

Gießener Ionenquellen für Raumfahrt und Materialbearbeitung

Land Hessen fördert den LOEWE-Schwerpunkt „RITSAT“

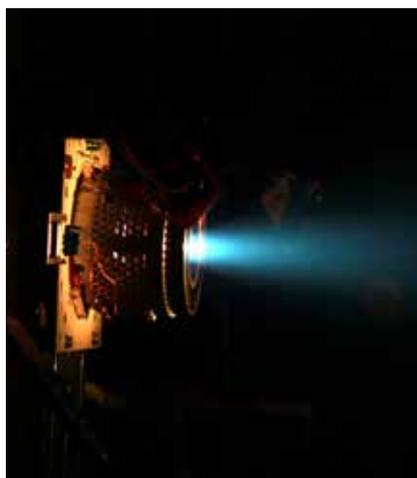
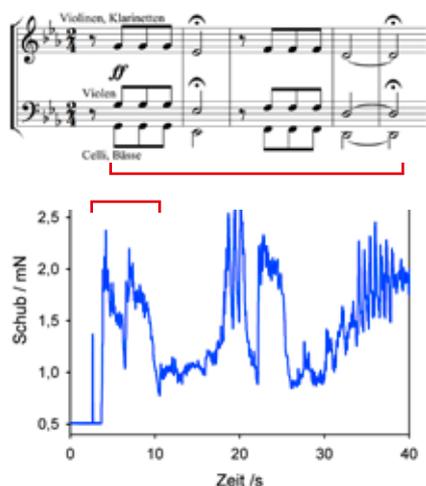
Von Martin Güngerich, Benjamin Lotz und Peter J. Klar

Ionentriebwerke sind bei Weltraummissionen chemischen Triebwerken in vielen Anwendungen weit überlegen. Die technischen Anforderungen an Satelliten und Raumsonden, wie längere Lebensdauer wegen längerer Flugzeiten, höhere Strahlgeschwindigkeiten, Gewichtseinsparungen wegen höherer Nutzlasten und Schubdosierbarkeit mit dem Ziel der Positionsgenauigkeit, steigen ständig. Dies ist entscheidend für den erfolgreichen Einsatz wissenschaftlicher Satelliten und Raumsonden wie LISA (Laser Interferometer Space Antenna), GOCE (Gravity field and steady-state ocean circulation explorer) und BepiColombo. Die Gießener Technologie der Radiofrequenz-Ionen-Triebwerke (RIT) ist eine von weltweit vier konkurrierenden Ionentriebwerkstypen. Unbestritten ist die RIT-Technologie den anderen drei Ionentriebwerkstypen mittel- und langfristig überlegen, insbesondere aufgrund hoher Wirkungsgrade, hoher Zuverlässigkeit und langer Lebensdauer. Das Land Hessen fördert im Rahmen des LOEWE-Schwerpunkts RITSAT die Forschung an Ionenquellen für Raumfahrtantriebe in den Jahren 2012 bis 2014 mit insgesamt 3,7 Millionen Euro.

Als Pionier der elektrischen Raumfahrtantriebe lenkte Professor Horst Löb die Geschichte der Gießener Arbeitsgruppe fast 40 Jahre lang und ist noch heute – im Alter von 80 Jahren – am I. Physikalischen Institut in Gießen und am eng in die Forschungsarbeiten von RITSAT eingebundenen Moscow Aviation Institute (MAI) in Forschung, Konstruktion und Lehre aktiv. Zurzeit seines 1986 im „Spiegel der Forschung“ erschienenen Artikels lag der Fokus der RIT-Entwicklung in den Bereichen der Lageregelungsantriebe kommerzieller Telekommunikationssatelliten und der Marschtriebwerke interplanetarer Raumsonden. Seitdem hat das RIT-Konzept nicht nur massive technische Fortschritte im Laborbetrieb gemacht, sondern auch einen ersten Anwendungstest im Weltraum erfolgreich bestanden. So war der 1999 lancierte Telekommunikationssatellit ARTEMIS mit RITs Gießener Bauart ausgestattet, die zur Bahnkorrektur vorgesehen waren. Weil bei seinem Start jedoch die letzte Stufe der Transportrakete versagte und er so in einem zu niedrigen Orbit ausgesetzt werden musste, wurde den Ionentriebwerken unverhofft die Aufgabe zuteil, ARTEMIS von dort auf seine Soll-Umlaufbahn zu befördern. Die Gießener Antriebe mit ihrer systembedingten Ausdauer bestanden diese Herausforderung, so dass ARTEMIS mit 18

