Bei erhöhtem Neutralgasfluss oder erhöhter Anodenspannung geben die Simulationsergebnisse die experimentellen Trends, insbesondere Effizienzerhöhungen, sehr gut wieder. Hier besitzt das Simulationsmodell „vorhersagenden Charakter“ und ist daher zur prädiktiven Modellierung geeignet.

Zusätzliche Zusammenarbeiten gab es mit der Gruppe von Hideaki Ogawa (RMIT University, Melbourne, Australia). Daraus wurde die Entwicklung und Anpassung eines Optimierungscodes möglich. Die Zusammenarbeit ist über gemeinsame Veröffentlichungen dokumentiert. Unterlagen dazu finden sich in den Anlagen. Ein neu entwickelter Multi-Design-Optimierungs-Algorithmus (MDO-Algorithmus) basierend auf evolutionären Algorithmen hat optimale Triebwerksentwürfe unter Berücksichtigung bestimmter Leistungsparameter, nämlich Schubkraft, Effizienz und Impuls bestimmt. Die MDO-Lösungen gewährleisteten jedoch aufgrund ihrer Abhängigkeit von Schätzungen keine Selbstkonsistenz aus empirischen Modellen basierend auf früheren experimentellen Studien. Die vollständige kinetische PIC-Simulation ermöglicht den sofortigen Zugriff auf die wichtigsten physikalischen Eigenschaften in einer selbstkonsistenten Weise. Grundidee ist hier die Kombination einfacher empirischer Bilanzgleichungsmodelle mit Particle-in-Cell Simulationen. Für die Bestimmung der Parameter der Bilanzgleichungsmodelle, in die z.B. Potentialverlauf, Ionisationsverluste und Wahrscheinlichkeiten der Elektronen zum Erreichen der Cusps eingehen, können sowohl experimentelle Messdaten als auch Simulationsdaten genutzt werden. Dies erlaubt eine realistische Abdeckung des experimentellen Operationsbereichs der betrachteten Thruster, berücksichtigt aber auch Erkenntnisse der Simulationen über physikalische Prozesse und deren Einfluss auf die Parameter. Das relativ einfache Bilanzgleichungsmodell kann danach mit einem bereits implementierten evolutionären Algorithmus für bestimmte Betriebsszenarien optimiert werden. Die früheren Schätzungen der Parameter wurden korrigiert, insbesondere durch Analyse der Strahlstrom- und Austrittswinkelcharakteristiken. Es wurden neue physikalische Erkenntnisse über die Schlüsseldesignfaktoren gewonnen, die zu einem verbesserten MDO-Modell führen. Solche kalibrierten MDO-Modelle sind ideale Werkzeuge für Designplanung, da sie praktisch keine Rechenzeit benötigen und komplizierte physikalische Effekte über Simulationsstudien parametrisch einzubinden sind.

Die Untersuchung der (rein numerischen) Ähnlichkeitsskalierung und deren Einfluss auf die Simulationsergebnisse erlaubte geometrische Skalierungsstudien, die unabhängig von der numerischen Skalierung bewertet werden können. Im Zusammenspiel mit den MDO-Algorithmen bietet sich hier eine direkte Nutzung für das Design von Ionentriebwerken an.

Die Behandlung des langreichweitigen Plumes ist besonders wichtig für die Betrachtung der Wechselwirkung der Ionentriebwerke mit dem Satelliten, z.B. mit Solarpaneelen. In einer Zusammenarbeit mit der Gruppe von Prof. Ahedo aus Madrid wurde ein Hybrid-Modell genutzt. Hier werden die Elektronen als Flüssigkeit beschrieben, während Ionen und Neutrale weiterhin kinetisch mit der PIC Methode behandelt werden. Im Plume ist eine solche Beschreibung durch den verringerten Einfluss von Magnetfeld und Plasma-

Wand-Wechselwirkungen auf das Plasma, insbesondere für die Elektronen, möglich und resultiert in einer vergrößerten räumlichen und zeitlichen Auflösung des Simulationsmodells.

Zur Simulation der Expansion des Plasmas im Plume wurde das 2D PIC Modell an das 3D Hybrid PIC Modell EP2PLUS gekoppelt. Dabei werden die im 2D PIC-Modell berechneten Flussverteilungen der Teilchen im Ausgangsbereich des Triebwerks als Randbedingungen für das 3D Hybrid-Modell genutzt.

