



FORSCHUNG UNTER DER SPITZE DES FALLTURMS

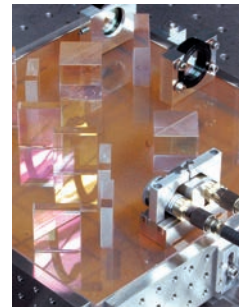
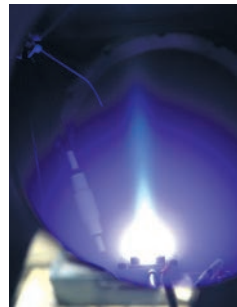




ABB 1 Ausblick von der Fallturmspitze über den Campus und Technologiepark der Universität Bremen

EIN ALLGEMEINVERSTÄNDLICHER
FORSCHUNGSBERICHT
2011/2012

► WWW.ZARM.UNI-BREMEN.DE

ZARM



INHALT

5	VORWORT
7	ZIELE UND ORGANISATIONSSTRUKTUR
	WELTRAUMWISSENSCHAFTEN
13	FUNDAMENTALPHYSIK
41	THERMOFLUIDDYNAMIK
	RAUMFAHRTTECHNOLOGIE
59	METROLOGIE & SATELLITENMISSIONEN
77	RAUMFAHRTANTRIEBE & ENERGIESYSTEME
85	VERBRENNUNGSTECHNOLOGIEN
	STRÖMUNGSMECHANIK
99	MEHRPHASENSTRÖMUNGEN
113	ZARM FAB MBH
123	ZARM TECHNIK AG
127	FÖRDERVEREIN ZARM E.V.
129	FLUGTECHNISCHE VEREINIGUNG E.V.
131	AKTIVITÄTEN
136	VERÖFFENTLICHUNGEN
144	PROMOTIONEN
146	INDEX

ABB 1

Als Alleinstellungsmerkmal verfügt das ZARM mit dem Fallturm Bremen über ein eigenes, erdgebundenes Labor für Forschung unter Schwerelosigkeit – das einzige in Europa.



Prof. Dr. Claus Braxmaier (links)
ZARM Direktor (Raumfahrttechnologie)
Stellvertretender geschäftsführender
Direktor ZARM Institut

Prof. Dr. Claus Lämmerzahl (rechts)
ZARM Direktor (Weltraumwissenschaften)
Geschäftsführender Direktor ZARM Institut
Geschäftsführer ZARM
Fallturm-Betriebsgesellschaft

Unsere Forschungsaktivitäten sind nur mit ausreichender finanzieller Unterstützung möglich. Für die bisherige finanzielle Unterstützung bedanken wir uns ganz herzlich bei der Universität Bremen und dem Land Bremen sowie bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR, dem Deutschen Akademischen Austauschdienst DAAD und vielen anderen Unterstützern.

Das Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) ist ein wissenschaftliches Institut am Raumfahrtstandort Bremen, das sich weltweit als hochkompetenter Partner für Welt- raumforschung etabliert hat und als Ausbilder von be- sonders qualifiziertem Forschungsnachwuchs gilt. Ein Grund für diese Ausnahmestellung liegt sicherlich in der außergewöhnlichen Struktur des ZARM.

Das ZARM betreibt an der Universität Bremen Forschung für den Weltraum und Forschung unter Weltraumbedingungen. Konkret bedeutet dies, dass wir wissenschaftliche Fragestellungen ausarbeiten, Technologien für den Einsatz in Raketen und Satelliten entwickeln sowie Experimente in der Schwerelosigkeit durchführen. Dies erfolgt sowohl im vom ZARM be- triebenen Fallturm als auch auf suborbitalen Raketen, auf Satelliten oder auf der internationalen Raumstation ISS. Das Besondere ist, dass sich unter diesem Dach mehrere Arbeitsgruppen mit unterschiedlichsten For- schungsrichtungen angesiedelt haben. Gemeinsam kön- nen sie mit einer extrem breiten Palette an Raumfahrt- expertise aufwarten. In dieser Broschüre wollen wir unsere Arbeitsgruppen mit ihren aktuellen Forschungen vorstellen: Sie reichen von den Grundlagen der Quan- ten- und Gravitationstheorie über Untersuchungen zum Verhalten von Strömungen unter Schwerelosigkeit bis hin zu Technologieentwicklungen für Satelliten- triebwerke, optische Instrumente, Uhren und inertielle Sensorik für Nutzlasten zukünftiger Weltraummissionen.

Darüber hinaus sind die einzelnen Forschungsgruppen am ZARM interdisziplinär aufgestellt: Expertinnen und

Experten aus den Ingenieurwissenschaften, aus der Physik, der Mathematik und der Informationstechnologie arbeiten hier kreativ und produktiv zusammen. Reflektiert wird die breite Expertise auch durch die neue Leitung des ZARM über ein Direktorium aus den drei ZARM- Bereichen: Weltraumwissenschaften (Prof. Claus Läm- merzahl), Raumfahrttechnologie (Prof. Claus Braxmaier, Christa-und-Manfred-Fuchs-Stiftungsprofessur in Ko- operation mit dem DLR) und Strömungsmechanik (Prof. Michael Dreyer, kommissarisch). Als neuer ge- schäftsführender Direktor des ZARM-Instituts wurde Claus Lämmerzahl bestellt.

Durch diese besondere Struktur und enge Verzahnung entstehen einzigartige Synergieeffekte. In Kombination mit unkonventionellen Ansätzen und Kreativität bilden sie das Hauptmerkmal unserer Forschungsaktivitäten und damit eine wesentliche Grundlage für die Durch- führung anspruchsvoller Forschungsvorhaben.

Diese Faktoren machen uns zu einem wichtigen Be- standteil der Bremer Raumfahrtaktivitäten – sowohl im Hinblick auf die universitäre und außeruniversitäre For- schung als auch auf Kooperationen mit der Bremer Raumfahrtindustrie. Insbesondere unsere weltweite Ver- netzung und Beteiligung an internationalen Projekten in- nerhalb Europas, mit den USA, China, Japan und anderen Ländern, spiegeln eindrucksvoll die Bedeutung und den bisherigen Erfolg des ZARM wider. Diesen Weg, der von unserem leider viel zu früh verstorbenen Institutsgründer Prof. Dr. Hans Rath geprägt wurde, werden wir fortsetzen und intensiv daran arbeiten, unsere Aktivitäten national und international weiter auszubauen. •



Prof. Dr. Claus Lämmerzahl
 Direktor Weltraumwissenschaften
 Geschäftsführender Direktor ZARM Institut
 Geschäftsführer ZARM Fallturm-Betriebsgesellschaft



Prof. Dr. Claus Braxmaier
 Direktor Raumfahrttechnologie
 Stellvertretender geschäftsführender
 Direktor ZARM Institut

ABB 1



ABB 2

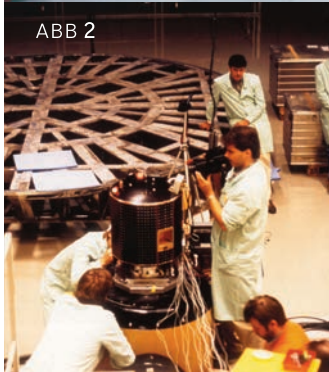


ABB 3

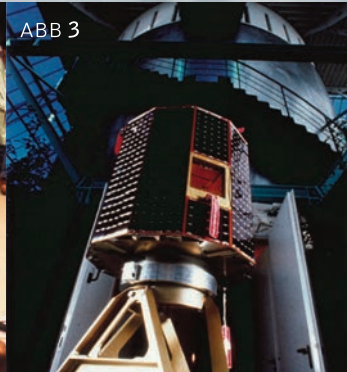


ABB 4



ABB 1 – 4
Der vom ZARM und OHB System gebaute Kleinsatellit BREM-SAT bei der Integration ins Shuttle (1), beim Vibrationstest (2), vor der Verschickung (3) und nach dem Aussetzen (4).

DIE ZIELE

Das erste und wichtigste Ziel für die Zukunft des ZARM ist es, hervorragende, international anerkannte Forschung unter Weltraumbedingungen (Mikrogravitation) und für Anwendungen im Welt- raum durchzuführen. Die Forschungsthemen müssen dabei nicht nur aus den Ingenieurwissenschaften kommen, sondern können auch physikalische, biologische und andere Fragestellungen betreffen. Daher sollen in Zukunft auch andere Forschungsfächer stärker in das ZARM eingebunden werden.

Neben der Fortsetzung bereits begonnener Projekte geht es uns daher insbesondere darum, innovative Projekte anzustoßen und neue Forschungsfelder zu erschließen. Nachdem wir z.B. vor mehr als 15 Jahren mit dem Bau und erfolgreichen Flug des selbstentwickelten ersten bremischen Satelliten BremSat wahre Pionierarbeit geleistet haben, planen wir langfristig wiederum einen ZARM-eigenen Satelliten zu bauen. Seine Aufgabe soll darin bestehen, Experimente zur Grundlagenphysik durchzuführen.

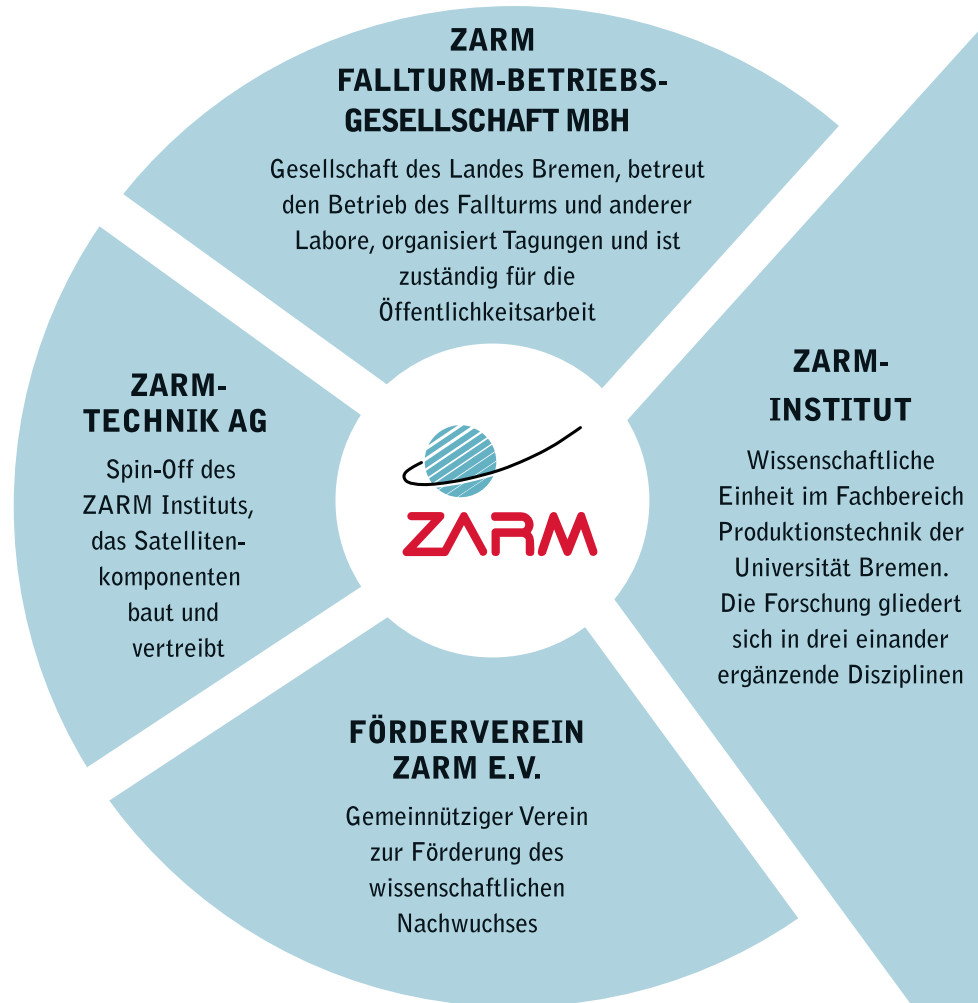
Daneben wollen wir dringend die experimentellen Möglichkeiten am ZARM erweitern und einen zweiten Fallturm bauen. Aufgrund der immer größer werdenden Nachfrage nach Experimenten im Fallturm Bremen, planen wir eine Freifallanlage, mit der etwa 30 Mal mehr Experimente pro Tag durchgeführt werden können. Darüber hinaus wird die neue Anlage, der sogenannte GraviTower, mit einer welt- weiten Besonderheit aufwarten können: neben Schwe- relosigkeit kann auch reduzierte Gravitation erzeugt werden, so dass mit dieser neuen Anlage sowohl die Gravitationsbedingungen im Weltraum als auch auf verschiedenen Planeten und Monden nachgebildet werden können. Der jetzige Fallturm, der mit einer

Experimentdauer von 9,3 Sekunden ein weltweites Alleinstellungsmerkmal unter den erdgebundenen Fallanlagen besitzt, wird selbstverständlich weiterhin genutzt. Unsere Ziele sind aber nicht allein auf die Forschung ausgerichtet:

Einerseits engagiert sich das ZARM für die Qualität der Lehre an der Universität Bremen und für die Stärkung des Raumfahrtstandortes Bremen. So sind wir dabei, einen Master-Studiengang Raumfahrt ein- zurichten, der Grundlagen vermittelt, aber auch gezielt auf die Anforderungen der Bremer Raum- fahrtindustrie vorbereitet. Unser langfristiges Anliegen ist es, Raumfahrtforschung zu einem Forschungs- schwerpunkt der Universität Bremen zu machen.

Andererseits nimmt das ZARM auch seine gesell- schaftlichen Verpflichtungen sehr ernst. In den Natur- wissenschaften und besonders in den Ingenieurwis- senschaften gibt es viel zu wenige Frauen, so dass wir mit speziellen Coachings und durch das Bereitstellen angepasster Rahmenbedingungen nach Kräften versu- chen, Frauen an unser Institut zu holen und langfristig abzusichern. Im Rahmen der Nachwuchsförderung beteiligen wir uns an Förderprogrammen wie z.B. dem Girls‘ Day, dem MINTIA-Klub der Universität Bremen oder dem Weltrettertag des Fachbereichs Produktions- technik. Darüber hinaus bieten wir Praktika für Schü- lerinnen und Schüler sowie Vorträge für Schulklassen an und haben bei der Universität Bremen die Einführung eines Freiwilligen Wissenschaftlichen Jahres angeregt. Mit regelmäßigen Besichtigungsterminen, populären Vorträgen (z.B. im Haus der Wissenschaft in Bremen oder im Schlaunen Haus in Oldenburg) und Pressemit- teilungen zu aktuellen Themen öffnen wir unser Institut auch immer mehr für die breite Öffentlichkeit. •

DIE ORGANISATIONS- STRUKTUR



***EXZELLENT.**

Gewinnerin in der
Exzellenzinitiative

*CHRISTA-UND-MANFRED-
FUCHS STIFTUNGSPROFESSUR

DIREKTORIUM

Prof. Dr. **Claus Lämmerzahl** (geschäftsführender Direktor)
 Prof. Dr. **Claus Braxmaier** (stellv. geschäftsführender Direktor)
 Prof. Dr.-Ing. **Michael Dreyer** (kommissarisch)
 Sekretariat: **Angelika Alex-Smida / Hildegard Roofling**

**WELTRAUM-
WISSENSCHAFTEN****DIREKTOR**

Prof. Dr.
Claus Lämmerzahl

Fundamental Physics

Prof. Dr. **Claus Lämmerzahl**, Dr. **Sven Herrmann**

Thermofluid Dynamics

Dr.-Ing. **Rodion Groll**

Micro Satellites & Modelling

Prof. Dr. **Claus Lämmerzahl**
 Dr.-Ing. **Benny Rievers**, Dipl.-Ing. **Holger Oelze**

Die Fachrichtung Weltraumwissenschaften betreibt Grundlagenphysik mit Experimenten und Anwendungen im Weltraum und in der Mikrogravitation. Dabei geht es meist um die Grundlagen der Quantenmechanik und der Allgemeinen Relativitätstheorie, wie z. B. den Test des Äquivalenzprinzips im Weltraum.

**RAUMFAHRT-
TECHNOLOGIE**

KOOPERATIONS-
PROFESSUR
 UNI BREMEN/DLR*

DIREKTOR

Prof. Dr.
Claus Braxmaier

Metrology & AVIT Prof. Dr. **Claus Braxmaier****Space Propulsion & Energy Systems**

Dr.-Ing. **Peter Rickmers**

Aerospace Combustion Engineering

Dipl.-Ing. **Christian Eigenbrod**

Space Components/Environmental Testing

Dipl.-Ing. **Holger Oelze**

Phase 0/A Studies Dr. **Norman Gürlebeck**

Die Disziplin Raumfahrttechnologie treibt Technologieentwicklungen für zukünftige Satellitenmissionen voran: sowohl in Machbarkeitsstudien, als auch in experimentellen Laboraufbauten bis hin zu Ingenieursmodellen. Wichtige Kooperationspartner dabei sind beispielsweise das DLR-Institut für Raumfahrtssysteme und die Industrie.

**STRÖMUNGS-
MECHANIK****DIREKTOR**

(kommissarisch)
 Prof. Dr.-Ing.
Michael Dreyer

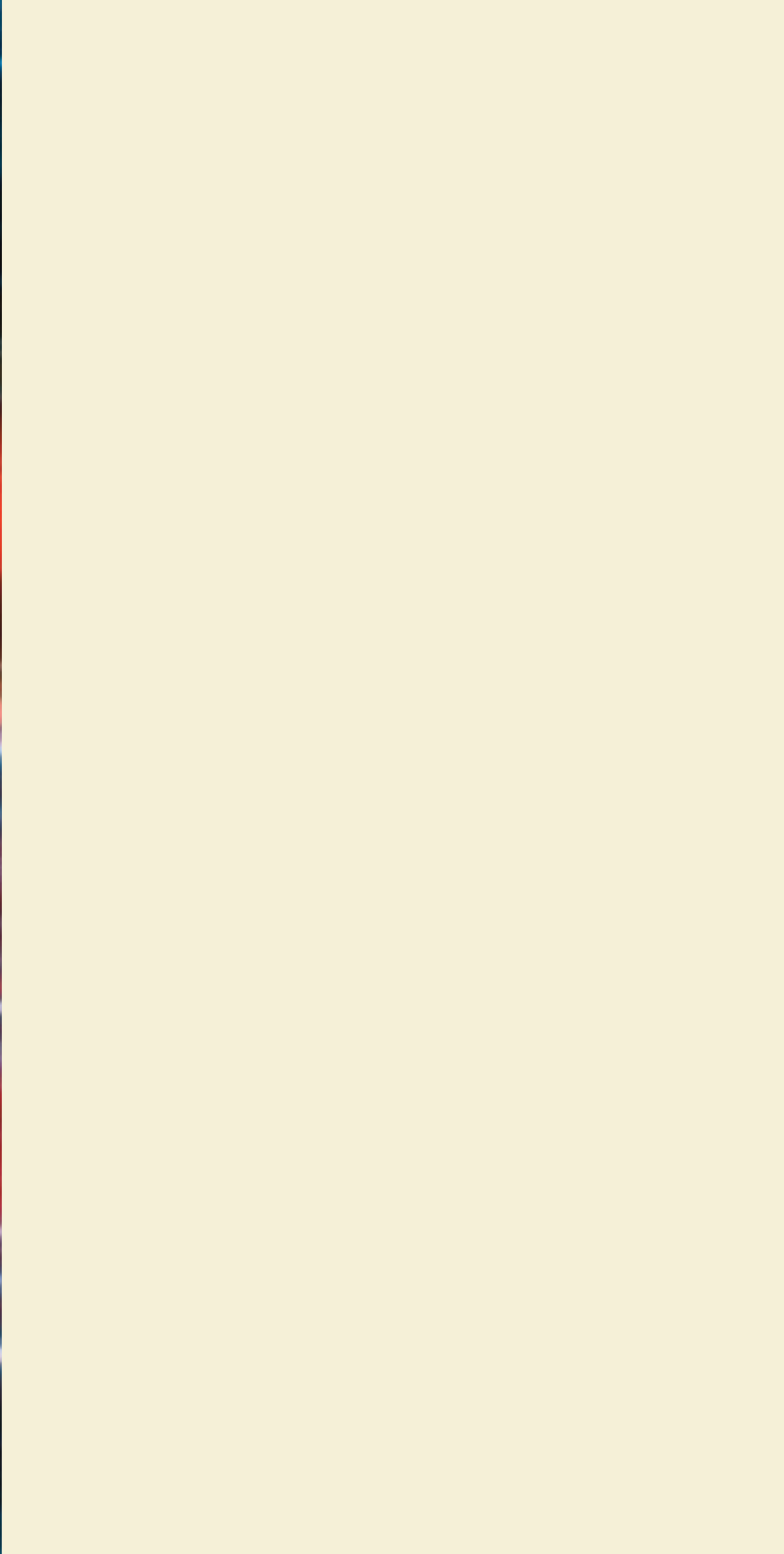
Multiphase Flow

Prof. Dr.-Ing. **Michael Dreyer**

Experimental Fluid Mechanics

Dipl.-Ing. **Holger Oelze**

Die Strömungsmechanik beschäftigt sich mit dem Verhalten von Flüssigkeiten in der Schwerelosigkeit. Mit Experimenten zum Transport kryogener (tiefkalter) Treibstoffe sind wir an der Entwicklung der neuen Oberstufe der Ariane 5 beteiligt.





ZAR

WELTRAUMWISSENSCHAFTEN

FUNDAMENTALPHYSIK

THERMOFLUIDDYNAMIK

ABB 1

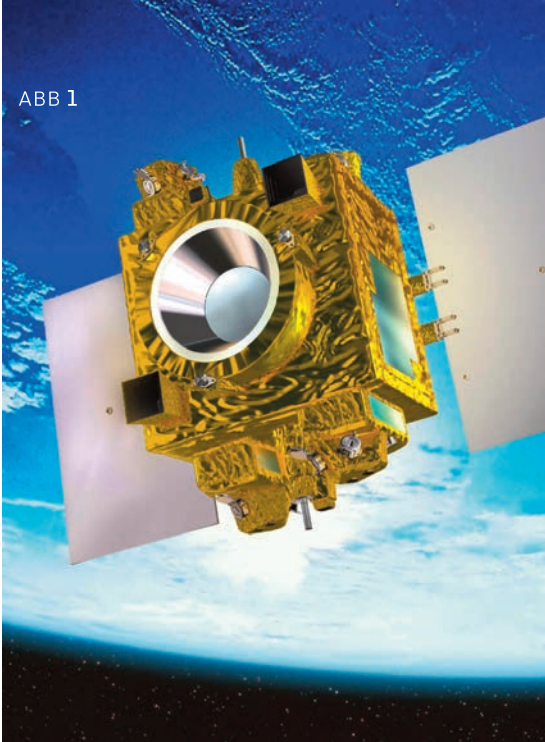


ABB 2



ABB 3
Quelle:
Holger
Ahlers

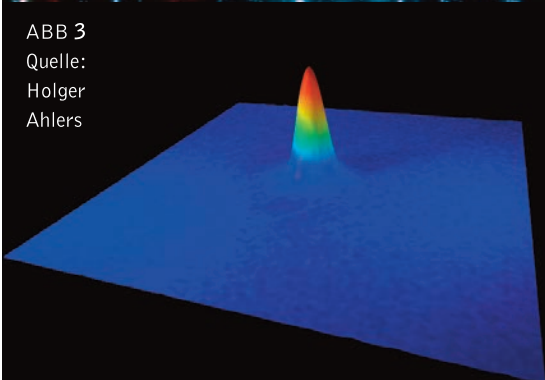


ABB. 1-3 Die in der Arbeitsgruppe Fundamentalphysik bearbeiteten Themen reichen von Satellitenmissionen zum Test fundamentaler Physik wie die Mission MICROSCOPE (1) über die allgemein relativistischen Berechnung der Orbits von Himmelskörpern um schwarze Löcher (2) bis hin zu Quantenphysik und Bose-Einstein-Kondensation (3).