Monaten Verspätung doch noch in Betrieb genommen werden konnte. (Siehe auch unter „Kurz berichtet“: Gießener Ionentriebwerk rettete ESA-Satelliten ARTEMIS, in: „Spiegel der Forschung“, Heft 1/2 – 2003, Seite 70)

Heute verfolgt die Arbeitsgruppe Elektrische Raumfahrtantriebe gemeinsam mit den im Rahmen von RITSAT kooperierenden Gruppen nach wie vor das Ziel, die Extraktionsgitter so zu optimieren, dass ein RIT-Großtriebwerk einsatzreif wird. Perspektivisch sind mittlerweile Durchmesser bis zu 70 cm vorgesehen. Hier spielt das Moscow Aviation Institute (MAI) als wissenschaftlicher Partner und potenzieller Kunde eine tragende Rolle. Am Beispiel der Großtriebwerke, von denen zur Zeit des historischen Artikels aus dem Jahr 1986 bereits ein Exemplar in Gießen existierte und getestet wurde, wird deutlich, auf welch langen Zeitskalen sich Entwicklungen in der Raumfahrttechnik vollziehen. Von der Vorstellung eines Konzepts bis zum ersten (kommerziellen) Anwendungseinsatz im Weltraum müssen zahlreiche, von den Raumfahrtbehörden vorgegebene Schritte („Technology Readiness Levels“, TRL) durchlaufen werden. Diese reichen vom Bau und Test eines Labormusters über Qualifizierungsprozeduren am Boden unter Weltraumbedingungen bis zur In-Orbit-Qualifikation an einem Testsatelliten. Sobald aus tech-



■ Abb. 1: Demonstration der Feinregelbarkeit eines Gießener Ionentriebwerks vom Typ μ NRIT-2,5 (rechts im Testbetrieb): Hier wurde eine Tonaufnahme von Beethovens fünfter Sinfonie verwendet, um den Schub des Triebwerks synchron zur Lautstärke zu modulieren. Deutlich kann man im Schub-Zeit-Diagramm (links unten) die Signaturen der weltberühmten ersten beiden Takte des Werkes erkennen. Ein Video des modulierten Triebwerks ist abrufbar unter <http://www.youtube.com/watch?v=C3VP6J5dFeA> (Quelle des Notensatzes: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:5._Sinfonie_%28Beethoven%29.png)

nischen oder wirtschaftlichen Gründen nennenswerte Komponenten des Triebwerks verändert werden, muss der Qualifizierungsprozess nach Behördenvorgaben von vorne begonnen werden. Die hohen TRLs von 7 bis 9 können durch ein universitäres Forschungsinstitut nicht ohne externe Unterstützung erreicht werden und erfordern die Kooperation mit erfahrenen Industrieunternehmen.

Dass Ionenantriebe sich im Aufwind befinden ist indes unbestreitbar. Der Einsatz der ersten kommerziellen Satelliten, bei denen chemische Triebwerke zur Lage- und Bahnkorrektur vollständig durch elektrische ersetzt sind, steht bei der Firma Boeing unmittelbar bevor. Die ungewollte Zweckentfremdung der ARTEMIS-Triebwerke hat gezeigt, dass sie aufgrund ihrer langen Lebensdauer, ihres hohen Antriebsvermögens und ihres

geringen Treibstoffverbrauchs im Weltraum wirtschaftlich als Marschtriebwerke eingesetzt werden können.