Die Ergebnisse zeigen, dass das ursprüngliche Ionenemissionsprofil in der Form eines Hohlzylinders schnell in eine konische Expansion übergeht (Abb. 6, links). Der Potentialabfall im Plume beträgt etwa 20V auf einer axialen Längenskala von zwei Metern. Von besonderem Interesse ist die Expansion der durch Ladungsaustausch- und Impulstransferstöße beeinflussten Ionen, da diese durch ihre geringe kinetische Energie durch die schwachen elektrischen Felder im Plume zurück in Richtung des Triebwerks beschleunigt werden und dabei Schäden durch Zerstäubung verursachen können. Die Expansion dieser Ionen folgt jedoch der Expansion der gesamten Ionendichte und führt zu einer konischen Expansion (Abb.6, rechts). Ein erhöhter Anteil von "zurückbeschleunigten" Ionen ist in den Simulationsergebnissen nicht zu beobachten.

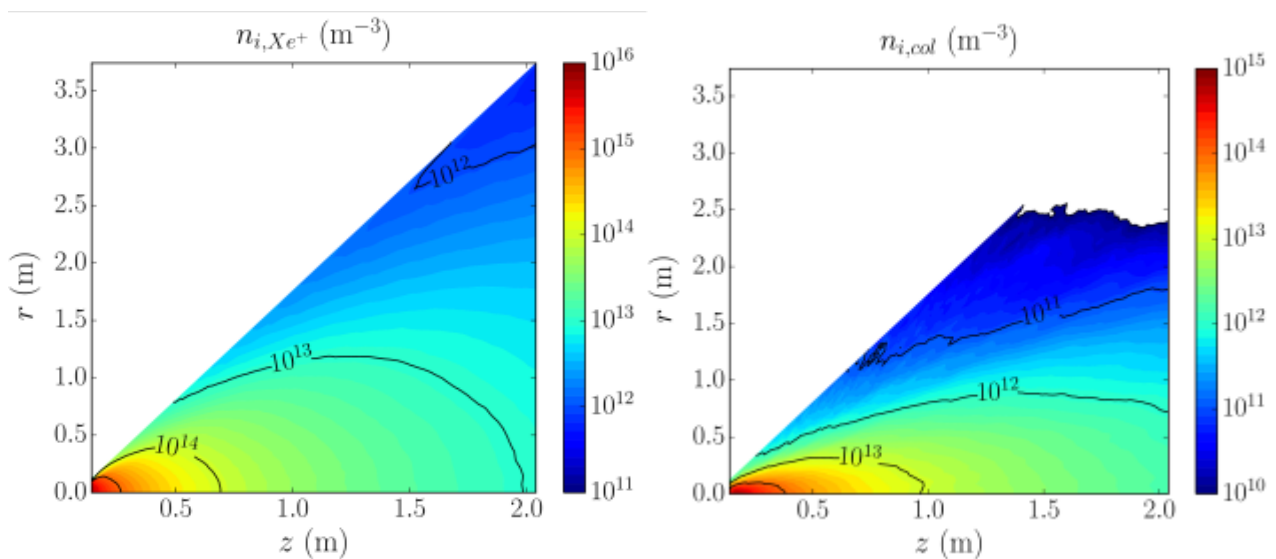


Abbildung 6: Ionendichten einfach geladener Xe-Ionen im Plume eines HEMP-T. Links die Gesamtdichte, rechts die Dichte der Ionen, die durch Ladungsaustausch- und Impulsübertragstöße erzeugt werden.

Um auch die Kopplung des Plasmas im Plume mit dem im Beschleunigungskanal selbstkonsistent berücksichtigen zu können, wurde eine neue Multigrid-Methode entwickelt, die ein kinetisches Modell des gesamten Systems liefert (Abb. 7). Sie nutzt eine im Vorhaben entwickelte Fehlerminimierung an Gittersprüngen als Basis, die dann auch für sehr große Domänen wie beim 3050 angewendet wird.