DIE FUNDAMENTALPHYSIK

Die Fundamentalphysik ist die größte Abteilung am ZARM. Sie untersucht Grundlagen der Physik unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit und im Weltraum. Die meisten Themen kommen dabei aus der Gravitationsphysik und der Quantenmechanik, wie z.B. das Äquivalenzprinzip, die Frage des Messprozesses oder Interferenzen bei großen Massen. Des Weiteren werden Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie berechnet, etwa die Bahnen von Pulsaren um Schwarze Löcher. Die Erkenntnisse der Fundamentalphysik finden auch Anwendung in praktischen Alltagstechnologien wie Positionierung, Navigation oder der Vermessung der Erde, der Geodäsie.

Ein Großteil der Experimente dient der Vorbereitung von Weltraummissionen. Begleitende theoretische Untersuchungen liefern die Motivation und Notwendigkeit für diese Experimente. Sie beschreiben aber auch die Experimente selbst und werden durch hochpräzise Modellierungen der einzelnen Komponenten im Experiment ergänzt. Bei der Bearbeitung der Fragestellungen gibt es eine hervorragende synergetische Zusammenarbeit von theoretischer und experimenteller Physik, Mathematik und Ingenieurwissenschaften. Die Experimente sind einerseits Tests grundlegender Prinzipien der Natur, dienen aber auch zur Technologieentwicklung für Anwendungen im Weltraum. Die Hauptaktivitäten der Abteilung Fundamentalphysik sind:

- MICROSCOPE – Satellitenmission zum Test des Äquivalenzprinzips,
 - QUANTUS – Bose-Einstein-Kondensate und Materiewelleninterferometrie in Schwerelosigkeit
 - PRIMUS – Atominterferometrie und Metrologie in der Schwerelosigkeit,
 - Pioneer-Anomalie,
 - mathematische Relativitätstheorie,
 - angewandte Allgemeine Relativitätstheorie,
 - Quantengravitation/Quantengravitationsphänomenologie,
 - Satelliten-Simulator HPS,
 - Hochpräzisionsmodellierung und
 - Mikrosatelliten.
- Dabei sind wir stark in nationale und internationale Netzwerke eingebunden:
- zusammen mit Arbeitsgruppen der Gravitationsphysik von benachbarten Universitäten im Graduiertenkolleg „Models of Gravity“,
 - im Forschungszentrum QUEST der Universität Hannover, in der
 - QUANTUS-Kollaboration, bei der Experimente mit ultrakalten Atomen im Fallturm in der Schwerelosigkeit durchgeführt werden, sowie in einem
 - geplanten Sonderforschungsbereich zum Thema „Relativistische Geodäsie“, der unter der Federführung des Instituts für Erdvermessung der Universität Hannover in der Hauptbeantragung ist.
- Weitere intensive Kontakte bestehen nach Frankreich, Mexiko, Israel und Usbekistan. •

Während einer Mondlandung in den siebziger Jahren hat ein Astronaut des amerikanischen Apollo-Programms das Äquivalenzprinzip sehr einfach – wenn auch ungenau – einem großen Publikum demonstriert: Er ließ eine Vogelfeder und einen Hammer gleichzeitig fallen und beide Objekte landeten gleichzeitig auf dem Mondboden. Aufgrund der Abwesenheit von Umgebungsluft (Vakuum) auf dem Mond ist die Fallgeschwindigkeit einer Vogelfeder und eines schweren Hammers gleich.

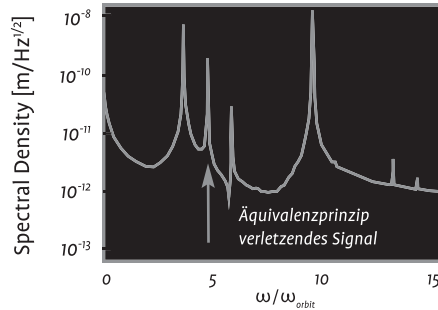


ABB 1



ABB 2

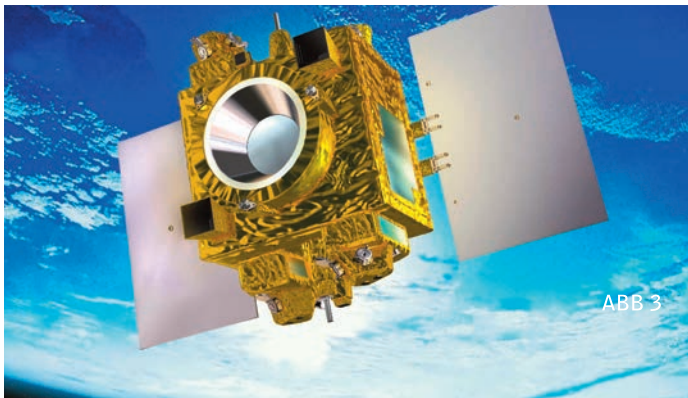


ABB 3

ABB. 1 Numerische Simulation einer Verletzung des Äquivalenzprinzips. Dargestellt ist das Frequenzspektrum der differentiellen Beschleunigung zweier Testmassen.

ABB. 2 Differentieller Beschleunigungssensor der MICROSCOPE Mission

ABB. 3 MICROSCOPE im Erdorbit - künstlerische Darstellung

DIE MICROSCOPE SATELLITENMISSION

In dem französisch-deutschen Gemeinschaftsprojekt MICROSCOPE (MICRO Satellite a trainée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence) werden auf einem Satelliten Experimente zum Test des Äquivalenzprinzips durchgeführt. Das Äquivalenzprinzip besagt, dass alle Objekte gleich schnell fallen, wenn man alle nichtgravitativen Störkräfte wie z.B. den Luftwiderstand vernachlässigt.

Es ist eine der Voraussetzungen der berühmten Allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein – eine der großen Theorien der heutigen Zeit, die unsere Welt materiell beschreiben. Wenn das Äquivalenzprinzip nicht streng gelten sollte, hätte dies folgenreiche Auswirkungen auf unser heutiges physikalisches Verständnis der Welt.

Auf dem MICROSCOPE-Satelliten soll nun getestet werden, ob das Äquivalenzprinzip auch noch bei einer extrem hohen Genauigkeit von 10^{-15} (1/1.000.000.000.000.000) gilt. Laborexperimente auf der Erde erreichen bislang eine Genauigkeit von 10^{-13} . Aufgrund der im Weltraum verfügbaren langen Messzeit wird eine Verbesserung der Genauigkeit um zwei Kommastellen erwartet.

Die Mission soll 2016 starten und ist derzeit weltweit die einzige laufende Mission der Fundamentalphysik, die mit ihrer verwendeten Technologie großen Einfluss auf weitere geplante grundlagenphysikalische Missionen dieser Art hat, wie z.B. Satellitenmissionen zur Vermessung des Schwerfelds der Erde. Das ZARM ist der größte ausländische Partner dieser von der französischen Raumfahrt-

agentur CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) durchgeführten MICROSCOPE-Mission und ist für folgende Aufgaben verantwortlich:

ACCELEROMETERTEST: Im Fallturm Bremen werden die vom ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales) entwickelten Accelerometer (Beschleunigungssensoren) vor ihrem Einsatz auf dem Satelliten im freien Fall getestet. Dafür wurde die Experimentkapsel mit einer neuen Technologie ausgestattet, mit der man eine Freifall-Qualität von bis zu 10^{-8} g erreichen kann. Das entspricht einem Hundertmillionstel der normalen Erdanziehungskraft.

SIMULATIONEN: In Zusammenarbeit mit dem Bremer DLR-Institut entwickelt das ZARM einen Simulator für den gesamten Satelliten, inklusive Experimentaufbau. Mit dem High Performance Satellite Dynamics Simulator (HPS) werden auch seine Bewegung und Umgebungsbedingungen wie Sonnenwind oder Restatmosphäre am Computer simuliert. Mit dieser Methode kann im Vorfeld der Mission eine extrem genaue Datenanalyse entwickelt werden.

DATENAUSWERTUNG: Das ZARM hat das Erstzugriffsrecht auf die wissenschaftlichen Daten aus der Mission und wird diese auch mittels des HPS-Simulators auswerten. •

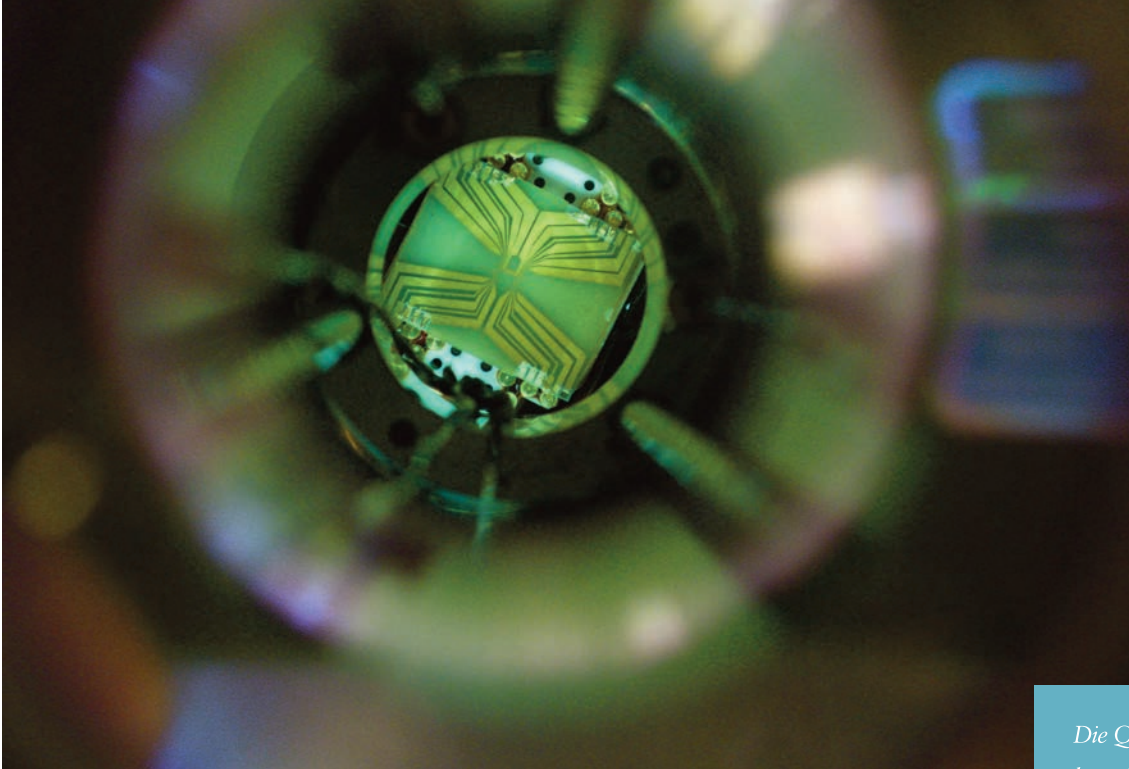


ABB. 1 Blick ins Herz des QUANTUS Experiments:
Der sogenannte Atomchip erlaubt die schnelle und effiziente
Erzeugung eines Bose-Einstein Kondensats aus Rubidium Atomen.

*Die QUANTUS-Kolla-
boration wird vom
Deutschen Zentrum für
Luft- und Raumfahrt
(DLR) gefördert mit
Mitteln des Bundesmi-
nisteriums für Wirt-
schaft und Technologie
(BMWi).*

QUANTUS – ULTRA-KALTE QUANTENGASE IN SCHWERELOSIGKEIT

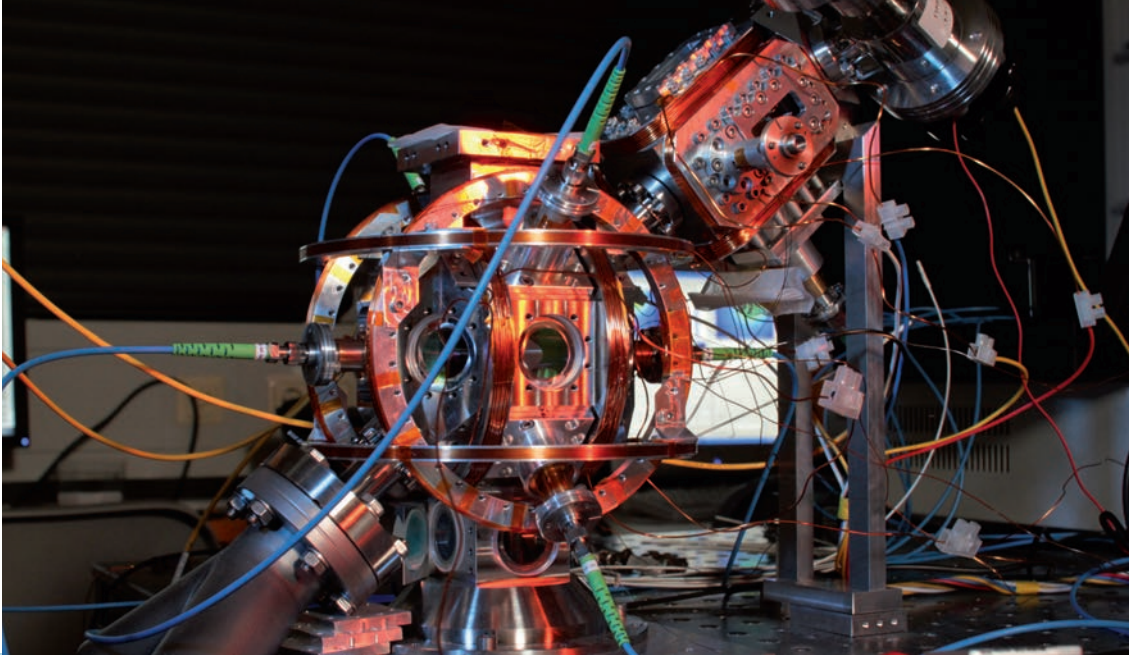
Das Verbund-Projekt QUANTUS (Quantengase unter Schwerelosigkeit) ist ein Verbundprojekt am Fallturm des ZARM. Es untersucht die Physik ultrakalter atomarer Gase unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit, denn im Bereich tiefster Temperaturen treten Effekte der Quantenphysik zu Tage, deren Untersuchung nicht nur von fundamentalem physikalischem Interesse ist, sondern auch zur Entwicklung von Messinstrumenten für kleinste Kräfte und Beschleunigungen dient. Die besonderen Bedingungen unter Schwerelosigkeit erlauben für bestimmte Fragestellungen prinzipiell empfindlichere Messungen als im erdgebundenen Labor. Langfristig wird mit QUANTUS die Eignung solcher Quantengase für Präzisions-Experimente im Weltraum untersucht.

Nachdem das QUANTUS-Team 2004 mit der Entwicklung einer Fallkapsel-Apparatur begonnen hatte, erreichte es im November 2007 den ersten Meilenstein: In einem Fallturm-Experiment konnte das weltweit erste Bose-Einstein-Kondensat (BEC) im freien Fall erzeugt und beobachtet werden: ein ultra-kaltes Gas aus ca. 10.000 Rubidium-Atomen. Seitdem wurde in mittlerweile weit über 400 Abwürfen das Verhalten des BEC in einem Parameterbereich untersucht, welcher in bodengebundenen Experimenten nicht zugänglich ist.

Aufgrund seiner Eigenschaften wird ein BEC auch als riesige, kohärente Materiewelle beschrieben. An ihr lassen sich – ähnlich wie bei einem optischen Laser – interferometrische Messungen, d.h. Messungen der Überlagerung von Materiewellen, durchführen. So kann man u.a. gravitative Kräfte messen, wobei die Präzision einer solchen Messung drastisch zunimmt, je länger die frei fallenden Atome beobachtet werden können. Mit einer Freifallzeit von mehreren Sekunden, stellt der Fallturm für derartige Messungen somit ein hervorragend geeignetes Labor dar. Seit 2010 werden derartige Interferometrie-Messungen mit der QUANTUS-I Apparatur im Fallturm durchgeführt.

Ermutigt durch diese Erfolge wird zurzeit eine weitere, noch kompaktere Apparatur aufgebaut, die auch den Katapultmodus des Fallturms ausnutzen und so noch längere Messzeiten ermöglichen wird. Zudem soll die neue Apparatur dann mit zwei atomaren Gasen, nämlich Kalium und Rubidium, arbeiten.

Als nächster Schritt in Richtung Weltraum wird im Rahmen von QUANTUS momentan der Start einer Forschungsrakete (MAIUS) mit einer Apparatur zur Erzeugung eines BECs vorbereitet. Diese vom DLR geförderte Mission soll Ende 2014 starten und bis zu sechs Minuten Schwerelosigkeit für Experimente mit einem BEC ermöglichen. •



FÖRDERER

Die PRIMUS-Kollaboration wird vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi).

ABB. 1 Die Vakuumkammer des PRIMUS Experiments, mit mehreren optischen Zugängen zur Laserkühlung der Rubidium-Atome.



ABB. 2 Der Frequenzkamm in einer Fallkapsel

PRIMUS – TEST DES ÄQUIVALENZPRINZIPS MIT ULTRA-KALTEN ATOMEN IM FALLTURM

Das Projekt PRIMUS (Präzisionsinterferometrie mit Materiewellen unter Schwerelosigkeit) baut auf den technischen Entwicklungen von QUANTUS auf. Es hat zum Ziel, bereits im Fallturm das Potenzial der Quantengase für eine erste wissenschaftliche Präzisionsmessung zu nutzen. Hierfür soll der freie Fall von Rubidium- und Kaliumatomen verglichen werden durch gleichzeitige Messungen an Materiewellen-Interferometern. Dies zielt letztlich auf einen Test des Äquivalenzprinzips ab, nach dem beide Atome dieselbe Fallbeschleunigung, unabhängig von ihrer Masse und Zusammensetzung, haben sollten. Das Äquivalenzprinzip ist eine der Grundannahmen, auf der die Theorie zur Beschreibung der Gravitation, der Allgemeinen Relativitätstheorie, aufbaut.

Die Zielstellung im Fallturm ist dabei, bereits mit wenigen Abwürfen eine Messgenauigkeit von bis zu 10^{-11} g (1/100.000.000.000 der Erdbeschleunigung) nachzuweisen. Damit bliebe die Genauigkeit zwar immer noch hinter den empfindlichsten erdgebundenen Tests des Äquivalenzprinzips zurück, welche mit Drehpendeln durchgeführt wurden. Sie läge jedoch bereits im Bereich der genauesten Testexperimente mit frei fallenden Testmassen. Die Forscher erhoffen sich jedoch, mit der Verwendung von Quantengasen als Testmassen einen physikalisch anders gearteten und möglicherweise vielverspre-

chenderen Zugang, um nach Verletzungen des Äquivalenzprinzips zu suchen.

Außerdem sollen im PRIMUS-Fallturmexperiment die systematischen Grenzen solcher Tests genauer untersucht werden und Wege ermittelt werden, diese in zukünftigen Experimenten zu überwinden. Langfristig dient PRIMUS damit der Vorbereitung eines weltraumbasierten Präzisionsexperiments, bei dem im Vergleich zum Fallturm die Freifallzeit weiter verlängert und auch über viele tausend Messungen gemittelt werden kann. So kann eine deutlich gesteigerte Messempfindlichkeit von bis zu 10^{-15} g erreicht werden.

FREQUENZREFERENZEN FÜR PRÄZISIONSMESSUNGEN

Ein weiterer Fokus im Projekt PRIMUS liegt auf der Entwicklung von hochstabilen Frequenzreferenzen für ein solches weltraumgestütztes Präzisionsexperiment. So wurde z.B. ein sogenannter optischer Frequenzkamm in einer Fallkapsel aufgesetzt. Dieser Frequenzkamm dient als gemeinsame Referenz für die bei den Versuchen eingesetzten Laser unterschiedlicher Wellenlänge. Weiterhin wird auch der Einsatz von sogenannten optischen Resonatoren vorbereitet, die zur Realisierung von Lasern mit sehr schmaler Linienbreite dienen. •

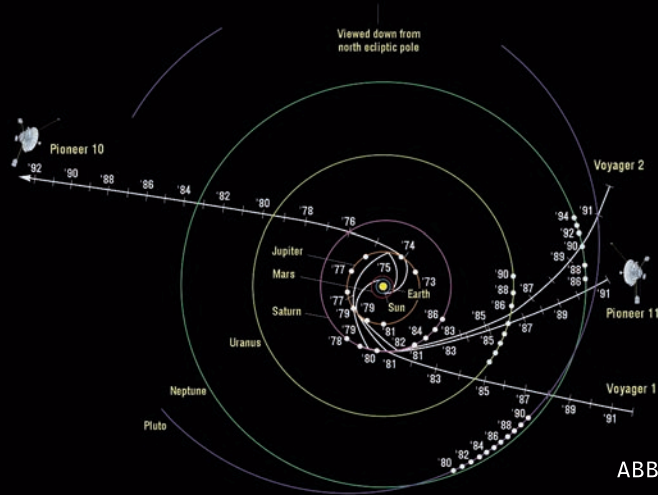
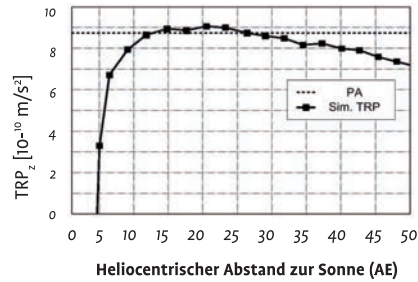
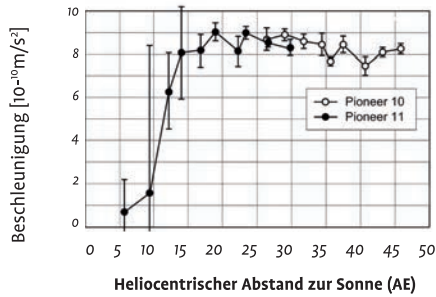


ABB. 1 Die Pioneer Anomalie



WEITERE ANWENDUNGEN

Die mit der Analyse der Pioneer-Anomalie begonnenen Arbeiten im Bereich der Hochpräzisionsmodellierung finden nun Anwendung für die genauere Berechnung weiterer Satellitenmissionen, wie z.B. von Geodäsie-Missionen zur Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche und des Erdschwerefeldes oder von Missionen zur Detektion von Gravitationswellen.

DIE PIONEER-ANOMALIE

Nachdem sich internationale Forschungsteams über ein Jahrzehnt mit der Pioneer-Anomalie beschäftigt hatten, konnte das ZARM-Team einen großen Beitrag zur Aufklärung leisten. Ende der 1980er Jahre wurde beobachtet, dass die Pioneer-Sonden nach ihrem letzten Vorbeiflug am Jupiter bzw. Saturn nicht erklärbar, aber konstant abbremsten und von ihrer berechneten Flugbahn abwichen. Erst hochgenaue, computergenerierte Modelle der Sonden und eine Software zur Berechnung des Rückstoßes konnten zeigen, dass die Abweichung nicht das Ergebnis einer „neuen Physik“ ist, sondern auf den Rückstoß durch konventionelle Wärmestrahlung zurückgeführt werden kann.

Die Konstruktion der Sonden ließ eine sehr genaue Bestimmung ihrer Geschwindigkeit zu. Die berechnete Abbremsung, eine negative Beschleunigung von ca. $8,74 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$ in Richtung zur Sonne, wurde von verschiedenen Forschungsgruppen bestätigt. Obwohl schon früh eine richtungsabhängige thermische Abstrahlung diskutiert wurde, schloss man diese Erklärung zunächst aus, weil die Beschleunigung nicht denselben exponentiellen Abfall wie die zur Verfügung stehende Energie zeigte.

Da man also zunächst keine Ursache dieser anomalen Beschleunigung finden konnte, wurden alternative Szenarien untersucht. Man dachte etwa an zusätzliche Massen im Sonnensystem, an einen Einfluss der kosmischen Expansion auf die Physik im Sonnensystem oder gar an modifizierte Gravita-

tionstheorien. Da keine dieser Ansätze eine befriedigende Erklärung lieferte, wandte man sich wieder der Analyse möglicher Störkräfte zu. Dabei wurde die thermische Abstrahlung als die wesentliche, aber bisher am ungenauesten analysierte Störkraft identifiziert.

