

Skalierung von Ionentriebwerken mittels numerischer Simulation

IT-Sim

Projekt: Skalierung von Ionentriebwerken mittels numerischer Simulation (IT-Sim)

Laufzeit: 01.01.2015 bis 31.07.2018

Gesamtprojektkosten: 215.676,00 €

Davon Förderung: 215.676,00 €

Projektleiter:

Prof. Dr. rer. nat. Norbert Koch

Fakultät für Angewandte Mathematik, Physik und
Allgemeinwissenschaften AMP

Technische Hochschule Nürnberg

Georg Simon Ohm

Ionenantriebe für Raumflugkörper wurden bereits vor über hundert Jahren von den Raumfahrtpionieren Konstantin Ziolkowski und Hermann Oberth konzeptionell als vorteilhaftes Antriebskonzept im Vakuum des Weltalls beschrieben. Die Idee wurde später unter anderem vom Drehbuchautor der „Raumschiff Enterprise“-Serie und -Filme, Gene Roddenberry, mit dem sogenannten „Impulsantrieb“ aufgegriffen.

Ionentriebwerke arbeiten nach dem Rückstoßprinzip, nur dass hier der vom Antrieb ausgestoßene und den Vortrieb generierende Treibstoff vorher ionisiert wird und die Ionen durch elektrostatische Beschleunigung auf hohe Austrittsgeschwindigkeiten gebracht werden. Diese sind typischerweise fünf bis 20-mal höher, als die der chemischen Triebwerke, was zu einer Reduktion der Startmasse eines Satelliten beziehungsweise einer Raumsonde von bis zu einigen Tonnen führt und entsprechende signifikante Kosten- und Nutzungsvorteile mit sich bringt.

Zum Einsatz kommen Ionentriebwerke seit den 1960er Jahren, zunächst im Zuge wissenschaftlicher Missionen, wie zum Beispiel NASA's „SNAPSHOT“ 1965 oder „DEEP SPACE 1“ 2001 sowie auf zahlreichen sowjetrussischen Satelliten. Als Treibstoff wird typischerweise das Edelgas Xenon verwendet, welches in einer Gasentladung („Plasma“) ionisiert wird. Im kommerziellen Bereich werden Ionentriebwerke erfolgreich auf geostationären Telekommunikationssatelliten zur Positionskorrektur seit den 1990er Jahren eingesetzt. Eine massive Nachfrage nach Ionenantrieben ergibt sich neuerdings durch im niedrigen Erd-Orbit positionierte Satellitennetzwerke mit einigen tausend geplanten Satelliten.

Das Forschungsprojekt IT-SIM hat dazu Optimierungspotenziale von Ionenantrieben mittels numerischer Simulationstechniken untersucht. Dabei sollte die Physik der aktuellsten Triebwerkstechnologie, der sogenannten „HEMP-Triebwerke“, qualitativ und quantitativ besser beschrieben und auf dieser Basis Triebwerke für zukünftige Anwendungen entwickelt werden können.

Ziele

Die neuste Ionentriebwerkstechnologie stellt das Hoch-Effizienz-Mehrstufen-Plasma-Triebwerk (HEMP-T) dar, das in den Jahren von circa 2000 bis 2010 von der Firma Thales Electronic Systems GmbH bis zur Produktreife entwickelt wurde. Das HEMP-Triebwerk (HEMP-T) nutzt magnetische Felder zum Plasmaeinschluss und zur selbstkonsistenten Ionenbeschleunigung ohne materielles Beschleunigungsgitter. Es verfügt dabei über mehrere magnetische Stufen und eine daraus resultierende Magnetfeldtopologie, die den Plasma-Wand-Kontakt minimiert. Daraus resultiert ein im Vergleich zu den vorher etablierten Ionenantriebstechnologien kompaktes Triebwerk mit stabilem Betrieb über einen weiten Parameterbereich und einem in seiner Komplexität reduzierten sowie in der Zuverlässigkeit verbesserten Gesamttriebssystem.

Um weitere Entwicklungspotenziale für zukünftige Anwendungen zu erschließen, sollte ein ursprünglich von der Universität Greifswald (Arbeitsgruppe Computational Sciences) entwickelter Simulationscode für diesen Zweck modifiziert und angepasst werden. Durch sukzessive Iteration im Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentell ermittelten Triebwerkscharakteristika sollte das Simulationswerkzeug hinsichtlich der Abbildung der physikalischen Prozesse im Triebwerksplasma, der Numerik, der Rechengeschwindigkeit und auch der Benutzerfreundlichkeit zu einem grundlegenden digitalen Entwicklungswerkzeug für HEMP-Triebwerke hin optimiert werden. Als finales Ziel galt die Installation des Simulationscodes an der Fakultät Angewandte Mathematik, Physik und Allgemeinwissenschaften (AMP) der TH Nürnberg.