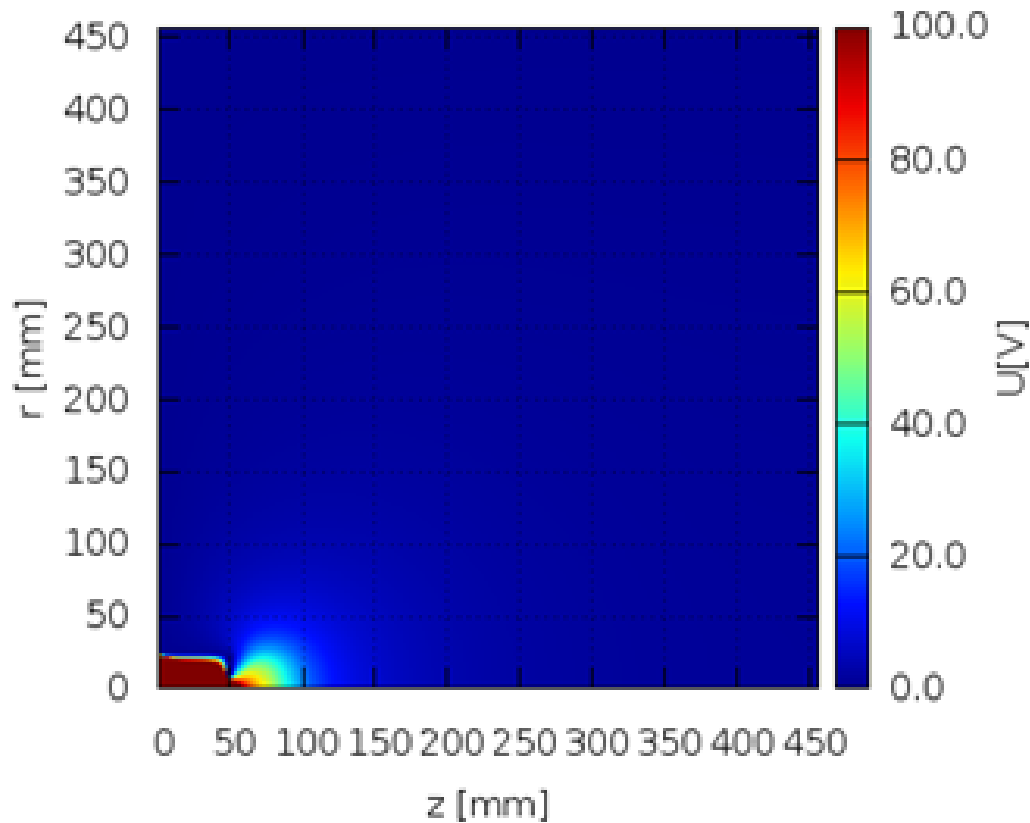


Abbildung 7: Proof-of-principle Simulation mit der Multiskalenmethode für sehr große Domänen.

Die Verbindung von Plasmasimulation und Erosionsanalyse, die in diesem Projekt weiterentwickelt wurde, erlaubte dann auch Studien im EPIC Projekt, wo z.B. der Einfluß des Materials einer kleinen Blende im Ausgangsbereich in Bezug auf Plasmaparameter und Erosion untersucht wurde.

## 2.2 Kostennachweis

Hauptkosten des Projekts waren die Gehälter der Doktoranden, deren Motivation und Leistungsfähigkeit die Grundlage für den Erfolg dieses Projekts darstellte.

Die Ausgaben teilten sich auf in Personalkosten von 524.020,85 €, in Unteraufträge von 108.044,99 € und in Reisekosten von 12.934,82 €.

Der Besuch internationaler Konferenzen erlaubte die Präsentation der Projektergebnisse im internationalen Rahmen durch Vorträge und Diskussionen.

Durch eine kostenneutrale Verlängerung des Vorhabens konnten damit sämtliche Ziele des Vorhabens erreicht werden.

## 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 Thales Deutschland die praxisrelevanten Problemstellungen berücksichtigt. Die Ergebnisse fanden über die Tätigkeit von Herrn Schneider als Professor an der 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 verpflichtend über mehrere Wochen innerhalb des Masterstudiengangs vorgeschrieben sind. Die in diesem Vorhaben bearbeitete Fragestellung stellt gleichzeitig eine Förderung der interdisziplinären Zusammenarbeit (Wechselwirkung von Physik und Ingenieurwissenschaften) und des wissenschaftlichen Nachwuchses (Promotionen, Masterarbeit) 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 der HEMP Ionentriebwerke.

Die erfolgreiche Durchführung des Vorhabens erschließt neue Möglichkeiten zur Optimierung der Anwendung von Magnetfeldern für Raumfahrtanwendungen, aber auch für terrestrische Anwendungen wie die Optimierung von Plasma- und Ionenquellen und die Beschreibung von plasma- und ionenstrahlgestützten Oberflächen- und Volumenprozessen. Die konsequent verfolgte modulare Struktur in der Codeentwicklung ermöglichte eine direkte Beschreibung des Niedertemperaturplasmas und dessen Auswirkungen auf das Raumfahrzeug selbst. Diese neue Qualität der Beschreibung, mit der Möglichkeit eine komplette numerische Beschreibung und Optimierung solcher Systeme durchzuführen, definiert auch die Anschlussfähigkeit dieser Arbeiten im europäischen Kontext, da genau zu diesen Problemen auch bei ESA Fragestellungen zu bearbeiten sind.