Am ZARM wurde daraufhin eine neue Methode zur Berechnung von thermischen Rückstoßkräften für komplexe Satelliten entwickelt, die sich auf die Pioneer-Sonden anwenden ließ. Sie besteht aus

- der Erstellung eines Computermodells (Finite-Elemente-Modell) der Sonden,
- der Berechnung der Gleichgewichtstemperaturen, die sich langfristig in den Sonden und auf deren Oberfläche einstellen,
- sowie der Berechnung der abgestrahlten Wärme und der daraus resultierenden Rückstoßkräfte für jedes einzelne Oberflächenelement. Die eigens dafür entwickelte Raytracing-Methode berücksichtigt auch Mehrfachreflexionen sowie diffuse und spekulare Reflexionsmodelle.

Wie die Abbildung zeigt, stimmen die Berechnungen des ZARM mit den von der NASA veröffentlichten Flugdaten der Sonden überein. Dies lässt den Schluss zu, dass die beobachtete anomale Abbremsung der Pioneer-Satelliten von einer nicht berücksichtigten thermalen Rückstoßkraft herrührt, wie sie im Modell des ZARM simuliert wurde. •

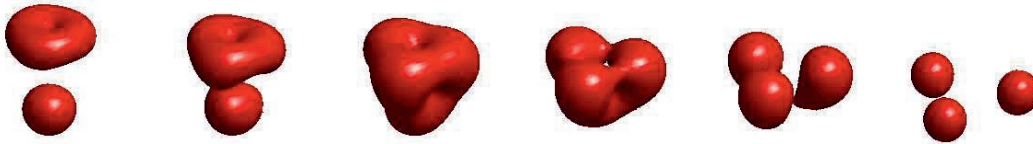


ABB. 1 Sequenz von Monopollösungen zum trigonalen Fall mit der Ladung $n = 3$.

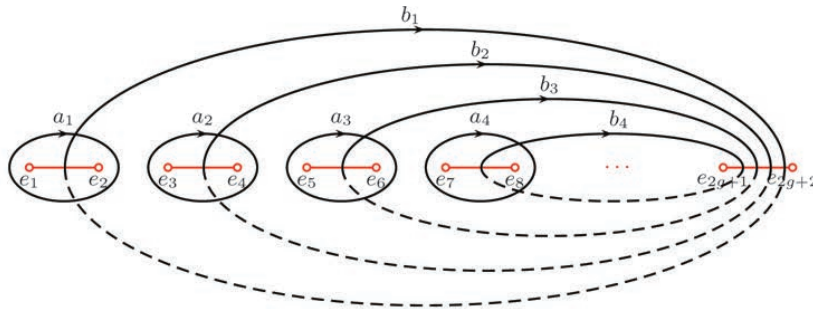


ABB. 2 Für die analytische Lösung von dynamischen Problemen wurden auch neue mathematische Methoden entwickelt.

MATHEMATISCHE RELATIVITÄTSTHEORIE

Aufgabe der theoretischen Physik ist es, die Grundgleichungen der Physik zu analysieren und zu lösen und die Ergebnisse mit präzisen Beobachtungen und Experimenten zu vergleichen. Dabei strebt die Arbeitsgruppe an – im Gegensatz zu numerischen Lösungsverfahren – wenn irgend möglich allgemeingültige Lösungsformeln zu finden, die im Prinzip mit beliebiger Genauigkeit berechenbar sind. Nur so hat man die Möglichkeit

- die vollständige Lösung für alle Parameter zu finden,
- alle physikalischen Phänomene anzugeben,
- die Lösung auf alle ihre Eigenschaften zu untersuchen,
- Ergebnisse mit beliebiger Genauigkeit anzugeben,
- Näherungsverfahren zu überprüfen und numerische Programme zu testen.

Darüber hinaus ermöglichen nur allgemeingültige Lösungsformeln auch ein tieferes Verständnis der physikalischen Vorgänge. Wie undurchsichtig wäre es, wenn wir z.B. die Bewegung eines Pendels nicht mit Sinus oder Kosinus, sondern nur numerisch angeben würden.

Die mathematischen Methoden, die hier entwickelt werden, finden Anwendung in verschiedenen

Bereichen der Relativitätstheorie, aber auch in anderen Disziplinen der Physik. Wir behandeln unter anderem

- die Einstein'schen Feldgleichungen, die die Beschaffenheit von Raum und Zeit in der Umgebung von schweren Objekten beschreiben,
- die Bewegung von (auch rotierenden und ausgedehnten) Objekten und von Licht in Raum und Zeit, siehe auch S. 25,
- die Gross-Pitaevski-Gleichung, eine nichtlineare Verallgemeinerung der Schrödinger-Gleichung. Sie stellt ein Modell einer nichtlinearen Quantenmechanik dar, wie sie z.B. in Quantengravitationstheorien vorhergesagt werden (siehe S. 27 und auch die Dynamik von Bose-Einstein-Kondensaten beschreibt (siehe auch S. 15)

Um allgemeingültige Lösungen von Differentialgleichungen zu bestimmen, verwenden wir hauptsächlich (hyper-)elliptische Funktionen, die man als eine Verallgemeinerung der trigonometrischen Funktionen auffassen kann. Solche Lösungsverfahren werden oft als algebro-geometrische Methoden bezeichnet. Dieser Zweig der Mathematik geht schon auf das 19. Jahrhundert zurück, wird aber zurzeit wieder in vielen Bereichen der Mathematik und theoretischen Physik angewendet und weiterentwickelt. •

Bei der Konzeption und Durchführung von Raumfahrtmissionen spielt die Messgenauigkeit eine immer größere Rolle. In Kürze werden Satelliten ihren Abstand untereinander mit einer Genauigkeit im Nanometerbereich ausmessen. Auch können bald Experimente im Weltraum durchgeführt werden, bei denen der Höhenunterschied von nur einem Zentimeter zwischen zwei hochgenauen Uhren in deren Uhrgang nachgewiesen werden kann.

Außerdem werden durch neue astronomische Observatorien wie GAIA, das Square Kilometre Array (SKA) oder GRAVITY die Bahnen von Sternen und die Form von Schwarzen Löchern mit höchster Präzision ausgemessen. Diese neuen hochgenauen Messmethoden verlangen nach einer sehr genauen theoretischen Beschreibung der gravitativen Effekte. Wir wollen mit unseren analytischen Methoden dazu beitragen, dass Raumfahrtmissionen und astronomische Messungen mit der erforderlichen sehr hohen Genauigkeit analysiert werden können.

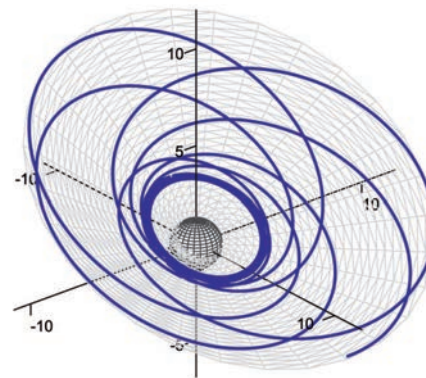


ABB. 1 Seit ca. 20 Jahren werden Bahnen von Sternen in der Umgebung des Schwarzen Loches im Zentrum unserer Milchstraße beobachtet. Aufgrund der starken Gravitation werden in Kürze relativistische Effekte wie die Periheldrehung oder der Lense-Thirring-Effekt sichtbar werden. Diese können in Zukunft mit höchster Präzision vermessen werden.

ABB. 2 Gebundene Bahn in einer Taub-NUT-Raumzeit

ANGEWANDTE ALLGEMEINE RELATIVITÄTS- THEORIE – BEWEGUNG IN RAUM UND ZEIT

Die Bewegung von Objekten im Weltraum wird vornehmlich durch die Gravitation bestimmt. Oft reichen zu ihrer Beschreibung die Newton'schen Gesetze aus, aber bei hochgenauen wissenschaftlichen Experimenten oder Beobachtungen spielen relativistische Effekte eine wichtige Rolle. Durch den technischen Fortschritt der letzten Jahre, z.B. bei der Genauigkeit von Uhren und bei Abstandsmessungen, müssen Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie auf die Bewegung von Objekten wie Satelliten oder Sterne sowie auf Licht, das ebenfalls die Gravitation „spürt“, genau vorausberechnet werden. Umgekehrt lässt sich mit diesen Experimenten und Beobachtungen auch das Gravitationsfeld sehr genau ausmessen. Sie können als Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie verstanden werden bzw. mögliche von Quantengravitationstheorien vorhergesagte Abweichungen von der Allgemeinen Relativitätstheorie aufspüren. Um relativistische Effekte zu berechnen, setzen wir analytische Verfahren bei folgenden Fragestellungen ein:

- die Bahnen von Sternen und anderen Objekten im Gravitationsfeld schwerer Körper, etwa des Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Milchstraße. Dies umfasst auch den Einfluss der Rotation und der Ausdehnung solcher Sterne auf ihre Bahn. Ferner behandeln wir auch den sehr komplizierten Fall, dass die Massen der sich umkreisenden Sterne vergleichbar groß sind;
- die Periheldrehung, d.h. die von der Relativitätstheorie vorhergesagte Rosettenform der Bahnen von Planeten und Sternen;
- den Lense-Thirring-Effekt, d.h. die Präzession der Bahnebene aufgrund der Rotation des zentralen Körpers;
- den Einfluss der Gravitation auf die Laufzeit von Signalen, d.h. die gravitative Zeitverzögerung;
- den Einfluss der Gravitation auf die Frequenz und die Bahn von Licht, also die gravitative Rotverschiebung und die Lichtablenkung; darauf aufbauend auch
- Gravitationslinseneffekte, aufgrund derer sich das beobachtete Bild eines entfernten Sterns durch das Gravitationsfeld z.B. einer vorbeiziehenden Galaxis verzerrt, sowie den Schattenwurf Schwarzer Löcher, also die beobachtete Form eines schwarzen Lochs;
- den Einfluss der Gravitation auf die Bahn eines Pulsars und die Laufzeit von Signalen von dort zur Erde (das sogenannte Timing).

Über die genannten Effekte lassen sich auch alternative Gravitationstheorien oder spezielle Aussagen der Relativitätstheorie testen. Derzeit wird etwa die Horava-Lifshitz-Gravitationstheorie viel diskutiert, die in der Nähe der gravitierenden Masse Abweichungen von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhersagt. •

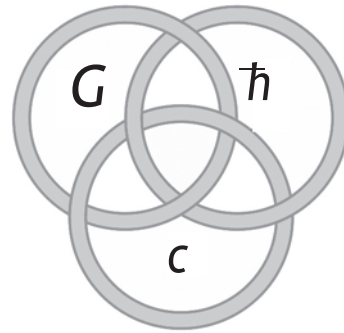


ABB. 2 Die Quantengravitation verknüpft die Konstanten G , \hbar und c .

ABB. 1 Raum-Zeit-Fluktuationen: Strukturen, die aus der Nähe sichtbar sind, verschwinden bei großen Distanzen.

QUANTENGRAVITATION / QUANTENGRAVITATIONSPHÄNOMENOLOGIE

Die Grundlagenphysik strebt eine einheitliche Erklärung der physikalischen Welt aus möglichst wenigen, widerspruchsfreien Prinzipien an. Bislang ist es der heutigen Physik jedoch nicht gelungen, zwei der bedeutendsten Theorien für das Verständnis der Welt – die Quantentheorie und die Allgemeinen Relativitätstheorie – zu einem widerspruchsfreien System, einer Quantengravitationstheorie, zu vereinigen. Dies wäre aber notwendig, um sowohl die Quanteneigenschaften des Gravitationsfeldes als auch die Eigengravitation von Quantensystemen theoretisch zuverlässig zu beschreiben.

Quantengravitationstheorien existieren bereits in Ansätzen, wie die Schleifengravitation oder die Stringtheorie. Beobachtete Phänomene oder sogar experimentelle Konsequenzen lassen sich mit ihnen bisher jedoch völlig unzureichend vorhersagen.

Allgemeine Überlegungen legen nahe, dass eine Quantengravitation mit einer kleinen Verletzung des Einsteinschen Äquivalenzprinzips einhergeht, welches für die Relativitätstheorie grundlegend ist. Solche Verletzungen wurden trotz immer genauerer Tests bisher in der Realität nicht gefunden. Die Tests können entweder mit klassischen Teilchen erfolgen (wie im Projekt MICROSCOPE, siehe S. 15) oder mithilfe quantenmechanischer Eigenschaften ultrakalter Atome, wie sie in unseren QUANTUS-Projekten bereitgestellt werden (siehe S. 17).

Umgekehrt gibt es auch Hinweise darauf, dass (kleinste) Modifikationen quantentheoretischer Prinzipien erforderlich sein können. Dies könnte

etwa eine fundamentale Dekohärenz sein (d.h. ein langsames Verschwinden der Interferenzfähigkeit von Quantensystemen) oder eine Verletzung der Wahrscheinlichkeitserhaltung (d.h. ein grundloses Verschwinden von Teilchen).

Die ZARM-Abteilung „Fundamentalphysik“ beschäftigt sich mit den Folgen solcher Modifikationen der Quantentheorie und der Allgemeinen Relativitätstheorie und ihren Auswirkungen auf die physikalischen Phänomene, speziell mit

- Fluktuationen der Raumzeit-Geometrie, einer allgemein erwarteten Konsequenz von Quantengravitationstheorien. Man erhält eine Verletzung der Universalität des freien Falles, eine fundamentale Dekohärenz und ein superdiffuses Zerfließen von Wellenpaketen.
- Änderungen der sogenannten Dispersionsrelationen. Diese ergeben eine modifizierte Statistik und Änderungen der kritischen Temperatur, bei der die Bose-Einstein-Kondensation einsetzt.
- Konsequenzen der Eigengravitation quantenmechanischer Systeme.
- Konsequenzen der charakteristischen Symmetrie (Diffeomorphismen-Invarianz) der allgemeinen Relativitätstheorie. Diese kann in der Quantengravitation zu einer reichhaltigen Superauswahlstruktur führen, die an Komplexität die anderen Eichtheorien weit übertrifft. •

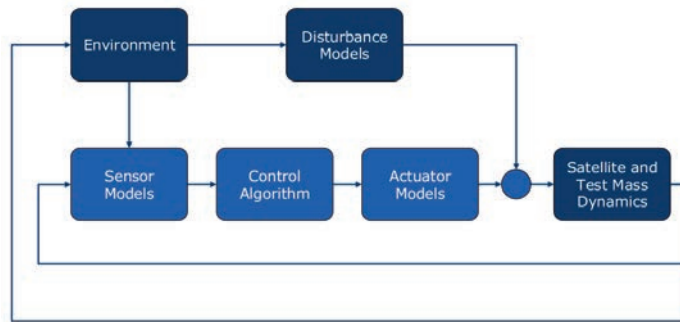


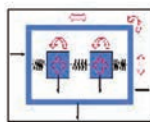
ABB. 1 Logischer Aufbau einer Simulation eines sog. „closed-loops“ zur Lageregelung eines Satelliten

ABB. 2 HPS-Bibliothek in Matlab/Simulink: HPS beinhaltet sämtliche Module zur Berechnung der Umwelt- und Störeinflüsse, die auf einen Satelliten in der Erdumlaufbahn wirken können.

High Performance Satellite Dynamics Simulator (HPS)



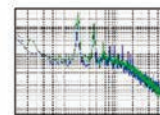
Version: 3.0
Date: 2012-01-11



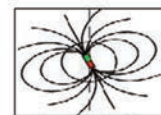
Dynamics



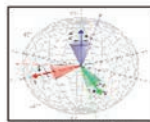
Gravity Field



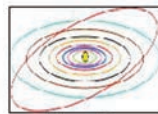
Atmosphere



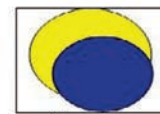
Magnetic Field



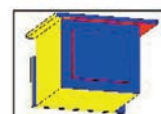
Transformation



Ephemerides



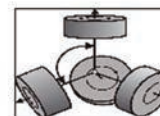
Illumination



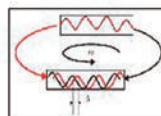
Surface Forces

$$\frac{1}{2} \sqrt{1.0 + A_{11} - A_{22}} - \frac{(A_{12} + A_{21})}{2 \cdot (1.0 + A_{11} - A_{22}) - (A_{31} + A_{13})}$$

Mathematics



Actuators



Sensors

HIGH PERFORMANCE SATELLITE DYNAMICS SIMULATOR (HPS)

Wissenschaftliche Satellitenmissionen erfordern eine umfangreiche Datenauswertung. Um möglichst präzise Verfahren zur Datenaufbereitung und Auswertung entwickeln zu können, verwendet man häufig Datensätze aus Simulationen. Diese müssen in einem hohen Maße den tatsächlich gemessenen Daten entsprechen, weshalb nicht nur die einfache Bahndynamik des Satelliten, sondern auch Umwelteinflüsse, das Experiment an Bord des Satelliten, das Verhalten der Sensoren und Aktuatoren (z.B. Triebwerke) usw. in der Simulation berücksichtigt werden müssen. Zusätzlich können die Simulationen zur besseren technologischen Entwicklung des Gesamtsystems aus Experiment und Satellit genutzt werden.

DIE REALISIERUNG

Die Entwicklung eines Simulationsprogramms, welches alle obigen Spezifikationen erfüllt, stellt eine anspruchsvolle und aufwendige Aufgabe dar, bei der das ZARM eng mit dem DLR-Institut in Bremen zusammenarbeitet. Das entwickelte Programm, der High Performance Satellite Dynamics Simulator (HPS), basiert auf dem am ZARM entwickelten Drag-Free-Simulator. Der Quellcode des mittlerweile sehr umfangreichen Simulators ist in verschiedenen Programmiersprachen (FORTRAN, C, C++ etc.) kodiert; als übergreifendes Nutzer-Interface wird Matlab/Simulink genutzt.

Sämtliche Module des HPS sind in einer eigenständigen Simulink-Bibliothek enthalten und können

nach Bedarf miteinander verbunden und genutzt werden. Der Schwerpunkt des HPS liegt in der Simulation von sogenannten Drag-Free-Satelliten für Fundamentalphysik-Missionen.

Diese Missionen sind meist mit mehreren Beschleunigungssensoren ausgestattet. Mit Hilfe des HPS ist es möglich, einen Satelliten mit bis zu vier Beschleunigungssensoren mit insgesamt acht Testmassen im Erdgravitationsfeld unter der Berücksichtigung sämtlicher Störeinflüsse durch die Umwelt zu modellieren.

ZUKÜNFTIGE ARBEITEN

Die Simulationssoftware soll in verschiedene Richtungen weiter entwickelt werden:

- Einbindung weiterer Modelle und Algorithmen zur Simulation weiterer Störeffekte, wie zum Beispiel Weltraummüll oder die thermische Abstrahlung des Satelliten und daraus resultierende Störkräfte und -momente (siehe auch S. 31).
- Aufgrund der sehr hohen Anforderungen bei wissenschaftlichen Satellitenmissionen muss die Genauigkeit der Software verbessert werden.
- Erweiterung des Anwendungsbereiches des HPS auf interplanetare Missionen.
- Erweiterung auf Formationsflüge von zwei Satelliten oder von Schwärmen von Satelliten.

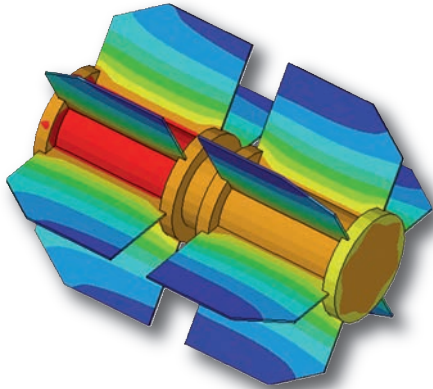


ABB. 1
Hochpräzisions-
exeperimente
bedingen eine
hochgenaue
Modellierung.

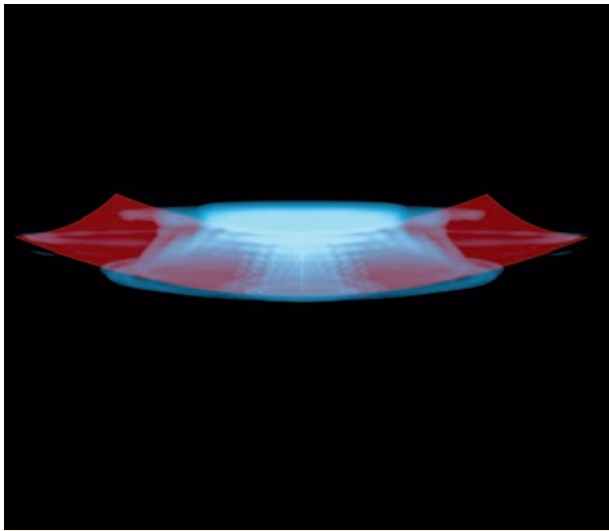
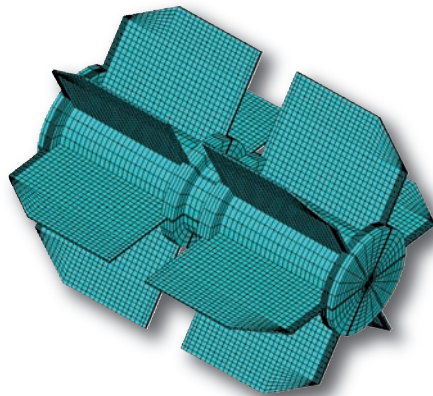


ABB. 2 Selbstinterfe-
renz eines herunterfal-
lenden, auf eine Ober-
fläche treffenden Bose-
Einstein-Kondensats

HOCHPRÄZISIONSMODELLIERUNG

Simulationen moderner Präzisionsmessungen verlangen eine immer höhere Auflösung, da die relative Messgenauigkeit der Experimente immer weiter fortschreitet. Mit optischen Resonatoren, wie sie z.B. bei der Stabilisierung von Lasern zum Einsatz kommen, werden relative Messgenauigkeiten im Bereich von 10^{-16} realisiert, d.h. die Länge eines Resonators ist auf ein Hundertstel eines Protonendurchmessers stabil. Es ist zu erwarten, dass zukünftige Experimente mit Genauigkeiten von bis zu 10^{-20} arbeiten. Nun wirken sich Längenänderungen der Resonatoren direkt auf die Güte des Messsignals aus. Um eine verlässliche Fehlerabschätzung zu gewährleisten, müssen Längenänderungen also mit derselben Genauigkeit modelliert werden. Längenänderungen unterhalb 10^{-15} lassen sich jedoch nicht mehr mit herkömmlichen Softwaremethoden berechnen.

Es müssen neue Algorithmen entwickelt werden, die mit Hilfe von speziellen Datentypen und Verifikationsroutinen die geforderten Genauigkeiten erreichen. Eine zentrale Rolle nimmt hierbei die Simulation mechanischer und thermischer Effekte ein. Darüber hinaus sollen auch die Eigenschaften elektromagnetischer Felder in diesen Resonatoren hochgenau simuliert werden. Für besonders symmetrische Konfigurationen wollen wir analytische Lösungen der zugrundeliegenden thermoelastischen Gleichungen finden, was eine anspruchsvolle Aufgabe ist. Damit kann die Güte der numerischen Simulationen validiert werden.

ANWENDUNGEN

Diese Simulationen beschränken sich nicht nur auf einzelne Komponenten des Experiments, sondern können auch auf ganze Experimente und den Satelliten selbst angewendet werden. Ein erfolgreiches Beispiel war die Simulation der Pioneer-Satelliten.

Damit haben Simulationen dieser Art auch weitreichende Anwendung z.B. in Fundamentalphysik-Missionen im Weltraum wie LISA oder LPF und Geodäsie-Missionen, bei denen der Abstand zwischen Satelliten im Nanometer-Bereich bestimmt werden kann, was bedeutet, dass man auch die Lage bestimmter Komponenten im Satelliten mit eben dieser Genauigkeit kennen muss.

QUANTENMODELLIERUNG

Es werden auch Modellierungen im Bereich der Quantenmechanik mit Anwendung auf die Projekte QUANTUS und PRIMUS durchgeführt. So wird etwa die Dynamik von Bose-Einstein-Kondensaten (BEC) in der Nähe reflektierender Oberflächen unter dem Einfluss der Schwerkraft bestimmt. Die BECs unterliegen dabei verschiedenen Wechselwirkungen kurzer Reichweite, etwa Van-der-Waals-Kräften. Auch die Streuung an einer Kante kann modelliert werden.