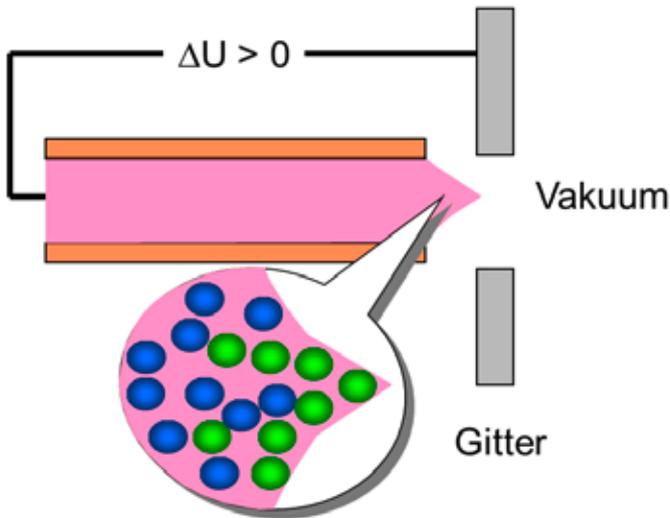
Miniaturisierung der RIT-Technologie

Neben der Weiterentwicklung der Gießener Triebwerke hin zu größeren Dimensionen und Leistungsdaten, folgt man bei RITSAT mit besonderem Einsatz den Erfordernissen, die sich am anderen Ende des Leistungsspektrums aufgetan haben. Für immer diffizilere Anforderungen im Bereich der Lageregelung hochspezialisierter Satelliten besteht nämlich in den kommenden Jahrzehnten ein Bedarf an Triebwerken mit sehr geringen, dafür aber umso feiner regulierbaren und auf kurzen Zeitskalen veränderlichen Schüben. Zukünftige Missionen zur hochpräzisen Erd- und Klimavermes-

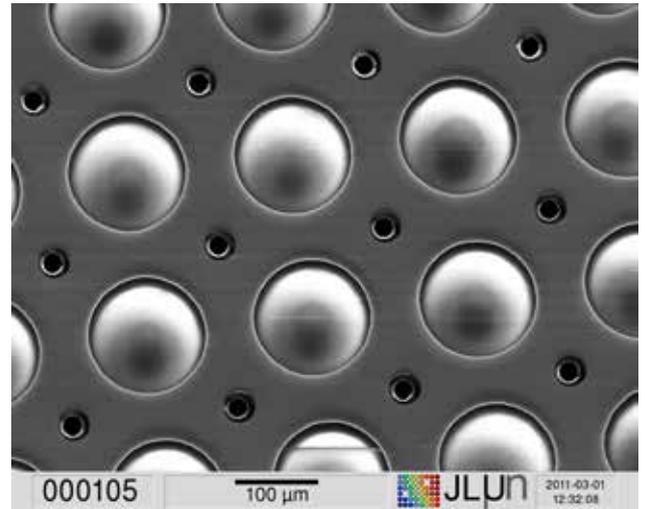
sung (postGOCE) sind auf solche Feinantriebe mit Mikronewton-Schüben ebenso angewiesen wie Weltraumexperimente zur Erforschung von Gravitationswellen (LISA). Im Hinblick auf derartige Anwendungen wird seit 2004 in Gießen die Miniaturisierung der RIT-Technologie vorangetrieben. So befinden sich Gießener „ μ N-RIT“-Triebwerke mit Durchmessern von 2,5 bis 4 cm mittlerweile im Prozess der Qualifizierung unter Weltraumbedingungen (Abb. 1). Weil kleine Triebwerke erhöhte Anforderungen an die Präzision der Steuerelektronik und an die elektromagnetische Verträglichkeit aller Elektronikkomponenten des Antriebs stellen, wurde der Fachbereich Elektrotechnik der Technischen Hochschule Mittelhessen (THM) mit drei Professoren und vier Doktoranden in die Aktivitäten von RITSAT eingebunden.

Ein weiterer Aspekt, der seit dem Erscheinen von Horst Löbs Artikel aus dem Jahr 1986 an Bedeutung gewonnen hat, ist eine gewünschte Abkehr von mitgeführten Edelgasen als Treibstoff bei den RITs erdnaher Satelliten. In Zukunft sollen solche Raumfahrzeuge ihre Antriebsgase nicht mehr in einem Tank mitführen, was ihre Einsatzdauer begrenzen würde, sondern in den oberen Atmosphärenschichten immer wieder „auftanken“ können. Mit diesem Ziel testet RITSAT die Eignung von Sauerstoff-Stickstoff-Gemischen für den Betrieb von Ionentriebwerken.

Um die Konstruktion verfeinerter, hocheffizienter RIT-Typen zu ermöglichen, ist es erforderlich, die Impulsverteilung und Strahlgeometrie von Ionenstrahlen genau zu vermessen und die Messergebnisse in die Optimierung der Gittergeometrien einfließen zu lassen. Diese Aufgabe übernimmt in RITSAT das Institut für Atom- und Molekülphysik der Universität Gießen, wo man z.B. eine Vorrichtung entwickelt und bereits erfolgreich ein-



■ Abb. 2: a) Das physikalische Prinzip eines Triebwerks auf Basis des Kolloidemitters: Durch ein starkes elektrisches Feld erfahren die negativ und positiv geladenen Teilchen einer so genannten „ionischen Flüssigkeit“ Kräfte in entgegengesetzte Richtungen. Auf der rechten offenen Seite des Flüssigkeitsreservoirs lösen sich Ionen ab, werden im Feld beschleunigt und durch eine Aussparung in der Gitterelektrode ins Vakuum ausgestoßen.