## 2.5 Fortschritte bei anderen Stellen

Es gab keine Fortschritte bei anderen Stellen, die die Ergebnisse der Arbeiten im Projekt beeinflusst haben.

## 2.6 Veröffentlichungen der Ergebnisse

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

### **Direkt mit dem Projekt verbundene Ergebnisse:**

Matthias P\*, Kahnfeld D, Schneider R, Yeo S, Ogawa H, Particle-in-cell simulation of an optimized high-efficiency multistage plasma thruster, CONTRIBUTIONS TO PLASMA PHYSICS. 2019; 59(9).

Kahnfeld D\*, Duras J, Matthias P, Kemnitz S, Arlinghaus P, Bandelow G , et al., Numerical modeling of high efficiency multistage plasma thrusters for space applications, Reviews of Modern Plasma Physics. 2019; 3(11).

Kahnfeld D\*, Heidemann R, Duras J, Matthias P, Bandelow G, Lüsrow K , et al, Breathing modes in HEMP thrusters, Plasma Sources Science and Technology. 2018; 27(124002).

Lüsrow K\*, Neumann P, Bandelow G, Duras J, Kahnfeld D, Kemnitz S , et al., Particle-in-cell simulation of the cathodic arc thruster, PHYSICS OF PLASMAS. 2018; 25(1):013508.

Matthias P\*, Bandelow G, Matyash K, Duras J, Hacker P, Kahnfeld D , et al., PIC simulations of capacitively coupled oxygen rf discharges, EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL D. 2018; 72(86).

Duras J\*, Kahnfeld D, Bandelow G, Kemnitz S, Lüsrow K, Matthias P , et al., Ion angular distribution simulation of the HEMP Thruster, JOURNAL OF PLASMA PHYSICS. 2017; 83.

Koch N\*, Duras J, Kahnfeld D, Matthias P, Bandelow G, Lüsrow K , et al., Particle-in-Cell Simulation of a HEMP Thruster Digital Prototype Optimized for Future Satellite Applications, Proceedings of the 35th IEPC, October, 2017, Atlanta, Georgia, USA. 2017.

Lüsrow K, Kemnitz S, Bandelow G, Duras J, Kahnfeld D, Matthias P , et al., Reduction of heat-fluxes during re-entry using magnetic fields (Poster), International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG); 2017 Jul 10; Estoril / Lissabon, Portugal. In: Proceedings of the XXXIII International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG 2017). Estoril, Portugal; 121

Kahnfeld D, Schneider R, Cichocki F, Meriono M, Ahedo E, Duras J , et al., HEMPT thruster discharge and plume simulation with a 2D3v-PIC-MCC and a 3D hybrid fluid-PIC code (Vortrag), International Electric Propulsion Conference; 2017 Okt 08; Atlanta, Georgia, USA.

Matthias P, Schneider R, Heidemann R, Holtmann F, Kahnfeld D, Luskow K , et al., Influence of different anode voltages on the HEMPT (Vortrag), International Electric Propulsion Conference; 2017 Okt 08; Atlanta, Georgia, USA.

Brandt T\*, Schneider R, Duras J, Kahnfeld D, Hey F, Kersten H , et al., Particle-in-Cell Simulation of a Down-Scaled HEMP Thruster, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES. 2016; 14(ists30):Pb\_235-Pb\_242.

Duras J\*, Schneider R, Kalentev O, Kemnitz S, Matyash K, Koch N , et al., INFLUENCE OF ELECTRON SOURCES ON THE NEAR-FIELD PLUME IN A MULTISTAGE PLASMA THRUSTER, Plasma Physics and Technology. 2016; 3(3):126-130.

Kahnfeld D\*, Schneider R, Matyash K, Kalentev O, Kemnitz S, Duras J , et al., SOLUTION OF POISSON'S EQUATION IN ELECTROSTATIC PARTICLE-IN-CELL SIMULATIONS, Plasma Physics and Technology. 2016; 3(2):66-71.

Luskow K\*, Kemnitz S, Duras J, Bandelow G, Kahnfeld D, Schneider R , et al., Electrostatic particle-in-cell simulation of heat flux mitigation using magnetic fields, JOURNAL OF PLASMA PHYSICS. 2016; 82(5).