Des Weiteren bestimmen wir Eigenzustände von BECs unter bestimmten Randbedingungen, d.h. wir lösen numerisch oder wenn möglich analytisch nichtlineare Randwertprobleme. •

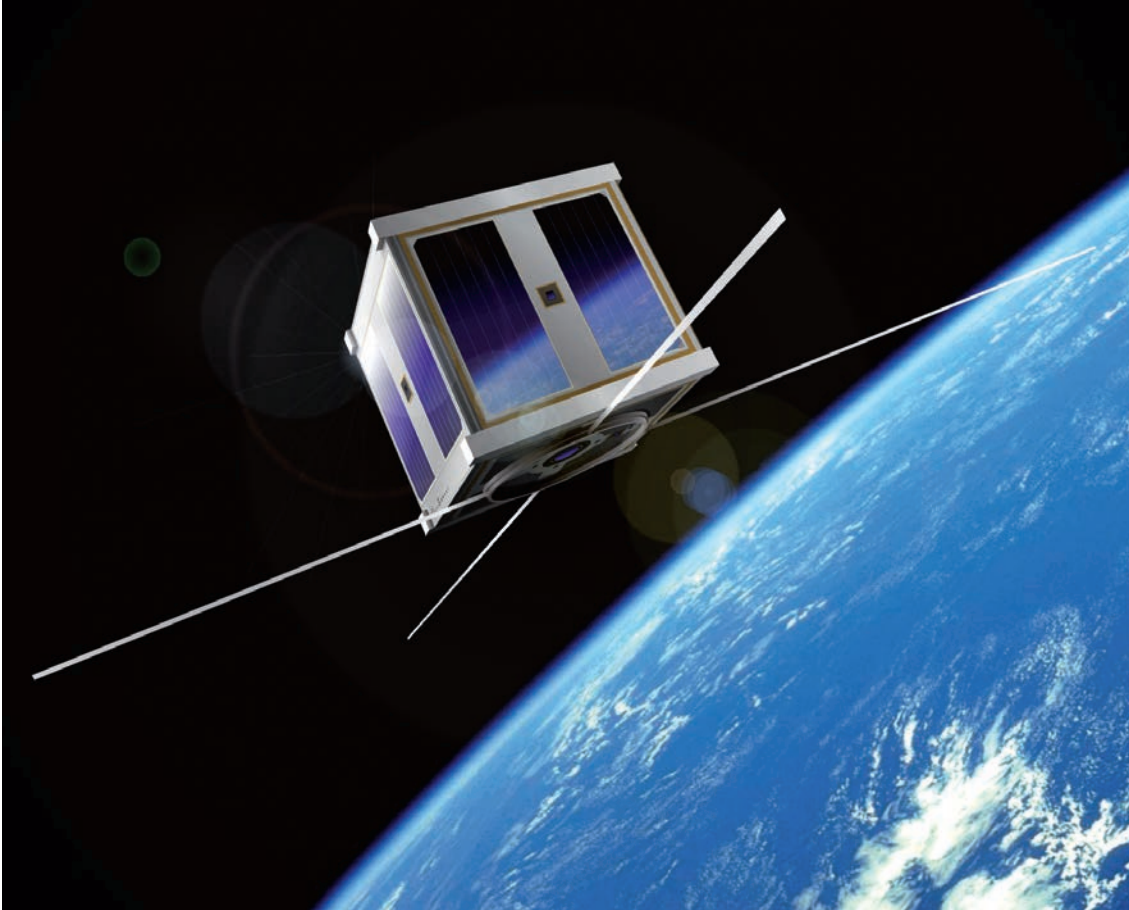


ABB. 1 Erschließung von Mikrosatelliten für wissenschaftliche Anwendungen

MIKROSATELLITEN

Kleinstsatelliten umfassen die Gruppe der Nano- und Mikrosatelliten mit Gesamtmassen von weniger als 50 kg. Insbesondere bei Nanosatelliten ist es in den letzten Jahren zu einer Vielzahl von Weiterentwicklungen und durchgeführten Missionen gekommen, da sich der so genannte CubeSat-Standard auf internationaler Ebene etablieren konnte. Hierbei wurde ein Standard-Nanosatellitenbus (die Satellitenbasisstruktur) mit 1 kg Gesamtmasse, einem würfelförmigen Gehäuse mit 10 cm Kantenlänge sowie speziellen mechanischen Interfaces für den Einbau in die Rakete und den Auswurfvorgang festgelegt.

CubeSats wurden bisher meist aus didaktischen Gründen gebaut, um Studierende an die praktische Raumfahrt heranzuführen. Diese Satellitenklasse kann sehr kostengünstig in den Weltraum gebracht werden, die benötigten Hardwarekomponenten sind leicht verfügbar und mit geringem Eigenentwicklungsanteil integrierbar. Ziel der hiesigen Arbeiten ist es nun, CubeSats auch für wissenschaftliche Aufgabenstellungen mit geringem Platzbedarf zu erschließen. Hierbei können bis zu drei CubeSats aneinandergereiht werden, um sowohl den verfügbaren Platz als auch die zur Verfügung stehende Energie zu erhöhen. Neben dem ohnehin über-

schaubaren Kostenrahmen ist auch die leichte Wiederholbarkeit von Experimenten ein Vorteil, die sich aus der hohen Verfügbarkeit der Komponenten wie auch vielfältigen Mitflugmöglichkeiten als „Piggy-back“-Nutzlast ergibt.

Eine mögliche Anwendung ist die Qualifikation von Komponenten im Weltraum selbst. Auch können sie als „Pfadfindermissionen“ für Weltraumexperimente dienen. Ein weiterer interessanter Bereich ist die Materialforschung, etwa zur Untersuchung von Materialeigenschaften die für die Entwicklung und Auslegung von Thermalsystemen relevant sind. CubeSats bieten in dieser Hinsicht die Möglichkeit, neue Materialien direkt in der Weltraumumgebung zu testen und somit Tests am Boden, die selbst unter erheblichen Kosten nur einen Teil der Weltraumumgebung abbilden, zu ersetzen.

Zu diesem Zweck wird zurzeit am ZARM der Prototyp eines Degradationssensors für CubeSats entwickelt, der thermooptische Veränderungen von Materialien im Weltraum aufspüren und die Eignung von Nanosatelliten für vollwertige wissenschaftliche Experimente demonstrieren soll. Ziel ist es, einen aus zwei Einheiten bestehenden CubeSat mit integriertem Degradationssensor sowie miniaturisierten Magnettorquern im Jahr 2014 zu starten. •

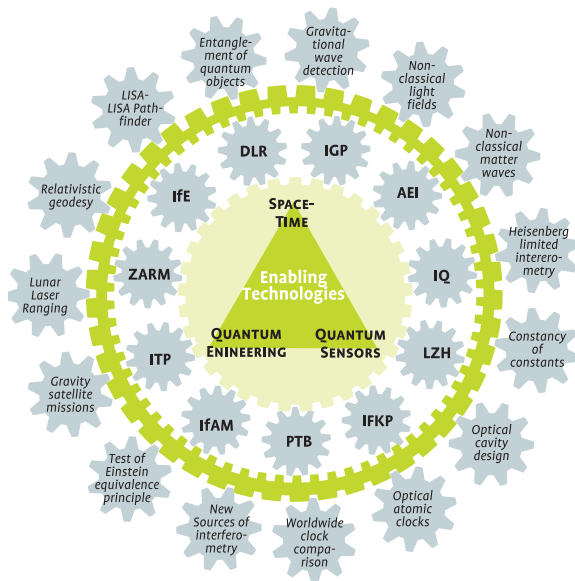


ABB. 1 Die Struktur des Exzellenzclusters QUEST

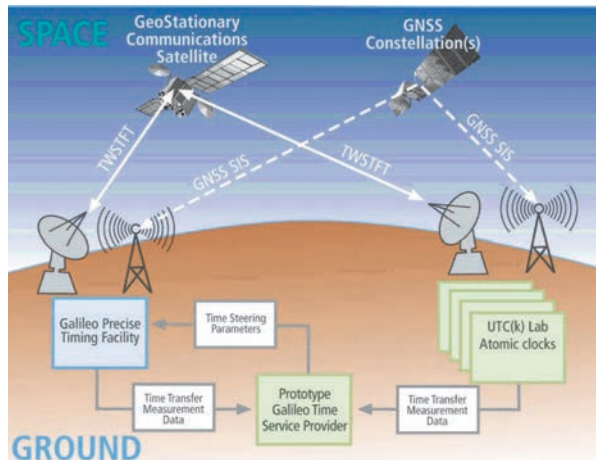


ABB. 2

Uhrenvergleich und Navigation erfordern die Berücksichtigung relativistischer Effekte.



ABB. 3

Raumzeit-Fluktuationen führen zu effektiven Modifikationen der Standardphysik

EXZELLENZCLUSTER QUEST

Die Fundamentalphysik-Gruppe am ZARM ist Partner des Hannoveraner Exzellenzclusters „Quantum Engineering and Space-Time Research“ (QUEST). Eine der QUEST-Professuren, nämlich diejenige zur Quantengravitationsphänomenologie, ist am ZARM angesiedelt und mit Prof. Dr. Domenico Giulini besetzt worden. Das ZARM ist im QUEST-Vorstand vertreten und auch im Vorstand der Graduiertenschule HALOSTAR der Universität Hannover.

Das ZARM trägt mit seiner theoretischen Expertise zu QUEST bei. Dabei werden sowohl „klassische Themen“ als auch Themen aus dem Bereich Quantengravitationsphänomenologie behandelt. Im ersten Fall analysieren wir den Einfluss der Einsteinschen Gravitation auf

- Satellitenbahnen,
- Uhren und
- Atominterferometrie,

alles auch im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit in der Geodäsie. Hierbei zeigt sich, dass die Genauigkeit zukünftiger Uhren von 10^{-18} wie auch die Abstandsbestimmung zwischen Satelliten mit einer Genauigkeit im Nanometerbereich eine volle Betrachtung im Rahmen der Relativitätstheorie er-

fordern. Uhrenvergleich und Navigation erfordern ebenfalls die Berücksichtigung relativistischer Effekte.

Bei der Suche nach Phänomenen der Quantengravitation haben wir dabei hauptsächlich mögliche Effekte an kalten Atomen im Auge. Im Einzelnen sind das

- Effekte von Schwankungen der Raum-Zeit-Geometrie, wie sie von einer Quantengravitation erwartet werden. Das führt u.a. zu einer scheinbaren Verletzung des Äquivalenzprinzips und zu Dekohärenz.
- Aufgrund von in der Quantengravitation auftretenden Nichtlokalitäten der Feldgleichungen ergeben sich veränderte Dispersionsrelationen, die auch die statistischen Eigenschaften kalter Atome beeinflussen.
- Es werden auch Verletzungen der Lorentz-Invarianz, etwa der konstanten Lichtgeschwindigkeit, diskutiert. Modelle dazu sind z.B. die Very Special Relativity oder Finsler-Geometrien.
- Ein weiteres Thema ist die Selbstgravitation von Quantensystemen, welches eine von Penrose vorgeschlagene Möglichkeit ist, den Messprozess zu verstehen. •





ABB. 1 Die Teilnehmerinnen des Bremen-Oldenburger Graduiertenkollegs „Models of Gravity“. Im Rahmen des Graduiertenkollegs legen wir großen Wert auf die Frauenförderung in den Naturwissenschaften.



ABB. 2 Besichtigung des GEO 600 Gravitationswellendetektors in Hannover.



ABB. 3 Ein periodisch eingeschnürter „black string“.

FÖRDERER

Das Graduiertenkolleg wird von der DFG finanziert. Auch das Hanse-Wissenschafts-Kolleg (www.h-w-k.de) unterstützt diese Kollaboration.

DFG-GRADUIERTENKOLLEG MODELS OF GRAVITY

Seit dem 1. April 2012 gibt es ein Graduiertenkolleg zum Thema „Models of Gravity“, welches sich mit Fragen der Gravitation befasst. Es soll zu einem besseren Verständnis der Struktur der Allgemeinen Relativitätstheorie und ihrer Verallgemeinerungen führen. Solche Verallgemeinerungen ergeben sich zwangsläufig als Niederenergielimes bei der Quantisierung der Gravitation, wie sie z.B. durch die Stringtheorie gegeben ist. Diese Untersuchungen haben aber auch praktischen Nutzen, denn sie dienen u.a. der genauen Berechnung von Satelliten- und Planetenbahnen oder des Gangs von Uhren auf Satelliten, die Grundlage des täglich verwendeten GPS sind.

Im Rahmen des Graduiertenkollegs gibt es eine intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen der Physik, der Mathematik und der Raumfahrtwissenschaft. Die federführenden Universitäten Bremen und Oldenburg arbeiten in enger Kooperation mit der Jacobs-Universität Bremen und den Universitäten Hannover, Bielefeld und als assoziiertes Mitglied der Universität Kopenhagen. Damit hat sich die Gravitationsphysik als ein Forschungsschwerpunkt im Nordwesten Deutschlands etabliert.

Die einzelnen Forschungsthemen im Rahmen dieses Graduiertenkollegs sind

- das Aufstellen von Modellen der Gravitation, d.h. von verallgemeinerten Einstein-Gleichungen, wie sie sich etwa aus der Stringtheorie ergeben,
- analytische und numerische Lösungen der Feldgleichungen, die die Beschaffenheit von Raum und Zeit in der Umgebung von schweren Objekten beschreiben,
- die Analyse der Topologie der Raum-Zeiten, die Lösungen der Feldgleichungen sind,
- die Analyse der Stabilität von Lösungen,
- die AdS/CFT-Korrespondenz,
- die Untersuchung der Bewegung von Körpern (Punktteilchen, Lichtstrahlen, Körper mit Spin und Massenmultipolmomenten) in Gravitationsfeldern,
- Dynamik von Feldern in Gravitationsfeldern (auch im Hinblick auf die Dynamik von BEC),
- die Untersuchung von Modellen mit Verletzungen der Lorentz-Invarianz wie Very Special Relativity oder Finsler-Geometrie,
- Bosonensterne als spezielle Lösungen verallgemeinerter Einstein-Gleichungen und Modelle für schwarze Löcher und dunkle Materie,
- die Rückwirkungsprobleme in der Kosmologie, auch in verallgemeinerten Modellen,
- Lösungen der Einstein-Gleichungen lokalisierter Massenverteilungen im kosmologischen Kontext.

Neben exzellenter Forschung und Ausbildung von Nachwuchswissenschaftler_innen wird im Graduiertenkolleg besonderes Gewicht auf ein ausgewogenes Verhältnis von Frauen und Männern gelegt, so dass das Graduiertenkolleg ungefähr 50% Teilnehmerinnen aufweist. Darüber hinaus werden besondere Qualifizierungsmaßnahmen für Physikerinnen angeboten. •



DAS TEAM DER FUNDAMENTALPHYSIK

Prof. Dr. Claus Lämmerzahl

claus.laemmerzahl@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57834

Dipl.-Phys. Steffen Aksteiner

steffen.aksteiner@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57874

Dipl.-Ing. Stefanie Bremer

stefanie.bremer@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57943

Prof. Dr. Domenico Giulini

domenico.giulini@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57833

Dipl.-Math. Arne Grenzebach

arne.grenzebach@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57861

Dipl.-Phys. André Grossardt

andre.grossardt@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57937

Dr. Ertan Göklü

ertan.goeklue@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57944

Dr. Norman Gürlebeck

norman.guerlebeck@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57857

Dr. Eva Hackmann

eva.hackmann@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57862


Dr. Sven Herrmann

sven.herrmann@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57871


M. Sc. André Kubelka

andre.kubelka@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57846


M. Sc. Sascha Kulas

sascha.kulas@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57927


M. Sc. Daniela Kunst

daniela.kunst@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57945

Dr. Meike List

meike.list@zarm.uni-bremen.de


 +49 421 218-57850

Dipl.-Phys. Dennis Lorek

dennis.lorek@zarm.uni-bremen.de


Dipl.-Phys. Zelimir Marojevic

zelimir.marojevic@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57841


Dipl.-Phys. Hauke Müntinga

hauke.muentinga@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57849


PD. Dr. Volker Perlick

volker.perlick@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57933


Dr. Dirk Pützfeld

dirk.puetzfeld@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57934


Dipl.-Phys. Andreas Resch

andreas.resch@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57931


Dr. Ing. Benny Rievers

benny.rievers@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57930


Dipl.-Phys. Gerold Schellstede

gerold.schellstede@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57933


Dipl.-Phys. Hanns Selig

hanns.selig@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57830

Dipl.- Ing. Marcus Stadlander


marcus.stadlander@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57938

Dr. Jan Steinhoff


M. Sc. Tammo Sternke

tammo.sternke@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57929


M. Sc. Lubos Vaci

lubos.vaci@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57913

M. Sc. Melanie Vogelsang

melanie.vogelsang@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57935

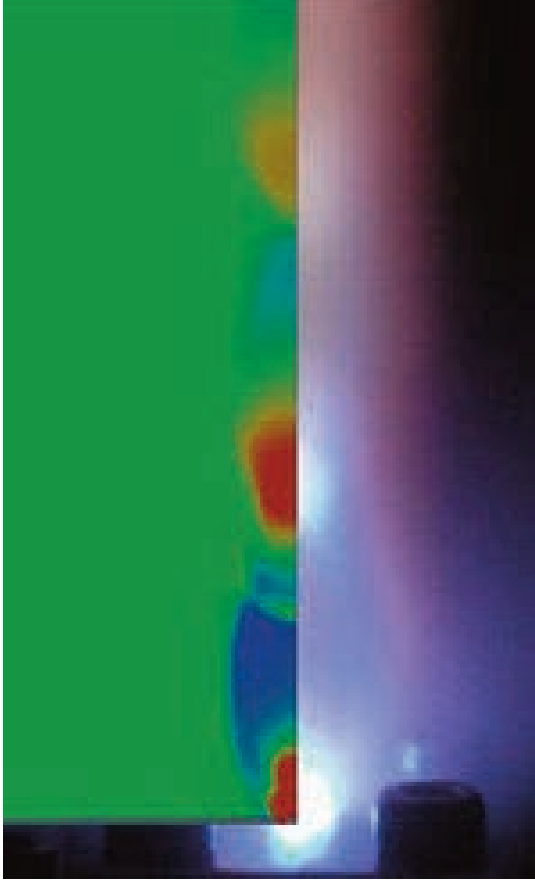


ABB. 1 Vergleich numerischer Simulationsergebnisse mit experimentellen Messdaten am Beispiel eines Mikrotriebwerks

THERMOFLUIDDYNAMIK

Das Themengebiet der Thermofluiddynamik ist als Grenzbereich der Strömungsmechanik zu verstehen, in dem die Unvereinbarkeit von der Forderung nach einem skalenübergreifenden mathematischen Modell und der gleichzeitigen Beschreibung makro- und mikroskopischer Prozesse deutlich wird.

Den Übergang von einer laminaren (lat. „geschichteten“) hin zu einer turbulenten Strömung nennt man einen laminar/turbulenten Strömungsumschlag, welcher bei hohen Reynolds-Zahlen eintritt. Seit dem Einsatz von Großrechnern werden Modelle entwickelt, die den Einfluss von Turbulenz kleinskaliger Wirbel auf größere Skalen komplexer Strömungen darstellen sollen.

Eine durch Druckgradienten bedingte Dichteänderung ist bei zunehmenden Mach-Zahlen zu beobachten, sobald sich die Strömungsgeschwindigkeit der Schallgeschwindigkeit eines Fluids nähert. Bei Erreichen der Schallgeschwindigkeit stellt sich gegebenenfalls sogar ein lokaler Dichte-, Temperatur- und Druckanstieg in Form eines Verdichtungsstoßes ein. Währenddessen werden Strömungen niedriger Mach-Zahlen sogar als inkompressibel und häufig isotherm betrachtet.

Ein weiterer Grenzbereich wird durch hohe Knudsen-Zahlen definiert. Diese beschreiben den Grenzbereich, in dem räumliche Abmessungen einer Strömung so klein werden, dass sie in den Bereich der mittleren freien Weglänge einzelner Gasmoleküle

kommen. Bei hohen Knudsen-Zahlen hat ein Gas eine so niedrige molekulare Anzahldichte, dass eine Kontinuumsannahme, wie sie häufig sowohl bei turbulenten als auch bei kompressiblen Strömungen zu Grunde liegt, ungültig ist.

Für die verschiedenen Skalenbereiche kann festgestellt werden, dass für hohe Reynolds-Zahlen die turbulente Diffusion modelliert werden muss. Für hohe Knudsen-Zahlen muss auf Grund der Ungültigkeit der Kontinuumsannahme die molekulare Diffusion modelliert werden. Für letzteres Beispiel der Diffusion einer molekularen Strömung, das fast ausschließlich bei sehr niedrigen Drücken oder auf sehr kleinen Skalen Anwendung findet, existieren bereits Vorüberlegungen, die schon in der Vergangenheit druckunabhängig und auf größeren Skalen beschrieben wurden: dem Transport disperser Medien in einer fluiden Trägerphase. Somit können bereits auf makroskopischer Seite beschrittene Wege auf Grund einer skalenübergreifenden Betrachtung von Teilchenkollision, Teilcheninteraktion und Teilchendiffusion in höhere Knudsen-Zahl-Bereiche transportiert werden. Um diese Grenzbereiche im Detail zu untersuchen, sind präzise Messmethoden und Experimentaufbauten mit einer möglichst geringen Störanfälligkeit nötig. Sobald der technische Aufbau realisiert wird, werden die numerischen Simulationsergebnisse verglichen, um die Modellierung zu verifizieren. •

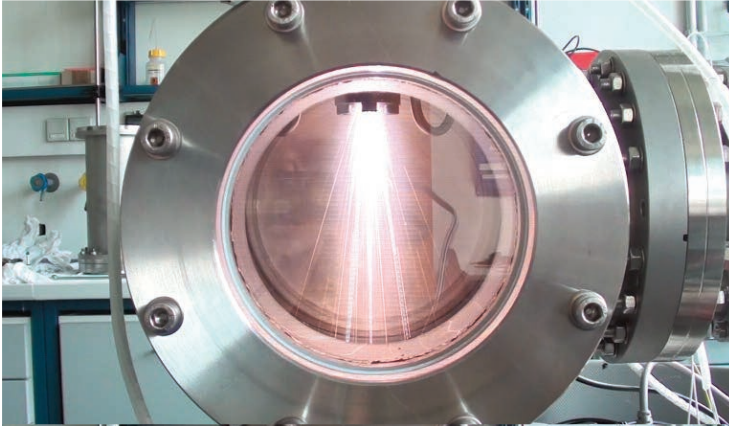


ABB. 1 Lichtbogentriebwerk INGA während eines Kaltstarts

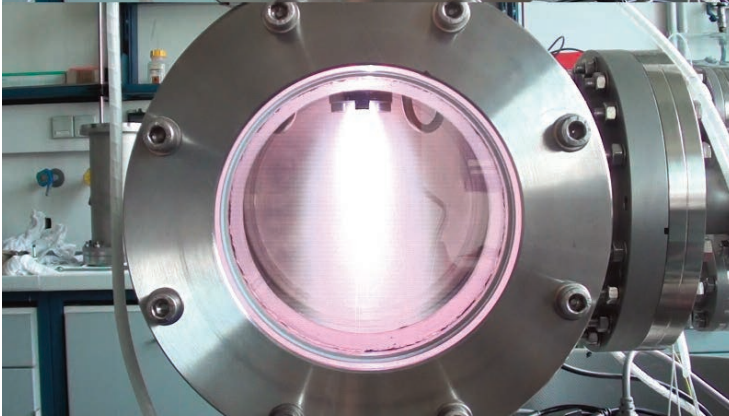


ABB. 2 Lichtbogentriebwerk INGA im stationären Betrieb

PLASMAMODELLIERUNG FÜR ELEKTRISCHE RAUMFAHRTANTRIEBE

Für die Auslegung der Steuerdüsen von Kleinstsatelliten besteht der technische Prozess darin, kleinste Massenströme durch feinste Kanäle zu leiten, um durch Ausströmung in eine extreme Niederdruckumgebung mit sehr hoher Geschwindigkeit einen möglichst hohen massenspezifischen Schub zu generieren. Als Düsengeometrie empfiehlt sich eine Lavaldüse, da eine Beschleunigung im Überschallbereich auf Grund der hohen Geschwindigkeit einen maximalen Schub im Verhältnis zur pro Zeitintervall aufgewendeten Masse garantiert.