Als finales Ziel galt die Installation des Simulationscodes an der Fakultät Angewandte Mathematik, Physik und Allgemeinwissenschaften (AMP) der TH Nürnberg.

Projektverlauf

Zu Beginn des Projekts wurden ursprüngliche Simulationsarbeiten an einem von Thales 2002 entwickelten HEMP-T-Prototypen aufgegriffen. Die verwendete „Particle-in-Cell“-Methode wurde verfeinert, Skalierungsmethoden der plasmaphysikalischen Gesetzmäßigkeiten zur Erhöhung der Simulationsgeschwindigkeit und hinsichtlich ihrer numerischen sowie physikalischen Korrektheit angepasst und verifiziert. Zudem wurden zusätzliche physikalische Basisprozesse implementiert. Dies betraf beispielsweise die Einbeziehung der Zweifach-Ionisation des Treibstoffgases Xenon, die Umladungsstöße von Ionen und Neutralgasatomen im Plasma, aber auch die verbesserte Abbildung der Testumgebung – also die Beschreibung der Rückwirkungen der Wechselwirkung des Ionenstrahls mit der Vakuumkammer, in der das Triebwerk getestet wird. Schrittweise konnte so eine immer bessere Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Daten erreicht werden. Da das Experiment hauptsächlich den vom Triebwerk emittierten Ionenstrahl charakterisiert und entscheidende Plasmaparameter experimentell nicht zugänglich sind, bietet die Simulation hier eine indirekte Diagnosemethode: Stimmen

Simulation und Experiment bei der Ionenstrahl-Charakteristik überein, kann davon ausgegangen werden, dass die Simulation auch die Triebwerksphysik im Entladungskanal richtig abbildet.

Mit Hilfe des nun verbesserten Simulationswerkzeugs wurde mit der digitalen Entwicklung eines neuen HEMP-Triebwerks begonnen, dem „HEMP-T DP1“. Der „Digitale Prototyp DP1“ ist optimiert für die zukünftig als Hauptmarkt für Ionentriebwerke identifizierten, im „Low Earth Orbit LEO“ operierenden Satellitennetzwerke. Mit diesen sollen satellitengestützte Telekommunikationsaufgaben nicht mehr wie bisher durch wenige große geostationäre Satelliten mit hoher Nutzlast, sondern durch Netzwerke mit bis einigen Tausenden kleinen, niedrig fliegenden Satelliten, die in dauerndem Datenaustausch zueinander und mit der Erdoberfläche stehen, erledigt werden. Da für diese Anwendung hohe Stückzahlen an Ionenantriebssystemen in kurzer Zeit bei hohem Kostendruck bereitgestellt werden müssen, wurde der DP1 in seinen Leistungsparametern sowie hinsichtlich eines robusten und kosteneffizienten Designs optimiert.

Die Umsetzung hin zu einem möglichen Hardware-Prototyp wurde in Kooperation mit der FH Kempten, Fakultät Maschinenbau, gestaltet.

In der letzten Projektphase wurde der Simulationscode in die Rechnerinfrastruktur der Fakultät AMP implementiert. Für die Bereitstellung der benötigten Rechnerleistung wurde auch ein zusätzlicher Server angeschafft.

Ergebnisse

Die Simulationen wiesen eine nach den Verbesserungsmaßnahmen gute Übereinstimmung mit dem experimentellen Verhalten auf. Die Fotografien eines HEMP-T im Betrieb (siehe Abbildung 1) zeigen den konzentrierten magnetischen Einschluss des Triebwerkplasmas und daraus resultierend den großen Abstand der Plasmasäule zur Entladungskanalwand. Der große Abstand minimiert den schädlichen Plasma-Wand-Kontakt, verursacht andererseits jedoch Effizienzeinbußen, da das in dem Zwischenraum befindliche Neutralgas nicht ionisiert wird.

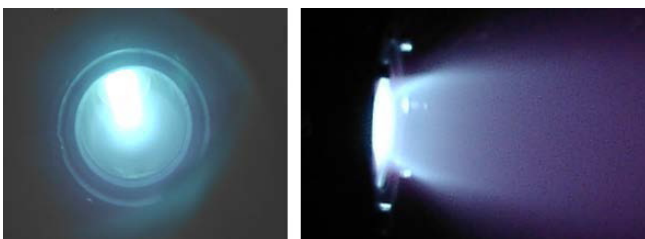


Abb.1: Fotografien eines HEMP-Triebwerks im Betrieb. Links: Sicht in den Entladungskanal. Rechts: Sicht auf den Triebwerksausgang mit emittiertem Ionenstrahl. Foto: N. Koch et al, IEPC 2005

Die Simulationsergebnisse des HEMP-T DP1 zeigen eine Elektronen- respektive Plasmadichteverteilung (siehe Abbildung 2, oben), die stark zur Wand hin abnimmt und so quantitativ den effizienten magnetischen Einschluss bestätigt. Gleichzeitig zeigt sich aber eine verbesserte Füllung des Kanals mit Plasma, was eine erhöhte Ionisationsausbeute verspricht. Ebenso bildet die Simulation der Ionendichtever-

teilung die HEMP-T-typische schwalbenschwanzartige Kontur des emittierten Ionenstrahls ab (siehe Abbildung 2, unten).