■ Abb. 2: (b) Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer im MiNa-Labor der Universität Gießen hergestellten Matrix von Kapillaren, die einen miniaturisierten Kolloidemitter bilden. Diese Strukturen wurden durch Photolithographie aus dem Photolack „SU-8“ auf Silizium-Substraten erzeugt.

gesetzt hat, um die Verteilung kinetischer Ionenenergien mithilfe eines Gegenfeldes zu messen.

An Bedeutung gewonnen hat auch die numerische Simulation des Triebwerks: von der Plasmaerzeugung durch eine elektrodenlose Ringentladung bis hin zur Wechselwirkung des austretenden Ionenstrahls mit den Wänden der Vakuumkammer bzw. des Satelliten. Hierzu hat die Gruppe Festkörpertheorie am I. Physikalischen Institut ein einzigartiges hochskalierbares Programm entwickelt, das sich durch hervorragende Parallelisierbarkeit auszeichnet und somit auf großen Rechenclustern eine hohe Performance erzielen kann. Test und Weiterentwicklung dieser Software profitieren stark von der im Rahmen von RITSAT möglichen Nutzung des Clusters „LOEWE-CSC“ der Goethe-Universität Frankfurt a. M., einer der

leistungsfähigsten Großrechner Europas.

Den an RITSAT beteiligten Forschern aus dem I. Physikalischen Institut und dem Physikalisch-Chemischen Institut der Universität Gießen mangelt es nicht an den auf dem Gebiet der Raumfahrt so immens wichtigen visionären Ideen. Weil die klassischen Konzepte elektrischer Antriebe auf-

grund von Plasma-Oberflächeneffekten nicht unbegrenzt verkleinert werden können, langfristig aber Bedarf an weiterer Schubverkleinerung besteht, arbeiten sie im Mikro- und Nanostrukturierungslabor (MiNa) an völlig neuen Funktionsprinzipien. Dabei soll das Plasma – also das ionisierte Gas – als Ionenreservoir durch ionische Flüssigkeiten ersetzt werden. Ein organi-

■ Der LOEWE-Schwerpunkt „RITSAT“

- Laufzeit: vom 1. Januar 2012 bis 31. Dezember 2014
- Antragsteller: Justus-Liebig-Universität Gießen
- Partner: Technische Hochschule Mittelhessen (THM); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR); Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik (MPE); GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung
- Koordinator: Prof. Dr. Peter J. Klar
- Administrativer Geschäftsführer: Dr. Martin Güngerich
- Fördermittel: 3,7 Millionen Euro



sches Salz, das bei Zimmertemperatur flüssig ist, wird mit einem elektrischen Feld aus einer Kapillare gezogen, wodurch einzelne Ionen oder ganze Iontropfen aus der Oberfläche herausgetrennt, beschleunigt und abgestoßen werden (Abb. 2). Bei einem weiteren Prinzip werden aus einem elektrisch neutralen Gas (z.B. Sauerstoff O₂) mithilfe eines elektrischen Feldes und eines angrenzenden festen Ionenleiters negativ geladene Ionen extrahiert, die anschließend ebenfalls beschleunigt und durch ein Gitter ausgestoßen werden.

Weitere Anwendungen

Die in Gießen entwickelten Ionenquellen eignen sich übrigens nicht nur zum Antrieb von Raumfahrzeugen,

sondern können nach kleineren Modifikationen auch in der Materialbearbeitung zu Ätz- und Beschichtungszwecken eingesetzt werden (Abb. 3). Das macht sie für die unterschiedlichsten Industriezweige interessant, etwa für die Optik- und Halbleiterindustrie. Perspektivisch sind auch Anwendungen von Ionen- und Plasmastrahlen in der Medizintechnik denkbar, wo sie zur Sterilisation und Wundheilung eingesetzt werden können.