In einem klassischen Kaltgastriebwerk wird Druck wie bei einer Lavaldüse vor der engsten Stelle aufgebaut, während das Medium dann mit der kritischen Schallgeschwindigkeit durch die engste Stelle entweicht. Bei einem thermoelektrischen Triebwerk wird das Medium analog zu einem Überschallkanal im Unterschallbereich hier durch einen elektrischen Lichtbogen aufgeheizt, um die kritische Schallgeschwindigkeit und damit die Austrittsgeschwindigkeit und den spezifischen Impuls zu erhöhen. Auch wenn diese Triebwerke über keine hohe Beschleunigungsleistungen verfügen, er-

gibt sich auf Grund der elektrischen Aufheizung in kleinsten Volumina eine sehr präzise Steuermöglichkeit.

Daher werden diese Triebwerke in erster Linie für die Bahnregelung und bei interplanetarischen Missionen eingesetzt, für die ein lang andauernder, aber niedriger Antriebsbedarf besteht. Bei der Beschreibung des Plasmagleichgewichts steht die Äquivalenz von Elektronenzunahme durch Ionisation und Elektronenabnahme durch Rekombination im Vordergrund. Aus diesem Gleichgewicht folgt der Ionisationsgrad, welchem mittels der Eggert-Saha-Gleichung eine direkte Abhängigkeit von der Elektronentemperatur nachgewiesen wird.

Am Institut untersuchte Testtriebwerke werden mit Xenon und Argon betrieben und mit einer initialen elektrischen Spannung von bis zu 2kV gezündet, wodurch eine Startionisation des einströmenden Gases durchgeführt wird. Der elektrische Strom wird anschließend auf eine Stromstärke von 30A heruntergeregelt, wodurch sich zwischen den Elektroden eine Arbeitsspannung für den stationären Betrieb einstellt. •

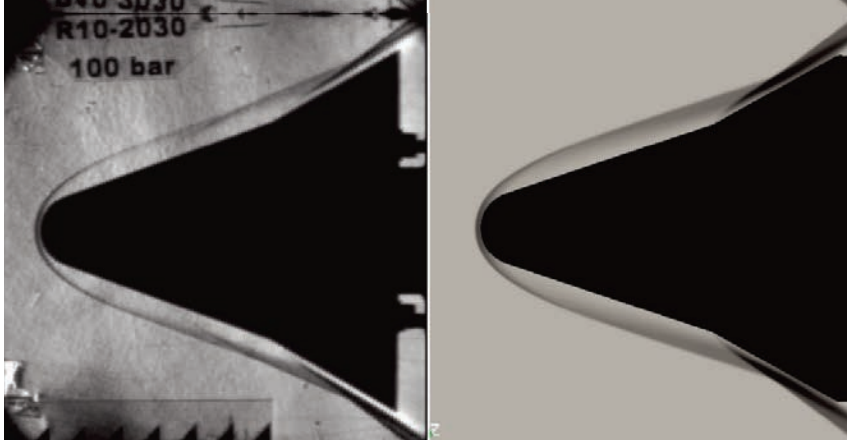


ABB. 1 Messtechnische Erfassung des Verdichtungsstoßes durch eine Schlierenoptik (links); Simulationsergebnis des Dichtegradienten durch numerische Strömungssimulation (rechts)

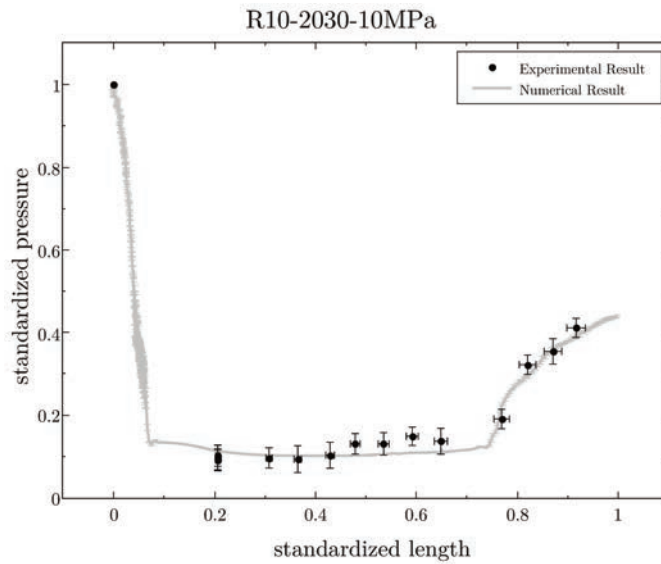


ABB. 2 Messdaten und numerische Simulationsergebnisse der Druckverteilung an der Oberfläche des Kegels

HYPERSCHALLUMSTRÖMUNG VON WIEDEREINTRITTSKÖRPERN

Bei der Umströmung von Raumfahrzeugen steht die Sinnhaftigkeit der Geometrie für den Austritt oder den Wiedereintritt in die Atmosphäre eines Planeten im Vordergrund der Konzeption. Bei Wiedereintrittskörpern ist es das Ziel, einen möglichst hohen Strömungswiderstand zu erzeugen, ohne den Flug des Fahrzeugs zu destabilisieren. In verschiedenen Studien wurden bereits Strömungsphänomene um Raumfahrzeuge mittels numerischer Methoden untersucht. Zusätzlich wurden auch mit experimentellen Untersuchungen Simulationsergebnisse untermauert. Für die numerischen Untersuchungen wurden allerdings zumeist 2D-Geometrien mit Symmetrierandbedingungen verwendet.

Für den hier vorgestellten Vergleich numerischer Simulationsergebnisse und experimentell ermittelter Daten wurden für die numerische Modellierung verschiedene Ansätze definiert, um den Einfluss möglicher Fehlerquellen zu reduzieren. Anstelle von Standard-Druckkorrekturverfahren wurde ein insbesondere für kompressible Überschallströmungen entwickeltes Verfahren nach Kurganov und Tadmor

(2001) verwendet. Die numerische Umsetzung dieser Methode geht auf die Arbeiten von Greenshield und Weller (2009) zurück. Generell kann festgestellt werden, dass im Gegensatz zu alternativen Druckkorrekturverfahren wie SIMPLE oder PISO diese Methode nicht Druck und konvektive Terme korrigiert, sondern hier neben dem Druckfeld die Diffusionsterme von Impuls- und Ennergiegleichung modifiziert werden.

Für die lokale Gitterverfeinerung wurden in regelmäßigen Zeitintervallen in Abhängigkeit von Druck- und Dichtegradienten Korrekturen an der initialen Gitterkonfiguration durchgeführt. Hierfür werden die ausgewählten Zellen, bei denen der Gradient einen Maximalwert überschreitet, in allen drei Raumrichtungen zweigeteilt, wodurch eine Hexaeder-Zelle, sobald sie in drei Raumrichtungen halbiert wird, in acht Unterzellen der im Mittel halben Kantenlänge aufgeteilt. Die Feldgrößen der ursprünglichen Zelle werden auf die „neuen“ Zellen übertragen. Mittels dieses Vorgehens wird die numerische Auflösung lokal verdoppelt. •

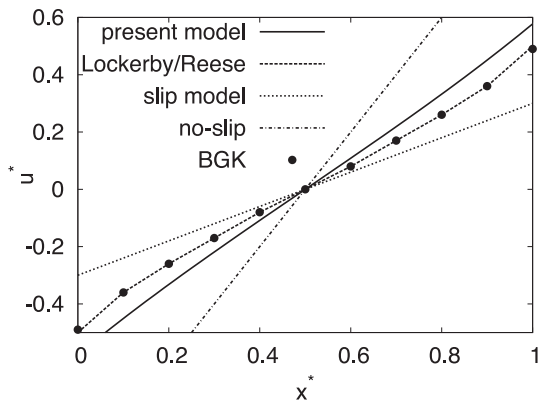


ABB. 1 Geschwindigkeitsprofil einer Couette-Strömung bei $Kn=1$

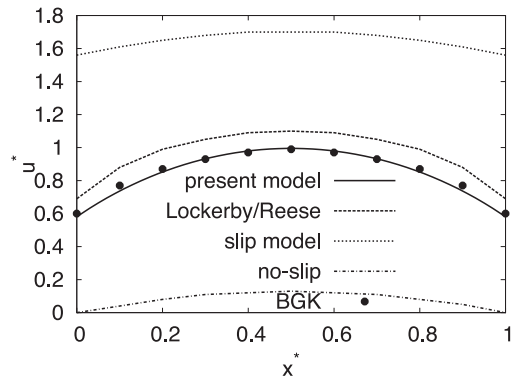


ABB. 2 Geschwindigkeitsprofil einer Poiseuille-Strömung bei $Kn=1$

VERDÜNNTE GASSTRÖMUNGEN IN MIKROKANÄLEN

Um die Anisotropie von Mikroströmungen im Mikromaßstab zu beschreiben, werden anhand direkter Methoden die Teilchenbahnen ermittelt, um in einer Art Postprocessing die statistischen Momente der Geschwindigkeitskomponenten zu bestimmen. Werden aber die statistischen Momente als eigenständige makroskopische Größen beschrieben, so werden auch eigene Transportgleichungen für die mittlere Geschwindigkeit oder die innere Energie einer Gasphase aufgestellt. Diffusionskomponenten wie Impuls- und Wärmeflüsse werden somit als Bestandteil klassischer Transportgrößen und nicht als die Ergebnisse einer Summe diskreter Molekülbewegungen interpretiert.

Bei der Betrachtung der Wandinteraktion ist bei verdünnten Gasströmungen die Kontinuumsannahme einer Wandhaftbedingung nicht mehr zulässig, da die mittlere freie Weglänge eine vergleichbare Größenordnung wie die der charakteristischen Länge – wie der Kanalhöhe einer Kanalströmung – hat.

Auf Grund der molekularen Wandreflektion ist nicht mehr von einer Haftbedingung auszugehen, bei der die mittlere Molekülgeschwindigkeit an

der Wand verschwinden würde. In einem solchen Fall werden die Randbedingungen einer durch makroskopische Größen beschriebenen Strömung modifiziert, in dem der beschriebene Einfluss modelliert wird. Solche Mikrokanalströmungen werden mit hohen Druckgradienten angetrieben, mit denen auch stets hohe Temperaturgradienten verbunden sind. Entsprechend werden in vielen Arbeiten die Unterschiede, die sich durch diese Änderung der Größenverhältnisse einstellen, entsprechend analysiert und die Auswirkungen auf die Geschwindigkeitsfelder modelliert.

So werden die makroskopischen Strömungen und insbesondere die aus der statistischen Mittelung folgenden und nicht geschlossenen molekularen Diffusionsterme in Analogie zur turbulenten Diffusion modelliert. In dem aktuell vorgestellten Modell, werden die Simulationsergebnisse einer vollständigen BGK-Simulation im Phasenraum der Molekülgeschwindigkeit mit Ergebnissen eines Modells für die resultierenden Schlupfgeschwindigkeit von Lockerby und Reese (2007) und einem alternativen Modell von Transportgleichungen verglichen. •

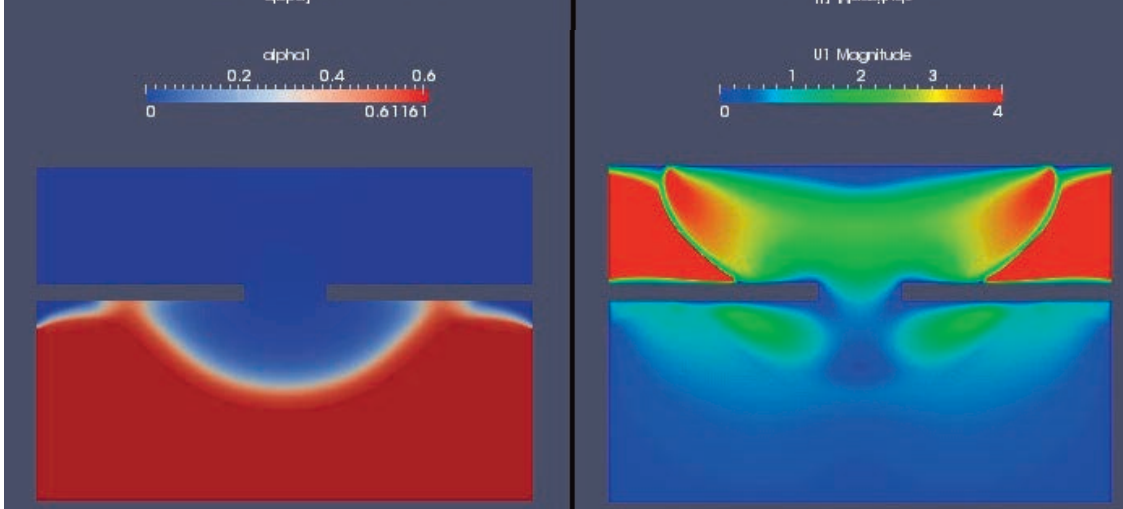


ABB. 1 Stoßwelle in einem kompressiblen Medium

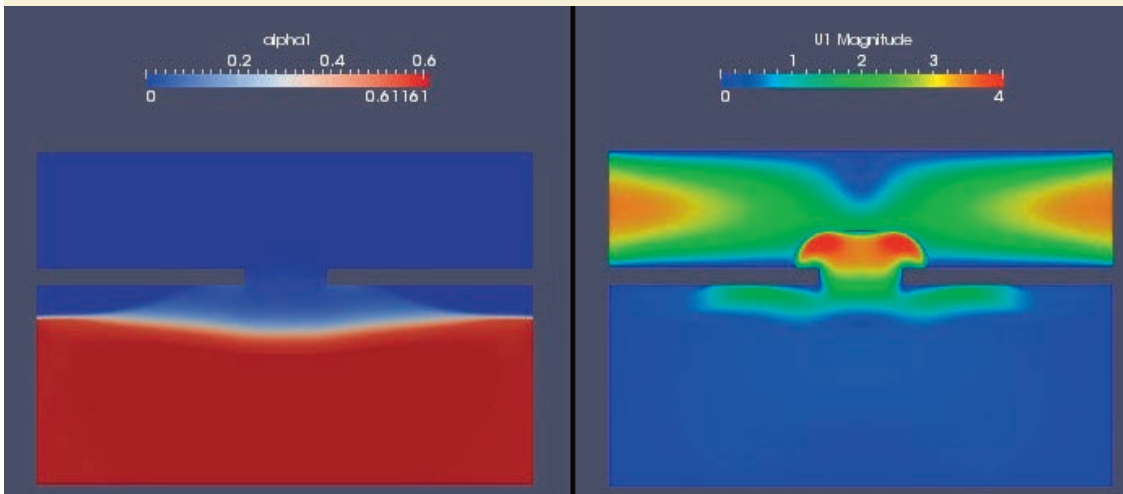


ABB. 2 Auswurfgeschwindigkeit bei schlagartiger eines granularen Betts

PHASENINTERAKTION DISPERSER STRÖMUNGEN

Während beim Transport von Festkörperpartikeln in einer gasförmigen Trägerphase in der Regel kein Massentransport von der dispersen Partikelphase hin zum Fluid stattfindet, steht beim Transport von Flüssigkeitstropfen – wie in einer Sprayströmung – der Massentransport von der dispersen hin zur kontinuierlichen Trägerphase häufig im Fokus des Interesses. Beispiele technischer Strömungen, bei denen diese Effekte von großer Bedeutung sind, stellen Sprühtrocknungs- oder Lackierungsprozesse dar, aber auch Abkühlungsprozesse, wie sie in Schlagradmühlen großer Kohlekraftwerke auftreten.

Eine numerische Beschreibung, bei der nicht die Phasengrenzfläche eines jeden Sprühtropfens aufgelöst sein soll, ist darauf angewiesen, dass makroskopische Transportgrößen zur Beschreibung des Phasenübergangsprozesses herangezogen werden. Einer der bekanntesten Algorithmen, welche herangezogen werden, um diesen Vorgang zu beschreiben, ist das Modell von Abramzon und Sirciano (1989). Hier wird Wärme- und Massen-

transport an der Phasengrenzfläche eines sphärischen Tropfens in Abhängigkeit von Temperatur und der relativen Feuchtigkeit der Umgebung dargestellt. Ohne einzelne Tropfen in einer numerischen Simulation mit einem Euler/Euler-Beschreibungsansatz aufzulösen, müssen charakteristische Größen für den Phasenübergang eingeführt werden. Das in diesem Beispiel angewandte Modell fußt auf den volumenspezifischen Größen des Flüssigkeitsvolumens und der Flüssigkeitsoberfläche. So wird neben einem die Verdampfungsrate charakterisierenden Verdampfungszeitmaß und Volumenbruch auch die volumenspezifische Oberfläche eingeführt. Mittels dieser Größe werden die für den Wärme- und Massentransport verantwortlichen Nusselt- und Sherwood-Zahlen auf der Basis der sogenannten Ranz/Marshall-Korrelation beschrieben. Sobald der thermodynamische Anteil durch diese Modelle geschlossen wird, bleiben die Bilanzgleichungen der Erhaltungsgrößen: Masse, Impuls und Energie der zu transportierenden Trägerphase und der dispersen Tropfenphase. •

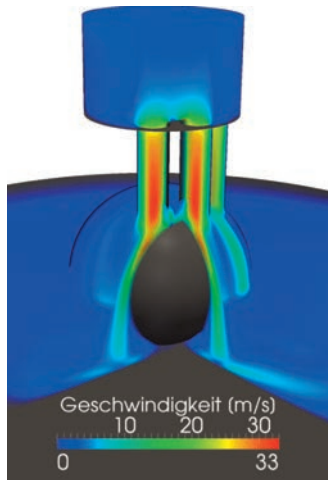
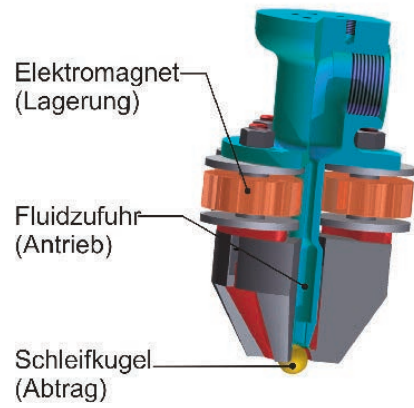


ABB. 1 Aufbau eines fluidisch angetriebenen Schleifwerkzeugs

ABB. 2 Querschnittsbild der Strömungssimulationsergebnisse

KRAFTÜBERTRAGUNG IN TURBULENTEN WANDGRENZSCHICHTEN

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, kleine modulare Bearbeitungseinheiten für die Mikrozerspanung zu entwickeln. Das Konzept derartiger Einheiten ergibt sich aus der Dekomposition klassischer Werkzeugmaschinen und der Funktionsintegration von Antrieb und Führungen. Zur exemplarischen Umsetzung wird zunächst ein Mikro-Schleifkopf (GrindBall) entwickelt.

Hierbei sollen ein elektromagnetisches Lagerungssystem und ein fluiddynamischer Antrieb verknüpft werden, um einen kugelförmigen Schleifkörper von wenigen Millimetern Größe anzutreiben und mit diesem einen Abtrag zu erzielen. Durch den kugelförmigen Aufbau kann die Rotationsachse nahezu beliebig zum aktuellen Kontaktpunkt der Bearbeitung ausgerichtet sein und so eine möglichst hohe Schnittgeschwindigkeit erzielt werden. Durch das Fehlen einer festen Rotationsachse wird es als achsenloses Mikroschleifwerkzeug bezeichnet. Der Einsatzbereich wird zunächst auf einfache Geometrien, wie rotationssymmetrische Kavitäten mit Abmessungen in der Größe des Schleifkörpers, beschränkt. Anhand der entwickelten Methodik sollen sich hieraus später mit überschaubarem Aufwand neue Module ableiten lassen, die eine Bearbeitung

von komplexeren Werkstückgeometrien und insbesondere von Freiformmikrostrukturen ermöglichen.

Im Rahmen unserer Untersuchungen werden Parameterstudien durchgeführt, die es ermöglichen, in Abhängigkeit von Medium und geforderten Schleifparametern wie Schleifkraft, relativer Oberflächengeschwindigkeit und Anpresskraft die optimalen geometrischen Parameter für das aufzubauende Werkzeug festzulegen. Insbesondere bei einem Einsatz mit Luft als kraftübertragendes Medium steht die numerische Modellierung der hochgradig turbulenten und instationären Strömung innerhalb des Kugelspalts im Vordergrund der Untersuchungen. Wesentliches Merkmal ist der Anströmwinkel der Schleifkugel. Auf Grund der turbulenten Grenzschichtentwicklung ist bei einer flachen Anströmung die Kraftübertragung nur minimal. Bei einem leicht steileren Winkel wird die Grenzschichtdicke deutlich reduziert, wodurch höhere Geschwindigkeitsgradienten in unmittelbarer Nähe der Schleifkugeloberfläche für höhere Scherkräfte sorgen. Dieser Umstand garantiert eine höhere Effizienz der durch die Anströmung erzwungenen Kraftübertragung. •

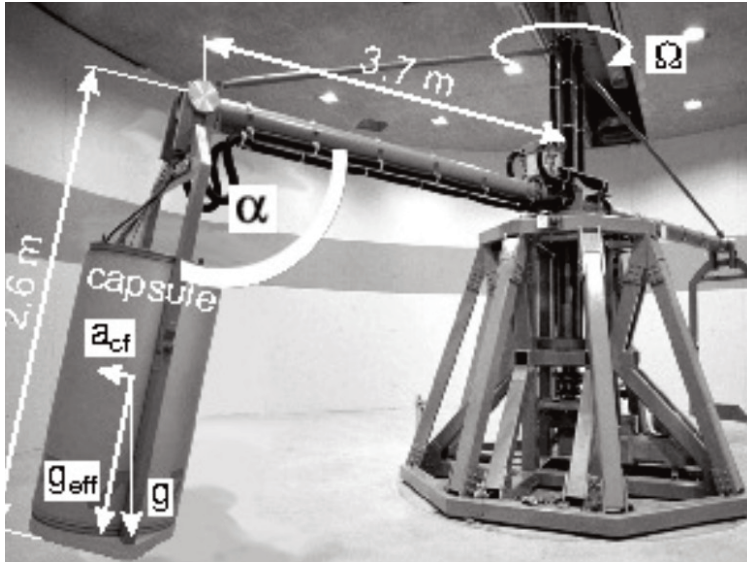


ABB. 1
30g-Zentrifuge
am ZARM

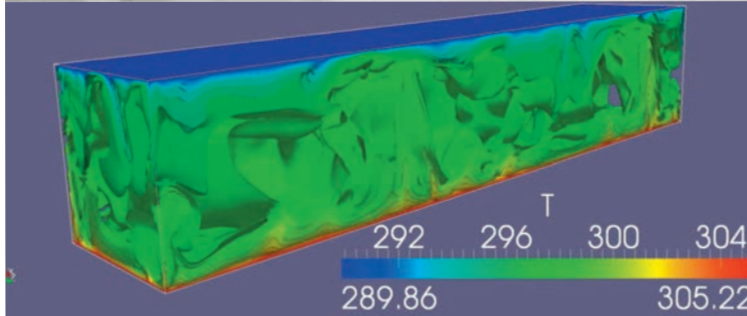


ABB. 2
Momentanauf-
nahme der Tem-
peraturvertei-
lung in einer
turbulenten
Konvektions-
strömung

WIRBELSTÜRME: NATÜRLICHE KONVEKTIONSSTRÖMUNGEN IN EINEM BESCHLEUNIGTEN BEZUGSSYSTEM

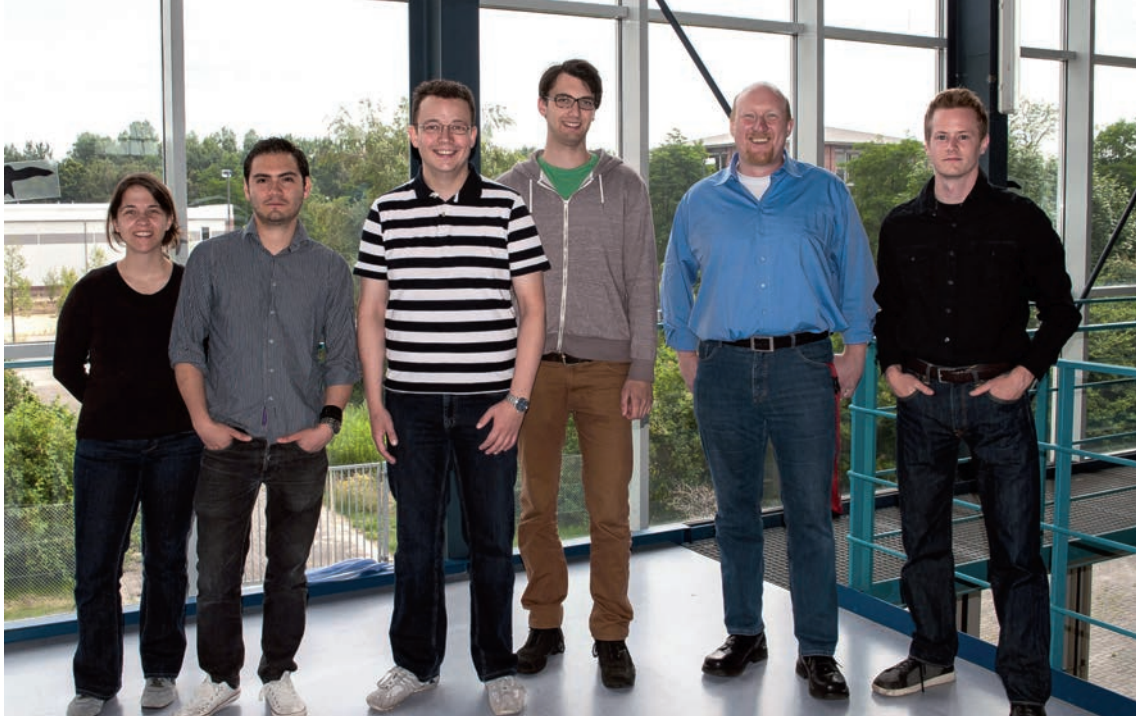
In diesem Projekt untersuchen wir lokal begrenzte Wirbelstürme wie Wasserhosen oder Tornados. Die thermischen und mechanischen Strömungen, die bei Wirbelstürmen auftreten, sollen mithilfe eines physikalischen Modellversuchs und mit einer Computersimulation von der Entstehung bis hin zum Zerfall nachgestellt werden.