Luskow K\*, Kemnitz S, Bandelow G, Duras J, Kahnfeld D, Schneider R , et al., PARTICLE-IN-CELL SIMULATION CONCERNING HEAT-FLUX MITIGATION USING ELECTROMAGNETIC FIELDS, Plasma Physics and Technology. (open access) 2016; 3(3):110-115.

Mutzke A\*, Bandelow G, Schneider R, Sputtering of mixed materials of Beryllium and Tungsten by Hydrogen and Helium, JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS. 2015. (In Press)

Duras J\*, Kalentev O, Schneider R, Matyash K, Luskow K, Geiser J, MONTE-CARLO RE-DEPOSITION MODEL DURING TERRESTRIAL MEASUREMENT OF ION THRUSTERS, Acta Polytechnica Journal of advanced engineering. 2015; 55(1):7-13.

Timko H\*, Ness Sjobak K, Mether L, Calatroni S, Djurabekova F, Matyash K , et al., From Field Emission to Vacuum Arc Ignition: A New Tool for Simulating Copper Vacuum Arcs, CONTRIBUTIONS TO PLASMA PHYSICS. 2015; 55(4):299-314.



## **Publikationen, die Methoden des Projekts nutzen:**

Schleede J\*, Lewerentz L, Bronold F, Schneider R, Fehske H, Plasma flow around and charge distribution of a dust cluster in a rf discharge, PHYSICS OF PLASMAS. 2018; 25(4):043702.

Tatsumi R\*, Runov A, Schneider R, Hatayama A, Development of a Lagrange-Monte-Carlo scheme for fluid modeling of SOL/divertor plasmas, CONTRIBUTIONS TO PLASMA PHYSICS. 2018; 58(6-8):675-680.

Deng J, Harff J, Zhang W, Schneider R, Dudzińska-Nowak J, Giza A , et al., The Dynamic Equilibrium Shore Model for the Reconstruction and Future Projection of Coastal Morphodynamics, In: Harff J (Hrsg.), Furmańczyk K (Hrsg.), von Storch H (Hrsg.). Coastline Changes of the Baltic Sea from South to East. Springer International Publishing; 2017. p. 87-106.

Schneider R\*, Luskow K, Kemnitz S, Studies of the Influence of Ball Size and Net Height on Table Tennis Trajectory Distributions, Proceedings Book of the 15th ITTF Sports Science Congress. 2017; 64-73.

Zhang W, Schneider R, Harff J, Hünicke B, Fröhle P, Modelling of Medium-Term (Decadal) Coastal Fore-dune Morphodynamics- Historical Hindcast and Future Scenarios of the Świna Gate Barrier Coast (Southern Baltic Sea), In: Harff J (Hrsg.), Furmańczyk K (Hrsg.), von Storch H (Hrsg.). Coastline Changes of the Baltic Sea from South to East. Springer International Publishing; 2017. p. 107-135.

Yamoto S\*, Homma Y, Inoue H, Sawada Y, Hoshino K, Hatayama A , et al., Effects of Classical and Neo-classical Cross-field Transport of Tungsten Impurity in Realistic Tokamak Geometry, CONTRIBUTIONS TO PLASMA PHYSICS. 2016. (In Press)

Küllig C\*, Teichmann T\*, Wegner T, Meichsner J, Dittmann K, Matyash , et al., Spatially resolved Langmuir probe diagnostics in a capacitively coupled radio frequency argon and oxygen plasma, PLASMA SOURCES SCIENCE & TECHNOLOGY. 2015; 24:015027.

Warrier M\*, Bhardwaj U, Hemani H, Schneider R, Mutzke A, Valsakumar M, Statistical study of defects caused by primary knock-on atoms in fcc Cu and bcc W using molecular dynamics, JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS. 2015.

Yamoto S\*, Homma Y, Hoshino K, Sawada Y, Bonnin X, Coster D , et al., Effects of background plasma characteristics on tungsten impurity transport in the SOL/divertor region using IMPGYRO code, JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS. 2015; 463:615-619.

Zhang W\*, Schneider R, Kolb J, Teichmann T, Dudzinska-Nowak J, Harff J , et al., Land-sea interaction and morphogenesis of coastal foredunes - A modeling case study from the southern Baltic Sea coast, COASTAL ENGINEERING. 2015.

**Abgeschlossene Promotionen:**

Julia Duras, "Kinetic Simulation of Ion Propulsion Systems", University of Greifswald, 2018

Daniel Kahnfeld, "Kinetic and fluid modeling of ion thruster plumes", University of Greifswald, 2020

**Preise:**

Prof. Dr. Ralf Schneider: Senior Research Award 2019 for applied research of the Greifswald University Club