„Zentrum für Raumfahrtphysik“

Das bereits seit Anfang der 1960er Jahre in Gießen entwickelte Know-how zu Bau und Konzeption von Ionentriebwerken und -quellen soll als Ausgangspunkt zum Aufbau eines international sichtbaren „Zentrums für

Raumfahrtphysik“ genutzt werden, das sich insbesondere auch in der Löbschen Tradition mit der Thematik „Elektrische Antriebe“ in Forschung, Entwicklung und Lehre befasst. Einen wichtigen Schritt in diese Richtung stellt die kürzlich erfolgte Einrichtung der Professur „Plasma- und Raumfahrtphysik“ (Prof. Markus Thoma) und der mit dem DLR gemeinsam geschaffenen Professur „Raumfahrzeuge“ (Prof. Klaus Hannemann) dar. Durch die Beteiligung von Prof. Thoma an den so genannten „PK4“-Experimenten zu Plasmakristallen in der Schwerelosigkeit wird auch das hochaktuelle Gebiet der komplexen Plasmen Teil des Forschungsportfolios der Universität Gießen.

Gegenüber den anderen Wettbewerbsstandorten in Europa vereinte

DIE AUTOREN

Martin Güngerich, Jahrgang 1975, studierte an der Universität Marburg Physik und promovierte dort 2007 auf dem Gebiet der experimentellen Halbleiterphysik.



Am I. Physikalischen Institut der Universität Gießen organisierte er 2011 die „International Electric Propulsion Conference“ und ist seit Januar 2012 administrativer Geschäftsführer von RITSAT.

Benjamin Lotz, Jahrgang 1983, studierte Physik und Informatik an der Universität Gießen, wo er 2009 sein Physik-Diplom auf dem Gebiet der Radiofrequenz-Ionen-



triebwerke erhielt. Im Juli 2013 wurde er promoviert. In seiner Dissertation beschäftigte er sich mit Luft atmenden RITs. Daneben war er an verschiedenen Projekten zu miniaturisierten Triebwerken und zur Ionenstrahldiagnostik beteiligt.

Peter J. Klar, Jahrgang 1967, promovierte 1997 an der University of East Anglia in Norwich in Experimentalphysik. Nach der Habilitation an der Philipps-Universi-



tät Marburg wurde er 2006 am I. Physikalischen Institut der Justus-Liebig-Universität Gießen auf die Professur für Experimentalphysik mit dem Schwerpunkt Materialwissenschaften berufen. Als Koordinator von RITSAT ist er für die wissenschaftliche Leitung des Schwerpunkts verantwortlich.



ein solches Raumfahrtphysik-Zentrum alle Komponenten zu Entwicklung, Test und Produktion von Ionentriebwerken, verbunden mit einer entsprechenden Ausbildung wissenschaftlich hoch qualifizierten Personals. Der LOEWE-Schwerpunkt soll die Voraussetzung dafür schaffen, dass man in Gießen selbst ganze Triebwerke bauen kann und sie nicht nur erforscht und konstruiert. So soll ein „industrieller Kern“ im Umfeld des Schwerpunkts entstehen, in den hinein aktiv Technologietransfer im Bereich der Anwendungen von Plasma- und Ionenquellen betrieben wird. Der LOEWE-Schwerpunkt soll die nötige kritische Masse schaffen, um das bestehende Know-how im anstehenden Technologiewandel gezielt anzuwenden, anzureichern und zu validieren. Hierzu sind Forschungs- und Entwicklungspartner der Region (PVA TePla, Pfeiffer Vacu-

um etc.) und national (FhG IST Braunschweig), die deutsche Raumfahrtindustrie (EADS Astrium, THALES etc.), internationale Partner (ROSKOSMOS, RIAME, FAKEL etc.) und vor allem die Raumfahrtagenturen DLR und ESA eng eingebunden.

KONTAKT

Dr. Martin Güngerich
Justus-Liebig-Universität
I. Physikalisches Institut
Heinrich-Buff-Ring 16
35392 Gießen
Telefon: 0641 99-33102
martin.guengerich@exp1.physik.uni-giessen.de
<http://www.uni-giessen.de/RITSAT>

■ Abb. 3: Eine Ionen-Sputteranlage im Einsatz: Unten links die Ionenquelle mit austretendem Ionenstrahl, unten rechts das Sputter-Target, das vom Ionenstrahl zerstäubt wird. Oben (in Rot) ist das Substrat erkennbar, auf dem das zerstäubte Material langsam abgeschieden wird.

SIEHE AUCH

Horst Löb: Raumfahrttechnologie auf der Erde angewandt – Ionenstrahlgerät RIM zur Materialbehandlung, in: Heft1/2-1989; http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2008/5448/pdf/SdF-1989-1-2_13-15.pdf

Horst Löb: Ionentriebwerke für Satelliten und Raumsonden – Ein neues Antriebskonzept setzt sich durch, in: Heft 1-1999, Seite 4-11; http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2007/4092/pdf/SdF-1999_1-04-11.pdf