Bisherige Modelle von Turbulenzen können eine Strömung, die hochgradig instationär ist und wechselnde Temperaturgradienten aufweist, nicht abbilden. Denn bisher kann nur eingeschränkt modelliert werden, welchen Einfluss variierende Dichtegradienten auf die Produktion von Turbulenzen und auf deren Energieverlauf haben.

In dem geplanten Experimentaufbau sollen Bedingungen geschaffen werden, welche die in der Atmosphäre herrschenden Strömungsverhältnisse bei der Entstehung eines Wirbelsturms simulieren. Aufsteigende Luftmassen werden in einer Kapsel durch eine vertikale Konvektionsströmung entlang eines Temperaturgradienten simuliert. Eine Zentrifuge sorgt für die künstlich nachempfundene Erdrotation, welche normalerweise in der Atmosphäre

den Wirbelsturm in Bewegung setzt. Um solche Effekte stabil erzeugen zu können, muss der Radius einer Zentrifuge entsprechend groß sein. Daher ist die am ZARM vorhandene Großzentrifuge der Universität Bremen mit einem Radius von XY cm geradezu prädestiniert für diesen Modellversuch.

Selbst wenn im Labormaßstab nicht dieselben Strömungswerte (Grashof- und Reynolds-Zahlen) erreicht werden können, wie bei einem voll ausgebildeten Wirbelsturm, sind nach den ersten Auslegungen im Experiment doch bereits Coriolis-Beschleunigungen zu erreichen, bei denen die Rotationsströmung in turbulente Bereiche vorstößt. Die Strömungsbewegungen während des Experiments beruhen auf einem Zusammenspiel von thermischer Konvektion und Wärmeleitung. Sie sorgen für die Verteilung von Temperatur und Geschwindigkeit und lassen sich statistisch modellieren. Die in dem hoch turbulenten System gespeicherte Rotationsenergie wird durch vertikale Temperaturgradienten angefacht und in Bereichen radialer Temperaturgradienten zerstreut. •



DAS TEAM THERMOFLUIDDYNAMIK

Wissenschaftliche Mitarbeiter

Dr.-Ing. Rodion Groll

rodion.groll@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57832

✉ +49 421 218-9857832

Dipl.-Math. techn. Fabian Fastabend

fabian.fastabend@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57923

M.Sc. Juan Esteban Gomez-Herrera

juan.gomez@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57865

M.Math. Kristopher Leach

kris@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218 57845

Dipl.-Ing. Stephan Reichel

stephan.reichel@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57926

B.Sc. Torben Schadowski

torben.schadowski@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57841

Dipl. Math. Claudia Zimmermann

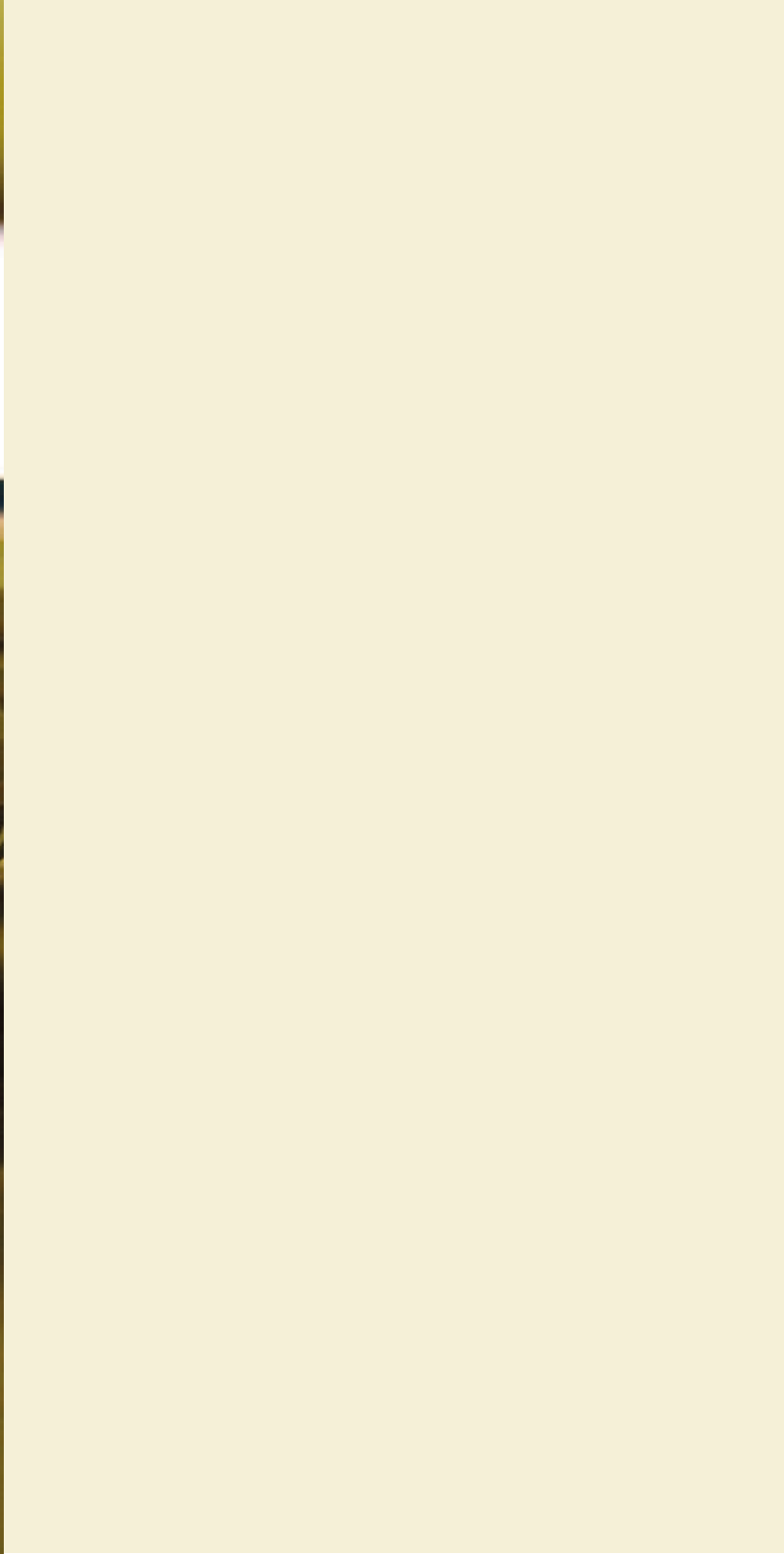
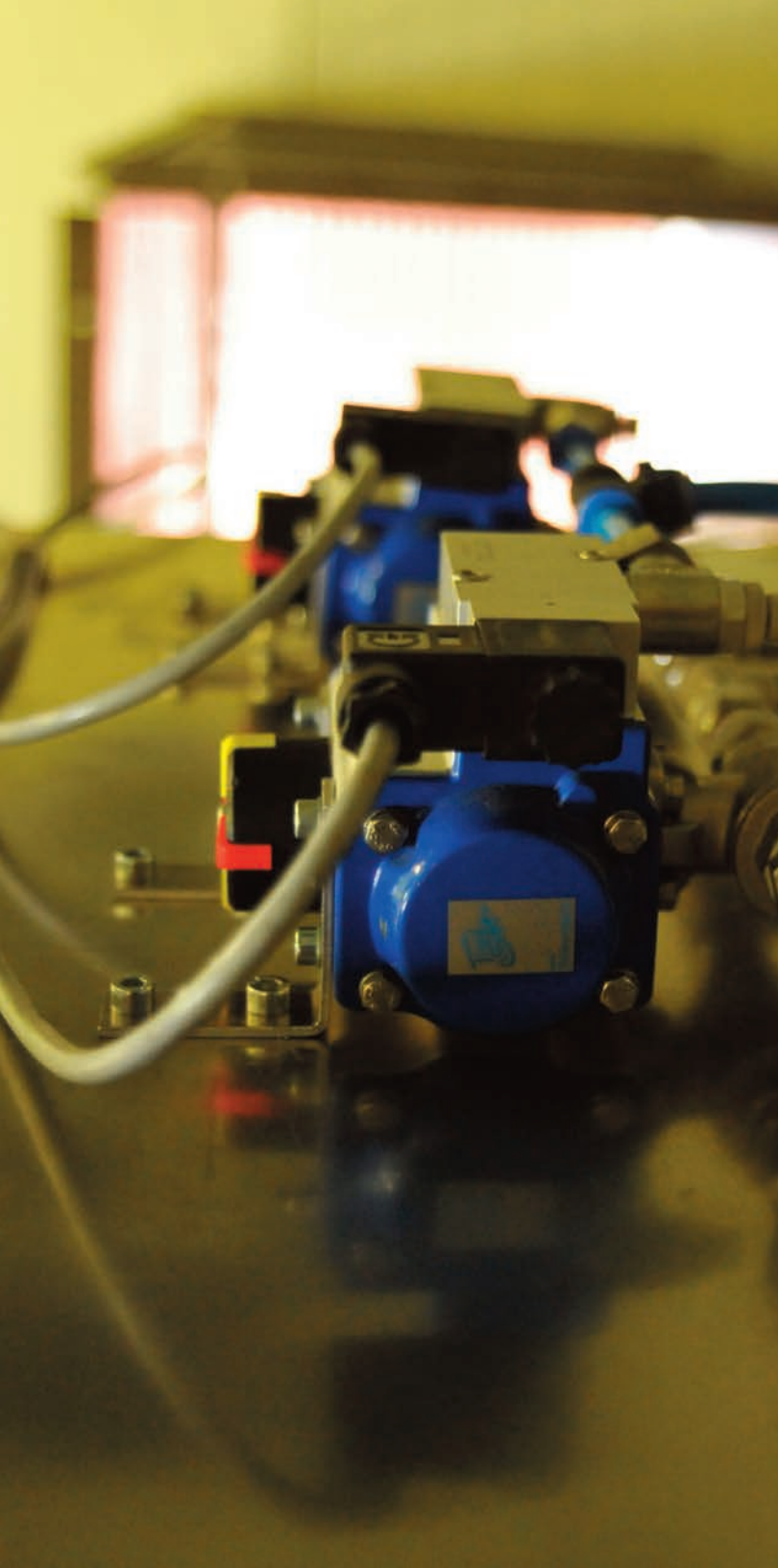
claudia.zimmermann@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57844

Studentische Mitarbeiter

Björn Klose

Rico Schultz





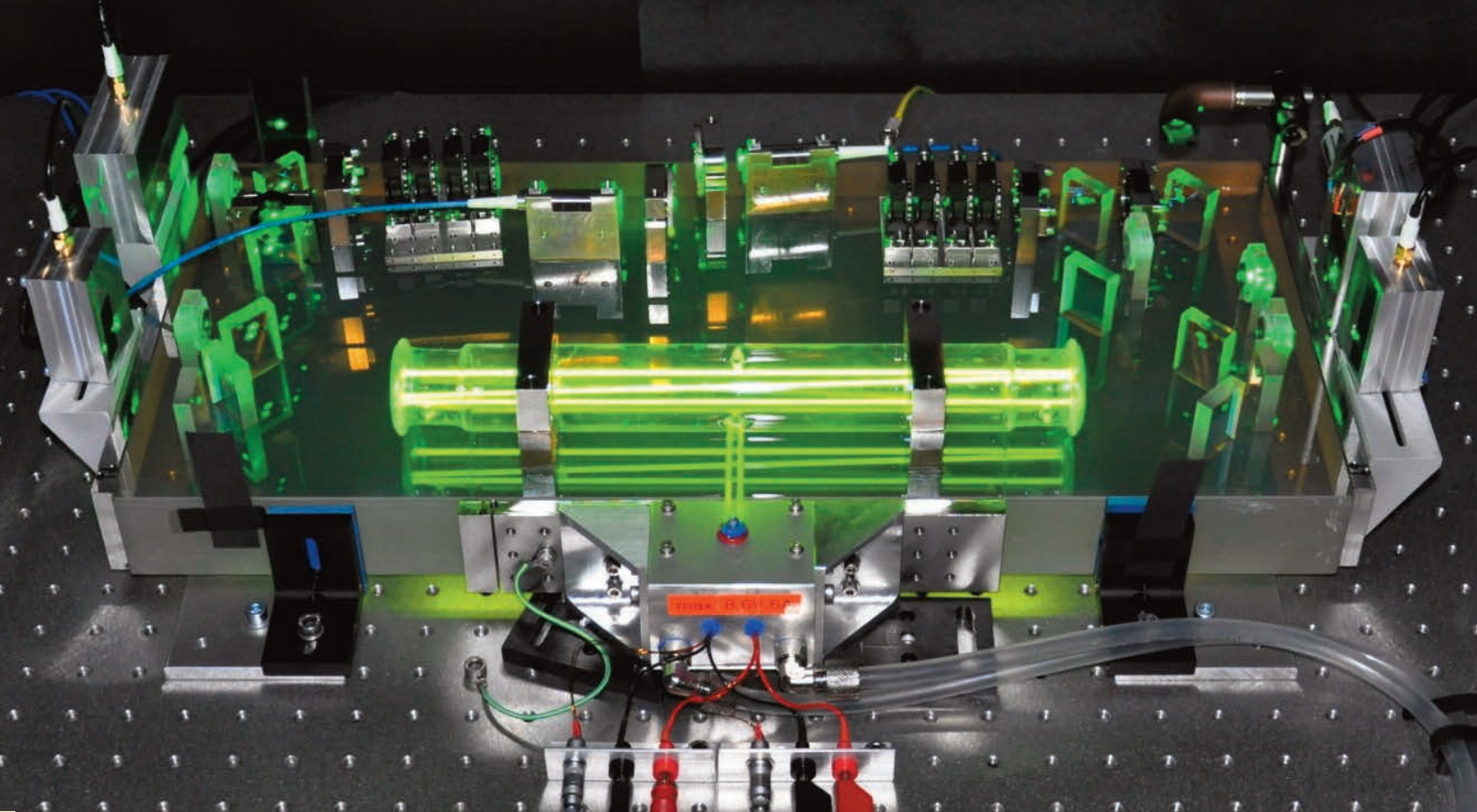
ZAR

RAUMFAHRTTECHNOLOGIE

METROLOGIE & SATELLITENMISSIONEN

ANTRIEBE & ENERGIESYSTEME

VEBRENNUNGSTECHNOLOGIE



METROLOGIE UND SATELLITENMISSIONEN

Die hochgenaue Messung physikalischer Größen, die Suche nach neuen Effekten oder die Überprüfung der Physik verlangen immer präzisere Messmethoden. Exemplarisch seien die Vermessung des Schwerefeldes der Erde im Rahmen der Satellitenmissionen GRACE und GRACE-FO sowie die Detektion von Gravitationswellen im Rahmen der Satellitenmission LISA und NGO genannt. Im ersten Fall muss ein Abstand von ca. 200 Kilometer zwischen zwei Satelliten, die als Experiment zwei frei fallende Testmassen mitführen, bis auf einen Milliardstel Meter (Nanometer) genau gemessen werden. Im zweiten Fall werden sogar drei Testmassen verwendet, deren Abstand zueinander ca. eine Million Kilometer beträgt und der auf einen Billionstel Meter (Pikometer) genau bestimmt werden muss. Diese Art von Missionen erfordern hochpräzise optische Instrumente wie Interferometer und Frequenz-Referenzen zur Messung des Abstandes und der Zeit.

Am Lehrstuhl für Raumfahrttechnologie werden solche Messinstrumente entwickelt. Besonderen Wert legt das Team auf den Aufbau und die Verarbeitung der Instrumente, denn schließlich müssen diese den Bedingungen eines Raketenstarts und ihrem Einsatz im Weltraum standhalten. Störungen wie Vibrationen, Temperaturänderungen und starke Strahlung dürfen die Messgenauigkeit der Instrumente hierbei nicht beeinflussen.

Eine weitere Kernaufgabe des Teams am Lehrstuhl ist es, die Planung von konkreten Satellitenmissionen zu begleiten. Derzeit sind wir federführend in die Mission STE-QUEST (Space-Time Explorer and Quantum Equivalence Principle Space Test) involviert, die vom Deutschen Zentrum für Luft- und

Raumfahrt (DLR) und der Europäischen Raumfahrtagentur (ESA) gefördert wird. Die Satellitenmission dient der Überprüfung der Grundlagen und Vorhersagen der Relativitätstheorie Einsteins mit einmaliger Genauigkeit und mittels quantenmechanischer Zustände der Materie: „Wie verändert das Schwerefeld der Erde den Uhrengang?“ und „Fallen alle Körper im Schwerefeld der Erde im Vakuum auf die gleiche Art und Weise?“

Zur exakten Positionierung von Satelliten und deren Abständen zueinander sind nicht nur hochpräzise Messinstrumente notwendig, sondern auch Triebwerke mit einer äußerst geringen Schubkraft. Die Entwicklung von Antrieben mit Schüben im Milli- und Mikro-Newton-Bereich wird ebenfalls am Lehrstuhl unternommen. Eng daran geknüpft ist die Charakterisierung und exakte Bestimmung der Leistungsfähigkeit solcher Triebwerke. Dazu sind wiederum neue Messmethoden erforderlich. Ähnliches gilt schließlich auch für die Güteuntersuchung von Spiegeloberflächen und die Untersuchung der thermischen Ausdehnung dimensional hochstabiler Materialien für Weltraumanwendungen, die beispielweise in Bauteilen von Messinstrumenten auf Forschungssatelliten verwendet werden und die schlichtweg den Anforderungen einer hochpräzisen Messgenauigkeit standhalten müssen.

Bei all diesen Aktivitäten arbeiten wir eng mit dem DLR Institut für Raumfahrtssysteme in Bremen (DLR-RY) und Astrium GmbH in Friedrichshafen sowie teilweise mit der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Gestaltung Konstanz (HTWG Konstanz) und der Humboldt-Universität zu Berlin zusammen. •

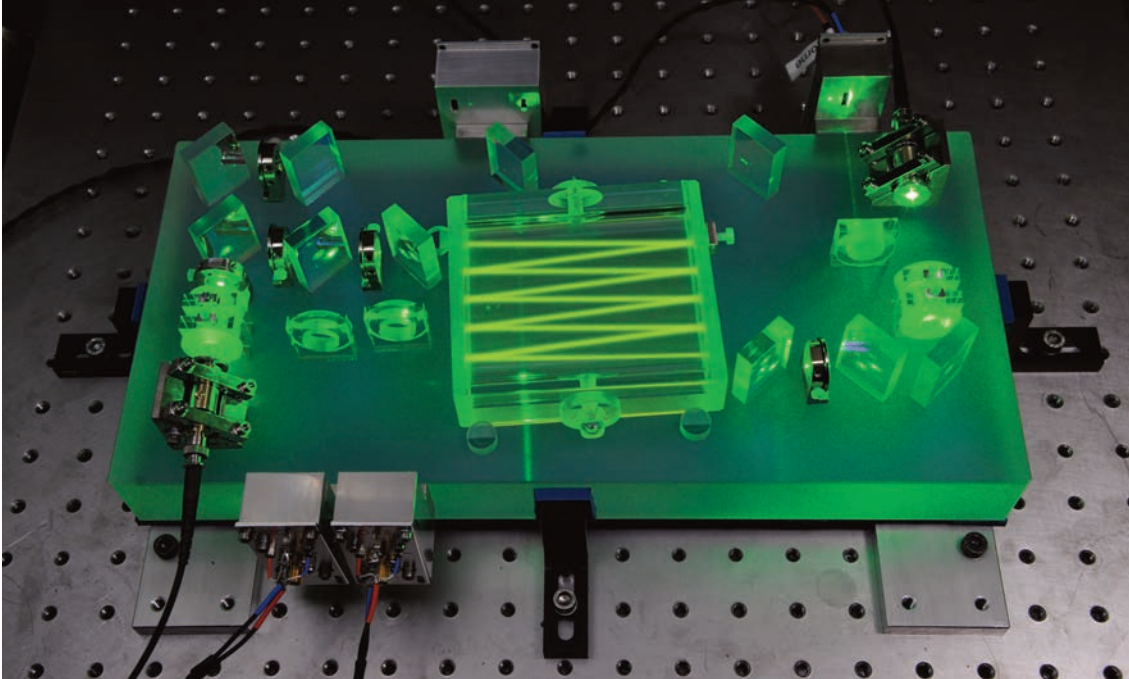


ABB. 1 Auf Jod basierende kompakte optische Frequenzreferenz, aufgebaut als Demonstrator für einen zukünftigen Einsatz unter Weltraumbedingungen. Die optischen Komponenten wurden auf eine Grundplatte aus CLE-ARCERAM-Z HS (Glaskeramik mit thermischem Ausdehnungskoeffizient von $2 \cdot 10^{-6}/\text{Kelvin}$) aufgeklebt, um die mechanische Stabilität zu erhöhen und thermische Einflüsse weitestgehend zu unterdrücken.

HOCHSTABILE OPTISCHE FREQUENZREFERENZ

Im Alltag verwendet man Uhren unterschiedlichster Art. Auf den ersten Blick sind eine Pendel-Standuhr und eine digitale Armbanduhr völlig verschieden, dennoch ist das grundlegende Funktionsprinzip gleich: Beide benötigen zur Zeitmessung einen Taktgeber. Im Fall der Pendeluhr handelt es sich hierbei um ein mechanisches Pendel (Taktfrequenz im Bereich ein Mal je Sekunde) und bei der Armbanduhr sehr oft um einen Quarzkristall (Taktfrequenz im Bereich 36000 Mal je Sekunde). Allgemein gilt, dass eine höhere Frequenz des Taktgebers in der Regel eine genauere Zeitmessung erlaubt.