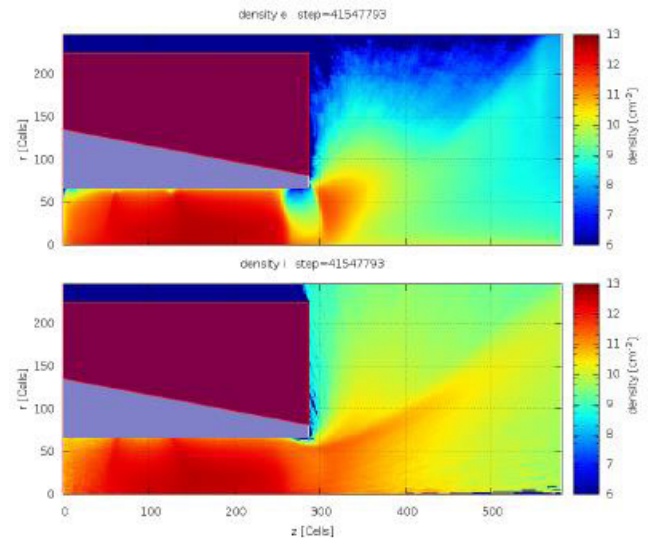


Abb.2: Simulationsergebnisse des HEMP-T DP1. Oben: Verteilung der Elektronen- und Plasmadichte. Unten: Verteilung der Ionendichte (jeweils im logarithmischen Maßstab)

Basierend auf dem iterativ optimierten Digitalen Prototyp wurde ein erster mechanischer Designvorschlag erstellt (siehe Abbildung 3), der einerseits technologische Aspekte, wie Wärmetransport und Vibrationsfestigkeit und die richtige Materialauswahl sowie andererseits die Möglichkeit einer kosteneffizienten Produktion mit hohen Stückzahlen bietet.

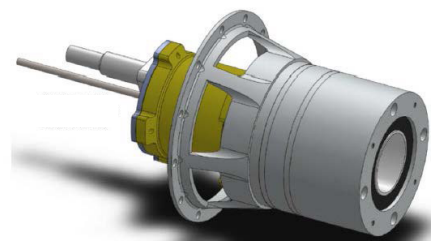


Abb.3: 3D-Konstruktion des vom digitalen Prototypen HEMPT-DP1 abgeleiteten Hardware-Prototypen. Konstruktionszeichnung: FH Kempten

In Summe konnten die Zielstellungen von IT-Sim vollumfänglich erfüllt werden. Zu Projektende stand ein wirkungsvolles und benutzerfreundliches Entwicklungswerkzeug für die Konzipierung von Ionenantrieben vom Typ HEMP-T zur Verfügung, mit dessen Hilfe ein Digitaler Prototyp und ein erster Entwurf eines davon abgeleiteten Hardware-Prototypen erstellt wurde.

Die Einschätzung guter Erfolgsaussichten nach Beendigung des Projekts wurde im Rahmen eines Treffens im September 2017 mit dem DLR, der ESA und der Firma AST Advanced Space Technologies GmbH klar bestätigt. Ebenso stieß die Präsentation der Ergebnisse im Rahmen der „35th International Electric Propulsion Conference IEPC“ im Oktober 2017 auf große Aufmerksamkeit – gerade auch bei den etablierten Herstellern von Ionentriebwerkssystemen.

Überdies kann durch den erfolgreichen Transfer der Software

an die Technische Hochschule Nürnberg einerseits ein Anteil an der studentischen Ausbildung innerhalb der Fakultät AMP geleistet werden, indem ein weiterer Simulationscode zur Beschreibung komplexer physikalischer Problemstellungen für Projekt- und Abschlussarbeiten zur Verfügung steht. Andererseits wird so die Möglichkeit eröffnet, selbst Simulationsdienstleistungen für interessierte Raumfahrtfirmen anbieten zu können.

Fördergeber

Bayerisches Staatsministerium für
Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst



Projektpartner aus der Wissenschaft

UNIVERSITÄT GREIFSWALD
Wissen lockt. Seit 1456



Projektleiter
Prof. Dr. rer. nat. Norbert Koch
Telefon: 0911/ 5880-1873
E-Mail: norbert.koch@th-nuernberg.de

Fakultät für Angewandte Mathematik, Physik und Allgemeinwissen-
schaften AMP
Technische Hochschule Nürnberg
Georg Simon Ohm

www.th-nuernberg.de

In Kooperation mit

AST Advanced Space Technologies GmbH
Thales Electronic Systems GmbH
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V (DLR)