In modernen physikalischen Experimenten finden heutzutage Uhren Verwendung, die um ein vielfaches genauer sind als alltagstaugliche Uhren mit mechanischen Pendeln oder Quarzkristallen.

Ein Weg, eine extrem genaue Uhr zu realisieren, basiert auf der Verwendung eines Lasers als Taktgeber. Die Laserfrequenz eines grünen Lasers beträgt ungefähr 560 Billionen Schwingungen pro Sekunde. Leider schwankt die Frequenz des freilaufenden, also nicht stabilisierten, Lasers zu stark, um als Taktgeber eingesetzt zu werden – es sei denn, man bedient sich eines Tricks: Man strahlt den Laser auf einen Behälter mit Jod-Molekülen, die nur dann Licht absorbieren können, wenn die Laserfrequenz einen bestimmten Wert hat. Wird weniger

Licht absorbiert, kann die Laserfrequenz nachgeregelt werden bis das Licht wieder maximal absorbiert wird und die Laserfrequenz die benötigte Frequenz erreicht hat.

In der Vergangenheit haben wir gezeigt, dass es auf diese Weise möglich ist, Uhren zu realisieren, die so genau sind, dass sie in zehn Millionen Jahren um weniger als eine Sekunde falsch gehen. Aktuell arbeiten wir daran, eine solche auf Jod basierende Taktquelle für deren zukünftige Verwendung unter Weltraumbedingungen weiterzuentwickeln. Die zentralen Herausforderungen liegen dabei in der Reduzierung der geometrischen Abmessungen und der Verbesserung der mechanischen sowie thermischen Stabilität, ohne jedoch Einbußen bei der Genauigkeit der Uhr zu verursachen.

Einige aktuelle Weltraummissionen, bei denen eine solche auf Jod basierende Uhr zum Einsatz kommen könnte, wären z.B. GRACE-FO, DARWIN, LISS, mSTAR und BOOST. Neben dem Einsatz als Taktgeber für moderne Uhren ist ein frequenzstabilisierter Laser auch ein nützliches Werkzeug für die moderne Messtechnik wie beispielsweise die Laser-Interferometrie.

Dieses Projekt ist eine Zusammenarbeit mit der Humboldt Universität zu Berlin, der HTWG Konstanz und Astrium GmbH in Friedrichshafen. •

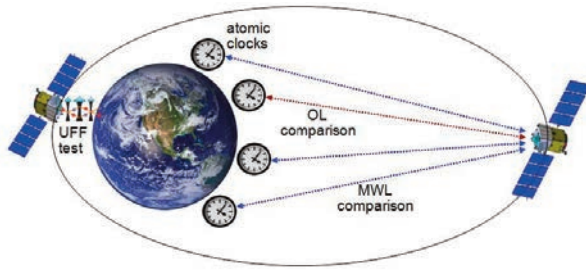
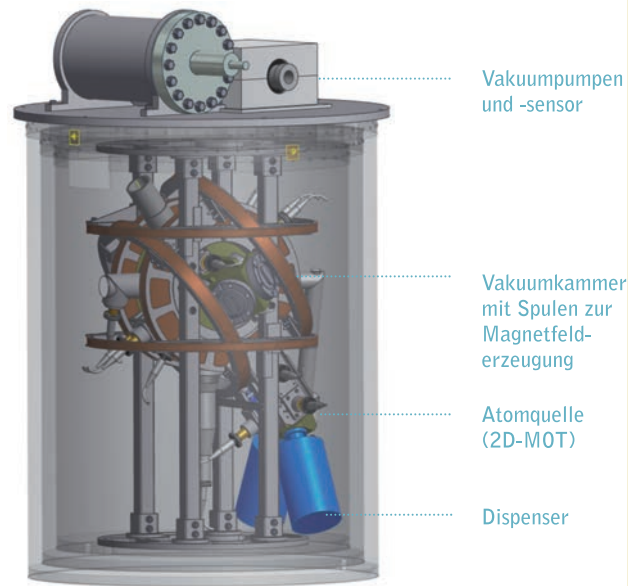


ABB. 1 Abbildung des geplanten hochelliptischen Orbits des STE-QUEST Satelliten. Links ist der QUEST Teil der Mission schematisch angedeutet, bei dem getestet wird, ob unterschiedliche Atome gleich schnell fallen (UFF: engl. für Universality of Free Fall). Rechts werden Atomuhren auf der Erde mit einer Atomuhr auf dem Satelliten verglichen, um so die Raumzeitkrümmung zu messen. Die beiden Messprinzipien geben dabei auch die Wahl des Orbits vor, d.h. große Gravitationspotentiale für die UFF-Messung sowie große Änderungen im Gravitationspotential für den Uhrenvergleich.

ABB. 2 Darstellung des weltraumtauglichen Atom-Interferometers, welches unter anderem am ZARM entwickelt werden soll. Gezeigt ist der Teil der Experimentapparatur mit der zentralen Vakuumkammer, in der in der die Wolken ultrakalter Rubidium-Atome erzeugt und manipuliert werden.



EINSTEIN UNTER DER LUPE

DIE STE-QUEST MISSION

STE-QUEST steht für „Space-Time Explorer and Quantum Equivalence Principle Space Test“ und ist der Name für eine Satellitenmission, die es in die engere Auswahl der ESA (European Space Agency) geschafft hat, um eventuell im Jahr 2022 ins All zu starten. Bei STE-QUEST handelt es sich eigentlich um zwei Missionen, die gemeinsam auf einem Satelliten mitfliegen. Beide dienen dazu, verschiedene Aspekte der Allgemeinen Relativitätstheorie mit einer noch nicht erreichten Genauigkeit zu überprüfen. Um dies zu erreichen, werden komplexe Messsysteme verwendet, beispielsweise ein Atom-Interferometer oder die eher bekannten Atomuhren, welche uns derzeit als beste Grundlage zur exakten Zeitmessung dienen. Doch was soll mit STE-QUEST genau gemessen werden?

Einstein zeigt in der Allgemeinen Relativitätstheorie, dass der dreidimensionale Raum und die eindimensionale Zeit nicht als unabhängig voneinander angesehen werden können, sondern ganzheitlich als vierdimensionale Raumzeit zu betrachten sind. Gravitation wird nun nicht mehr als Kraft aufgefasst, sondern als eine Krümmung dieser Raumzeit. Dies lässt Uhren je nach Krümmung der Raumzeit schneller oder langsamer gehen, was in zahlreichen Experimenten schon nachgewiesen wurde. Bei STE soll nun die Krümmung der Raumzeit mittels eines Vergleichs zwischen einer Atomuhr an Bord des Satelliten und einer Atomuhr auf der Erde an verschiedenen Stellen im Weltraum gemessen, also quasi kartographiert, werden.

Eine Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie ist das Äquivalenzprinzip. Dieses besagt, dass die träge Masse eines Körpers seiner schweren Masse entspricht. So lässt sich nach diesem Prinzip die Tatsache erklären, dass eine Feder und eine Stahlkugel in einem luftleeren Raum gleich schnell fallen. Einstein gilt auch als einer der Urväter der Quantentheorie. Diese besagt, dass nicht nur Materie aus kleinsten Einheiten aufgebaut ist, sondern ebenfalls das Licht oder die elementaren Kräfte. Der QUEST-Teil der Mission soll diese Theorien mit einem Atom-Interferometer überprüfen. Die Rolle der Feder und der Stahlkugel übernehmen hier gekühlte Rubidium Atome unterschiedlicher Zusammensetzung (genauer Rb85 und Rb87 Isotope). Diese werden „fallen“ gelassen und interagieren jeweils miteinander. Die Art wie sie dies tun, lässt Rückschlüsse auf die Gültigkeit der durch Einstein postulierten Gesetzmäßigkeiten zu. Außerdem liefert dieses Experiment Hinweise darauf, wie das grundlegendste Problem der heutigen theoretischen Physik – die gleichzeitige Beschreibung von Gravitation und Quantentheorie – gelöst werden kann.

Die wissenschaftliche Nutzlast des Satelliten wird derzeit von einer Gruppe europäischer Wissenschaftler und diverser Industriepartner entwickelt. Der deutsche Beitrag umfasst dabei das Gesamtdesign des Atom-Interferometers unter Koordination des ZARM. •

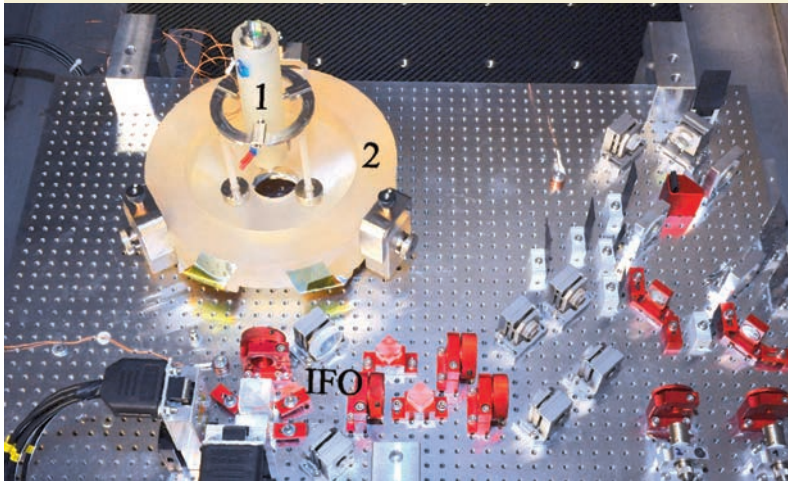
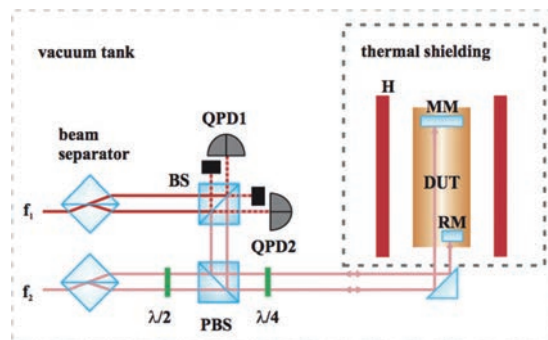


ABB. 1 Messsystem in der Vakuumkammer: Laser- Interferometer (IFO), Glaskeramikprobe (1), Probenhalterung (2). Die Heizung ist hier nicht montiert.

ABB. 2 Links ist eine schematische Darstellung des Strahlengangs des Interferometers, dessen zwei Strahlen rechts auf die zu untersuchende Probe fallen (DUT). Diese befindet sich in einer Heizung (H), mit der die Temperatur geändert werden kann. Alle Komponenten befinden sich in einer Vakuumkammer, um äußere Einflüsse zu minimieren.



MESSSYSTEM ZUR BESTIMMUNG VON AUSDEHNUNGSKOEFFIZIENTEN THERMISCH HOCHSTABILER MATERIALIEN

Warum platzt die wassergefüllte Glasflasche im Tiefkühlschrank? Die Antwort auf diese Frage könnte lauten: „Weil sich das Wasser ausdehnt, wenn es gefriert!“ Aber warum dehnt sich denn nicht auch die Glasflasche aus?

Die Art, wie sich ein Stoff bei Temperaturänderungen ausdehnt oder zusammenzieht, wird durch den thermischen Ausdehnungskoeffizienten beschrieben und dieser ist nicht für alle Stoffe gleich. Die Längenänderungen sind dabei recht klein. So dehnt sich ein zwei Meter langer Aluminiumzollstock gerade mal um einen Millimeter aus, wenn wir ihn aus dem ca. 5 Grad Celsius kalten Keller in die ca. 20 Grad Celsius warme Wohnstube holen. Diese Effekte, welche wir im Alltag kaum bemerken, führen aber zu Problemen, wenn Präzisionsexperimente durchgeführt werden, bei denen höchste Genauigkeit benötigt wird.

Ebenfalls kritisch kann es bei Weltraumanwendungen werden, bei denen es enorme Temperaturschwankungen gibt: Die sonnenzugewandte Seite wird – je nach Entfernung zur Sonne – auf mehrere hundert Grad Celsius erhitzt, auf der sonnenabgewandten Seite fallen die Temperaturen hingegen bis auf -270 Grad Celsius ab. Daher werden derzeit u.a. kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe oder Glaskeramiken entwickelt, die sich bei Temperaturänderung bis zu tausend Mal weniger ausdehnen

als das oben angesprochene Aluminium. Um diese Werte überhaupt messen zu können, braucht man ein extrem sensibles Messsystem.

Als Messsystem dient hierzu ein hochgenaues Laser-Interferometer, welches Abstandsänderungen im Bereich von einem milliardstel Millimeter messen kann. Dabei werden am oberen und am unteren Ende der Materialprobe, deren Ausdehnungskoeffizient gemessen werden soll, Spiegel angebracht, die als Referenzpunkte für das Interferometer dienen.

Wird nun die Temperatur durch eine Heizung geändert, dehnt sich die Probe aus und das Interferometer misst eine Abstandsänderung zwischen den Spiegeln. Da diese Änderungen sehr genau vermessen werden können, müssen Proben nicht besonders lang (etwa 10 Zentimeter) sein, um den Ausdehnungskoeffizienten zu bestimmen. Auch reichen Temperaturänderungen von wenigen Grad für eine genaue Messung aus.

Der vorgestellte Messaufbau wurde über die letzten Jahre in Zusammenarbeit mit der HTWG-Konstanz und Astrium GmbH in Friedrichshafen entwickelt. Dabei war es unter anderem durch die Präzision der Messungen möglich, den Herstellungsprozess für die kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe zu optimieren. •

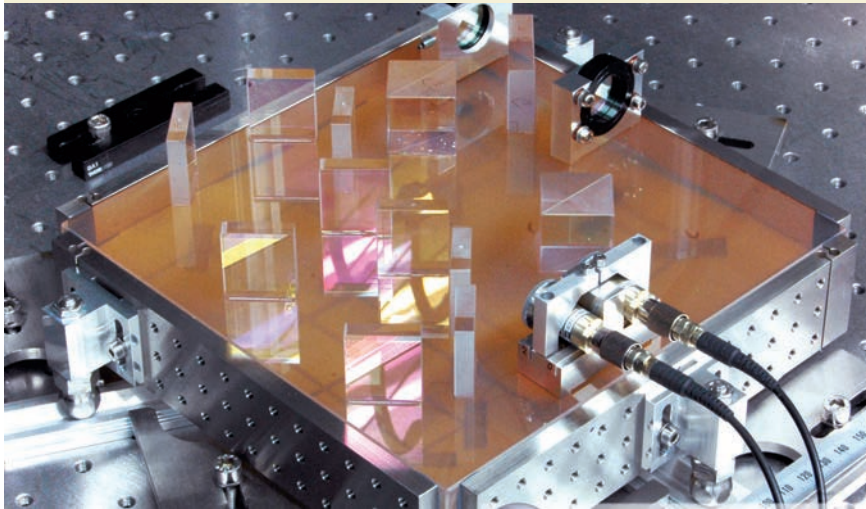
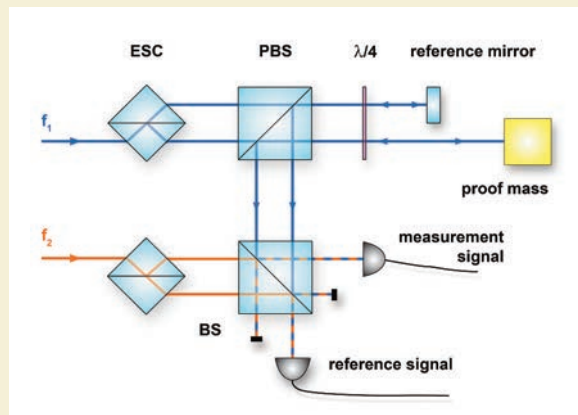


ABB. 1 Laser-Interferometer. Die optischen Komponenten wurden auf eine Grundplatte aus Zerodur aufgeklebt, um sowohl die thermische als auch die mechanische Stabilität zu erhöhen.

ABB. 2 Schematische Darstellung des Strahlengangs. Die Laserstrahlen werden an einem symmetrischen Strahlteiler (ESC) jeweils in zwei Strahlenpaare aufgeteilt. Die Strahlen mit der Frequenz f_1 durchlaufen einen polarisierenden Strahlteiler (PBS) und werden am Testobjekt bzw. Referenzspiegel reflektiert. Anschließend werden sie auf zwei verschiedenen Photodetektoren mit dem Laserstrahlen der Frequenz f_2 überlagert. Dadurch entsteht ein oszillierendes Signal aus, dessen Eigenschaften die unterschiedliche Länge der optischen Wege der beiden Strahlen berechnet und letztlich die Bewegung des Testobjektes abgeleitet werden kann.



HOCHAUFLÖSENDE LASER-INTERFEROMETRIE

Möchte man den Abstand zwischen zwei Punkten ermitteln, greift man im Alltag meist zu Lineal, Maßband oder Zollstock. Der Zollstock der modernen Physik ist das Laser-Interferometer. Es kann Abstände wesentlich genauer und über größere Entfernungen messen als dies mit traditionellen Messgeräten möglich ist.

Die Funktionsweise lässt sich dabei wie folgt beschreiben: Ein Laserstrahl wird in einzelne Strahlen aufgeteilt. Diese Teilstrahlen durchlaufen unterschiedliche Pfade und werden anschließend wieder überlagert. Unterscheiden sich die Längen der optischen Wegstrecken der Pfade wird dies im überlagerten Signal sichtbar (siehe ABB. 2).

Über die vergangenen Jahre haben wir in Zusammenarbeit mit der Humboldt Universität zu Berlin, der HTWG Konstanz und der Astrium GmbH in Friedrichshafen ein Interferometer entwickelt, das Abstandsänderungen zwischen einem Mess- und einem Referenzspiegel mit einer Genauigkeit von einigen Pikometern (10^{-12} Meter bzw. der milliardste Teil eines Millimeters) messen kann. Auch können die horizontale und vertikale Verkipfung der Spiegel – also in welchem Winkel sie stehen – gleichzeitig gemessen werden. Hierbei liegt die systembedingte Messgenauigkeit im Bereich von einem 20-millionsten Teil eines Grades.

Für den Aufbau des Interferometers wurde ein spezielles Klebeverfahren zur Befestigung der optischen Komponenten auf einer Glaskeramik (Zero-dur) entwickelt (siehe ABB. 1). Dies ist wichtig, da

die Befestigungsart starken Einfluss auf die Genauigkeit der Messung nimmt. Erreicht werden konnte ein kompakter, thermisch sowie mechanisch hochstabiler Aufbau, der z.B. auch in einem Satelliten zum Einsatz kommen könnte. Entsprechende Tests auf einem Rütteltisch und in einer Thermal-Vakuum Kammer haben gezeigt, dass die Leistungsfähigkeit des Interferometers durch Störungen wie Erschütterungen und Temperaturschwankungen nicht beeinflusst wurde. Folglich würde das Interferometer die starken Beschleunigungen beim Raketenstart, denen ein Satellit auf seinem Weg in den Weltraum unweigerlich ausgesetzt ist, unbeschadet überstehen können.

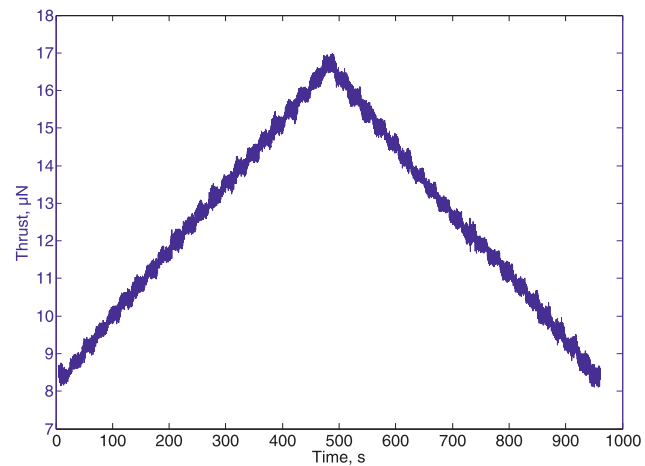
In wissenschaftlichen Raumfahrtmissionen (LISA, eLISA/NGO, GRACE-FO) könnte das Interferometer benutzt werden, um die Abstände zwischen zwei Satelliten, die Hunderte bzw. Millionen Kilometer auseinander liegen, hochgenau zu messen und die Satelliten dann exakt zu positionieren.

Ebenso stellt das Interferometer ein nützliches Hilfsmittel für Untersuchungen im Vorfeld von Satellitenmissionen dar. So können das thermische Verhalten von Strukturmaterialien (mittels Dilatometrie) und die Unebenheiten von Spiegeloberflächen mit einer Auflösung im Bereich von unter einem Nanometer exakt bestimmt werden. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist der Einsatz in einer Schubmesswaage, die dazu dient, die Schubkraft von Triebwerken im Bereich von Mikro-Newton zu messen. •



ABB. 1 Mikro-Newton Schubmesswaage: Im Vordergrund ist das Laser-Interferometer zu erkennen vor den langen Pendeln. Auf der linken Seite im Bildhintergrund steht die Vakuumkammer, in die der Teststand eingebracht wird, um die Messung durchzuführen.

ABB. 2 Schubmessung im Mikro-Newton Bereich (μN). Durch Änderung der Betriebsparameter wird der Schub variiert.



MIKRO-NEWTON SCHUBMESSUNG

Die Entwicklung von elektrischen Triebwerken mit sehr kleinen Schubleistungen, wie beispielsweise dem HEMPT (siehe Kapitel Mikro-Newton Triebwerke, S. 71), geht mit der Entwicklung von entsprechenden Testständen einher. Die Teststände dienen zur direkten experimentellen Bestimmung der Triebwerkeigenschaften. Ein wichtiger Bestandteil dieser Anlagen ist die Mikro-Newton-Schubmesswaage. Diese Schubmesswaage ermöglicht die genaue Messung des vom Triebwerk erzeugten Schubes. Sie funktioniert dabei nach dem Pendelprinzip: Der vom Triebwerk erzeugte Schub lenkt ein Pendel aus. Bei bekannter Federkonstante des Pendels, die beschreibt wie viel Kraft für eine bestimmte Auslenkung des Pendels benötigt wird, kann mit Hilfe der gemessenen Auslenkung dann der Schub des Triebwerks direkt bestimmt werden.

Die Schubmesswaage ist in ABB. 1 gezeigt und wurde in Zusammenarbeit mit der Astrium GmbH in Friedrichshafen und der HTWG Konstanz entwickelt. Sie besteht aus zwei frei schwingenden Pendeln, an denen das zu untersuchende Triebwerk befestigt ist. Die Auslenkung des Pendels wird mit einem

hochauflösenden Laser-Interferometer gemessen und mit Hilfe eines elektrostatischen Kamms, ähnlich einem Kondensator, wird die Schubmesswaage kalibriert. Zur Messung wird der Teststand in einer Vakuumkammer positioniert. Dies ist notwendig, da die zu untersuchenden Triebwerke nur im Vakuum funktionieren und dort Bedingungen simuliert werden können, die einem Druck in 300 Kilometer Höhe – quasi dem erdnahen Orbit, auf dem sich beispielsweise auch die ISS befindet – entsprechen.

Ein typisches Messergebnis ist in ABB. 2 dargestellt. Das Diagramm zeigt den Triebwerksschub in Mikro-Newton (μN) aufgetragen über die Zeit in Sekunden (s). Es ist deutlich zu erkennen, wie der Schub zwischen $16 \mu\text{N}$ und $8 \mu\text{N}$ variiert.

Solche Testergebnisse erlauben es, Aussagen über das Verhalten und die Leistung des Triebwerks zu machen. Es lässt sich genau bestimmen, welche Betriebsparameter welchen Schub erzeugen und wie viel Energie und Treibstoff dafür benötigt werden. Die gewonnenen Informationen fließen direkt in die Weiterentwicklung der getesteten Triebwerke ein. •

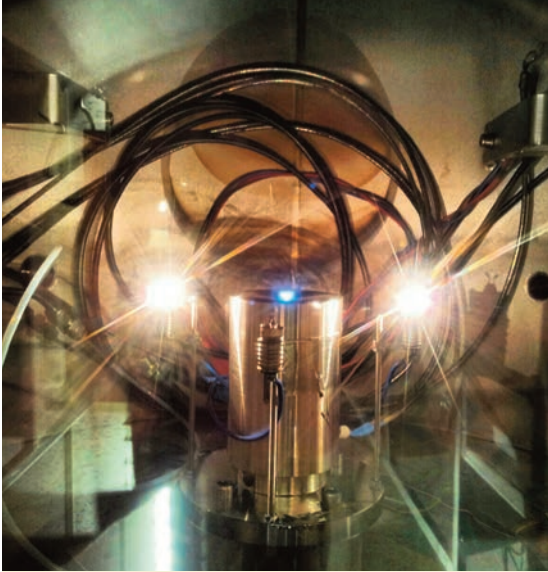


ABB. 1 Mikro-Newton HEMP Triebwerk im Betrieb in einer Vakuumkammer. Das zylindrische Triebwerk befindet sich in der Mitte des Bildes. Je nach Betriebsart werden bis zu drei Glühlampen (ohne Glaskörper) als Neutralisatoren eingesetzt, in der Abbildung sind zwei aktiv. Deutlich ist der blau leuchtende Xenon-Plasma-Strahl in der Bildmitte zu sehen, er bewirkt den Schub des Triebwerks.

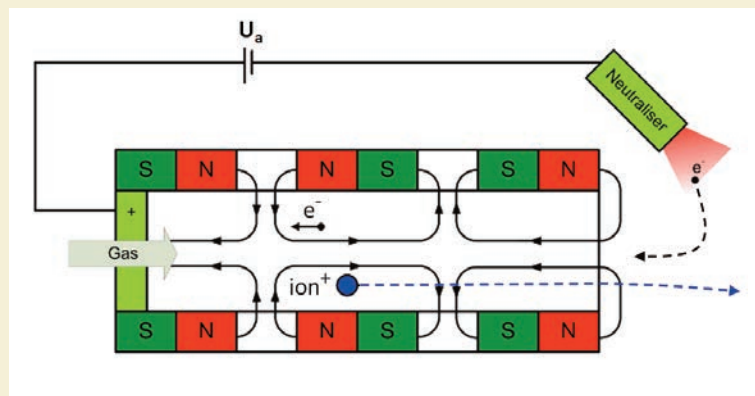


ABB. 2 Schematische Darstellung des Funktionsprinzips des HEMP Triebwerks. Von einem sogenannten Neutralisator oben rechts werden freie Elektronen (e^-) emittiert. Diese beschleunigen in Richtung der positiv geladenen Anode, die in grün auf der linken Seite abgebildet ist. Auf dem Weg zur Anode treffen sie auf Xenon Gas, welches an der Anode eingelassen wird, und ionisieren dieses. Die nun positiv geladenen Xenon Ionen werden durch das elektrische Feld von der Anode wegbeschleunigt und bewirken dadurch einen Schub. Die gegenpolig angeordneten Magneten bewirken, dass die Elektronen sich auf Kreisbahnen bewegen und somit ihr effektiver Weg zu Anode länger wird. Dadurch können sie mehr Xenon ionisieren und die Effizienz des Triebwerks wird erhöht. Zusätzlich werden die Wände des Triebwerks vor Verschleiß geschützt.

MIKRO-NEWTON TRIEBWERKE

Heutzutage werden immer häufiger Satellitenmissionen gestartet, bei denen mehrere Satelliten im Weltraum gekoppelt werden, um dann ein großes Messinstrument zu bilden. Eine hochgenaue Positionierung und Ausrichtung der Satelliten ist dabei der Schlüssel zum Erfolg und genau dafür sind Triebwerke mit sehr feinen Schubleistungen im Mikro-Newton-Schubbereich notwendig. Ein hierfür geeignetes Triebwerkskonzept ist das Hoch-Effiziente Mehr-Stufige Plasma-Triebwerk (HEMPT) von THALES Electron Devices. Dieses arbeitet bereits im Milli-Newton-Bereich und zeigt vielversprechende Eigenschaften in Bezug auf die Systemkomplexität und Lebensdauer sowie die Anwendungsmöglichkeit im Mikro-Newton-Bereich.

In ABB. 2 ist das Funktionsprinzip des HEMP-Triebwerks dargestellt. Ein sogenannter Neutralisator außerhalb des Triebwerks erzeugt freie Elektronen, die aufgrund ihrer negativen Ladung von einer Anode angezogen und stark beschleunigt werden. An der Anode selbst wird ein Gas eingelassen, in unserem Fall Xenon, welches die freien Elektronen auf ihrem Weg zur Anode ionisieren. Die dadurch entstehenden, positiv geladenen Ionen (Plasma) werden von der Anode elektrostatisch abgestoßen. Der sich bildende Ionenstrom löst durch seinen Rückstoß schließlich den Schub des Triebwerks aus. Ringförmige Permanentmagneten, die die

äußere Begrenzung des Triebwerks bilden, erzeugen ein Magnetfeld, das die Elektronen auf ihrem Weg zur Anode auf eine Kreisbahn zwingt. Dadurch können mehr Xenon Atome ionisiert werden und die Effizienz des Antriebs wird gesteigert. Zusätzlich bewirkt das Magnetfeld eine Abschirmung des Plasmas von der Kammerwand, was die Lebensdauer des Triebwerks verlängert, da ansonsten das Plasma an der Kammerwand reagieren und diese nach und nach zerstören würde; der Vorteil eines verschleißfreien Triebwerkes mit hohem Wirkungsgrad wäre dann nicht mehr gegeben.

Das Ziel der derzeit in Zusammenarbeit mit der Astrium GmbH in Friedrichshafen und der Universität Gießen durchgeführten Studie ist es herauszufinden, ob der Schub des HEMP-Triebwerks um den Faktor 1000 herunter skaliert werden kann, um einen Einsatz im Mikro-Newton-Bereich zu erreichen. Verschiedene Prototypen wurden bereits gebaut, getestet und charakterisiert. Theoretische Modelle sollen nun helfen, die gemessenen Daten besser zu verstehen und das Design weiterer Prototypen zu optimieren. Neben den reinen Leistungsmerkmalen spielen in der Entwicklung auch Systemaspekte wie Einfachheit, Robustheit und der entstehende Ressourcenbedarf eine wesentliche Rolle. •

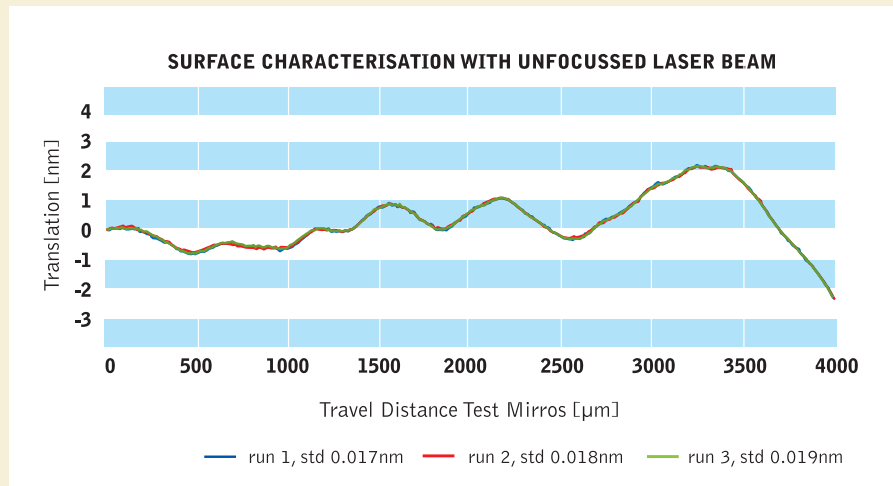


ABB. 1 Drei Messungen derselben Spiegeloberfläche mit einem unfokussierten Laserstrahl (Durchmesser 1,4 Millimeter). Der Spiegel wurde dabei über eine Distanz von 4 Millimeter verschoben und zeigt Rauigkeiten im Bereich von wenigen Nanometer. Die drei Messungen wurden nacheinander durchgeführt und zeigen eine hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse (std: standard deviation engl. für Standardabweichung).

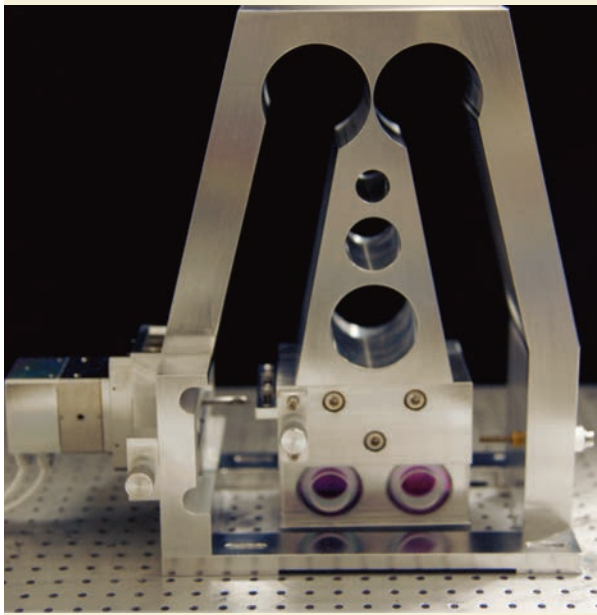


ABB. 2 Die zu untersuchenden Spiegel (Mess- und Referenzspiegel im unteren Teil des Bilds sichtbar) werden mit Hilfe des Pendels parallel zur Spiegeloberfläche verschoben. Das Pendel ist aus einem Stück gefertigt und hat einen seitlich begrenzten Auslenkbereich von wenigen Millimetern. Durch den speziellen Aufbau wird eine seitlich Verschiebung möglich ohne dass sich das Pendel verdreht oder nach vorne bzw. hinten ausgelenkt wird. Um das Pendel zu bewegen wird ein Piezoantrieb (links im Bild zu sehen) verwendet, der sehr genaue Positionierungen erlaubt.

HOCHGENAUE CHARAKTERISIERUNG VON SPIEGELOBERFLÄCHEN

In der modernen Messtechnik dringt man immer tiefer in Bereiche vor, in denen alltägliche Erfahrungswerte ihre Gültigkeit verlieren, weil neue Aspekte des vermeintlich Altbekanntes plötzlich sichtbar werden. Ein Beispiel dafür sind die Oberflächen von Spiegeln. Im Allgemeinen empfindet man Spiegeloberflächen als sehr glatt – dem ist jedoch nicht immer so. Selbst wenn gewöhnliche Haushaltsspiegel kein verzerrtes Spiegelbild darstellen, können minimalste Störungen durch Hügel oder Dellen vorhanden sein. Spiegel, wie sie in modernen Laboren zum Einsatz kommen, haben demgegenüber schon eine deutlich bessere Oberfläche und doch gibt es Experimente, bei denen diese Glattheit möglicherweise nicht ausreicht.

Um dies festzustellen, können die Oberflächen von Laborspiegeln mit Hilfe eines Laser-Interferometers (siehe Kapitel Laser-Interferometrie S. 67) hochgenau vermessen werden: Der Referenzlaserstrahl des Interferometers fällt zunächst auf einen Referenzspiegel und wird von dort (teils unfokussiert, um die Oberfläche auf Unebenheiten insgesamt abzutasten und teils fokussiert, um einzelne Strukturen auf der Oberfläche im Detail zu erfassen), auf den zu vermessenden Spiegel gelenkt. Dieser Spiegel ist wiederum an einem speziell konstruierten Pendel angebracht. Das Pendel ermöglicht es, den Spiegel seitlich in der Horizontalen zu verschieben ohne ihn nach vorne oder hinten zu bewegen, was unweigerlich zu Messfehlern führen würde, denn

relevant für die Messung ist die Länge der Wegstrecke des Laserstrahls. Im Experiment konnte festgestellt werden, dass die untersuchten Laborspiegel mit einem Durchmesser von rund 25 Millimeter Oberflächenstörungen im Bereich von einigen Nanometern (nm) aufweisen. Dies entspricht einer Rauheit von wenigen Millimetern, wenn der Spiegel auf die Größe Berlins skaliert würde.

Diese kleinen Störungen sind für sich betrachtet durchaus tolerierbar. Bedenkt man jedoch, dass in modernen optischen Experimenten oft hunderte solche Spiegel zum Einsatz kommen, so addieren sich diese Einzelfehler zu einem erheblichen Messfehler auf. Gegenstand der derzeitigen Forschung ist es daher, genau dies zu vermeiden: Zum einen kann durch die hochgenaue Charakterisierung von Spiegeloberflächen festgestellt werden, ob die verwendeten Spiegel den Anforderungen eines Experiments gerecht werden, oder ob exaktere Spiegel verwendet werden müssen. Zum anderen können exakt bestimmte Oberflächenstörungen auf Spiegeln bei erzielten Messdaten besser mit einkalkuliert werden – bislang werden diese Messfehler nämlich nur „grob“ abgeschätzt.

Dieses Projekt wird durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt gefördert (50 OQ 0701 „Untersuchungen zur Systemleistung alternativer Nutzlastkonzepte für LISA“) und entstand in Zusammenarbeit mit der HTWG Konstanz und der Astrium GmbH in Friedrichshafen. •



oben li., v.l.n.r.: Martin Gohlke, Thilo Schuldt, Johannes Stühler, Harald Kögel, Filippo Ales

oben re.: Prof. Dr. Claus Braxmaier

unten li., v.l.n.r.: Deborah Aguilera, Nele Vormschlag (Teamass.), Josep Sanjuan,
Ruven Spannagel, Rick Burow, Tim Brandt

unten re., v.l.n.r.: Norman Gürlebeck, Alexander Milke

Prof. Dr. Claus Braxmaier

ZARM Universität Bremen

DLR Institut für Raumfahrtssysteme in Bremen

claus.braxmaier@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57829

☎ +49 421 24420-1070 (DLR)

☎ +49 421 24420-1150

ZARM

Dr. Norman Gürlebeck

norman.guerlebeck@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57857

MSc. Alexander Milke

alexander.milke@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57829

Astrium Friedrichshafen

Dipl.-Ing. MEng. Harald Kögel

harald.koegel@astrium.eads.net

☎ +49 754 582792

MSc. Filippo Ales

fillipo.ales@astrium.eads.net

☎ +49 7545 8 2452

DLR Institut für Raumfahrtssysteme

Dr. Deborah N. Aguilera

deborah.aguilera@zarm.uni-bremen.de

deborah.aguilera@dlr.de

☎ +49 421 24420-1284

MSc. Tim Brandt

tim.brandt@zarm.uni-bremen.de

tim.brandt@dlr.de

☎ +49 421 24420-1282

Dipl.-Phys. Martin Gohlke

martin.gohlke@zarm.uni-bremen.de

martin.gohlke@dlr.de

☎ +49 7545 8-2718

Dr. Josep Sanjuan

sanjuan@zarm.uni-bremen.de

josep.sanjuan@dlr.de

☎ +49 421 24420-1277

☎ +49 421 218-57901 (ZARM)

Dr. Thilo Schuldt

thilo.schuldt@zarm.uni-bremen.de

thilo.schuldt@dlr.de

☎ +49 7531 206-379

MEng. Ruven Spannagel

ruven.spannagel@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 24420-1071

☎ +49 421 218-57901 (ZARM)

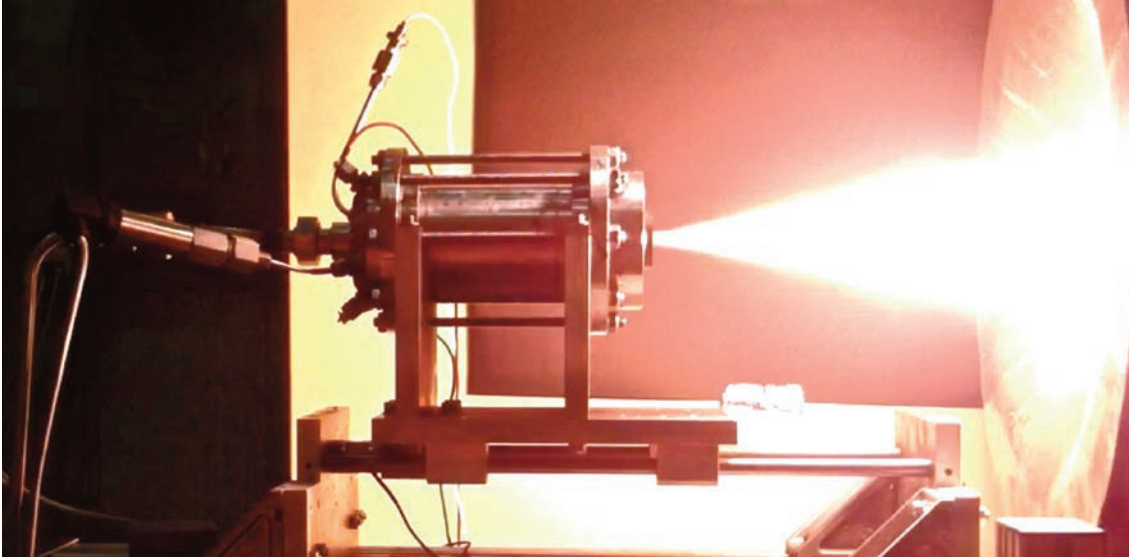


ABB. 1
Hybrid Triebwerk
mit Wachs und
Sauerstoff im
stationärem
Betrieb.

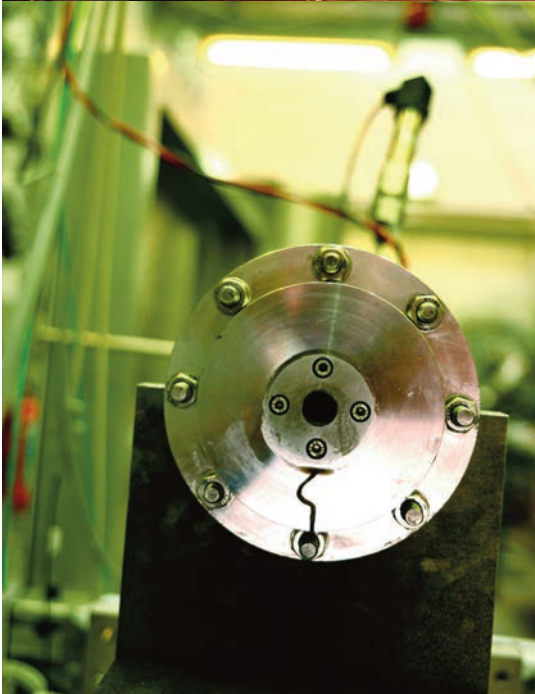


ABB. 2
Schubdüse des
Hybrid Triebwerks
aus Molybdän.

RAUMFAHRTANTRIEBE UND ENERGIESYSTEME

Die Abteilung Raumfahrtantriebe und Energiesysteme beschäftigt sich mit der Untersuchung von Grundlagen und Technologien chemischer Antriebe. Gemeint sind Antriebe, deren Schubkraft durch die Reaktion einer oder mehrerer Chemikalien miteinander erzeugt wird. Hierbei wird meist unterschieden zwischen monergolen Antrieben mit nur einer Treibstoffkomponente, welche mit Hilfe eines Katalysators zersetzt wird, und diergolen Antrieben, bei denen zwei Komponenten miteinander reagieren. Das Wissen und Know-how zu monergolen Antrieben basiert auf Erfahrungswerten aus den 1960er Jahren und muss daher als veraltet eingestuft werden. Für eine Weiterentwicklung diese Antriebstechnik fehlen heutzutage die Grundlagen entweder ganz oder sind über die Jahrzehnte in Vergessenheit geraten.

In der Arbeitsgruppe werden die Grundlagen von damals neu aufarbeitet und in moderne Verfahren übersetzt. Gleichzeitig sollen Lücken im Grundlagenwissen identifiziert und mit neuen Methoden, die vor Jahrzehnten noch nicht zur Verfügung standen, geschlossen werden. Außerdem sollen Al-

ternativen zu den bisher üblichen, aber hochgiftigen Treibstoffen dieser Antriebe gefunden werden.

Bei den diergolen Antrieben konzentriert sich die Arbeitsgruppe zurzeit besonders auf die Erforschung und technologische Umsetzung von Hybridantrieben. Hierbei ist die eine Komponente des Treibstoffes fest, während die andere flüssig oder gasförmig ist. Der Vorteil von Hybridantrieben besteht in ihrer guten Leistungskraft bei gleichzeitig relativ geringer Systemkomplexität und hoher Sicherheit. Sie sind daher besonders für die sich entwickelnde, privatwirtschaftliche Raumfahrt interessant, wo geringe Kosten und eine risikoarme Handhabung entscheidender sind, als das Erreichen eines absoluten Leistungsmaximums unter Verwendung eines deutlich komplexeren Systems.

In der Arbeitsgruppe wird zu diesen Themen sowohl Grundlagenforschung betrieben als auch die experimentelle Untersuchung technologischer Ansätze durchgeführt, um einen Beitrag zu einer zuverlässigen, sicheren und für jedermann zugänglichen Raumfahrt der Zukunft zu leisten. •



ABB. 1-3 Komponenten eines 2000 Newton Hybrid Triebwerks, das im Rahmen des DLR STERN Programms entwickelt wurde.



HYBRIDANTRIEBE

PROJEKT: STERN

Hybridantriebe in der Raumfahrt sind Raketentriebwerke mit zwei Komponenten. Der Brennstoff ist fest und bereits in die Brennkammer integriert, während der Oxidator flüssig oder gasförmig ist und sich im Tank befindet. Zwar gibt es Antriebe mit höherer Effizienz – Hybridantriebe liegen zwischen der Leistung von etwas schwächeren Feststoffraketen und etwas stärkeren Flüssigantrieben, der Vorteil dieser Antriebe ist jedoch, dass sie weniger komplex und in der Handhabung sehr viel weniger gefährlich sind. Außerdem ist eine Vielzahl von Treibstoffkombinationen – u.a. anderem auch Treibstoffe aus Biomasse – für ganz unterschiedliche Anwendungsgebiete möglich. Zudem sind Hybridantriebe universell einsetzbar, so zum Beispiel auch als Gasgeneratoren.

Der Nachteil von Hybridantrieben besteht bislang in der Regressionsrate, also dem Treibstoffabbrand, der vor allem in frühen Antriebsversionen eher niedrig ausfiel. Der Grund dafür liegt in der Art der Flamme, die auch Diffusionsflamme genannt wird. Dabei ist der Treibstoff nicht mit Sauerstoff vorgemischt, sondern muss zunächst von der Oberfläche verdampfen, um in den Bereich des durch die Brennkammer fließenden Sauerstoffs zu gelangen und eine Flamme zu bilden. Erst dann wird die Reaktion ausgelöst und die Verbrennung entsteht. Um trotz dieses mehrstufigen Prozesses genügend Schubkraft erzeugen zu können, sind Antriebe

dieser Art in ihren Abmessungen meist relativ groß, was den Einbau in eine passende Rakete erschweren kann. Ein Ansatz, den Abbrand zu verbessern, besteht in der Verwendung von Wachs als Treibstoff, bei dem durch Erhitzen eine flüssige, wellige Oberfläche mit einer „Gischt“ (also mit Tröpfchen) entsteht. Diese Tropfen erhöhen den Abtrag von Treibstoff deutlich gegenüber älteren Treibstoffen wie Gummi oder Plexiglas. Die dafür notwendigen neuen Methoden, Technologien und vor allem das Grundlagenwissen werden in der Arbeitsgruppe des ZARM erforscht.

Eng an die Inhalte der Arbeitsgruppe knüpft sich das STERN-Projekt (Studentische Experimental-Raketen) des DLR, welches junge Nachwuchskräfte für das Thema Raumtransport begeistern soll. Unter der Beteiligung internationaler Universitäten entwickeln studentische Teams hierbei eigene Raketen, die mindestens Schallgeschwindigkeit und eine Höhe von 3 Kilometer erreichen müssen und am Ende des Projekts tatsächlich gestartet werden. Am ZARM entwickeln Bremer Studierende die ZEPHyR (ZARM Experimental Hybrid Rocket), die mit einem komplett selbstkonzipierten Hybridantrieb fliegen wird. Dieser Antrieb wird nur mit Kerzenwachs und flüssigem Sauerstoff betrieben und hat einen Schub von fast 2000 Newton (200 Kilogramm). •

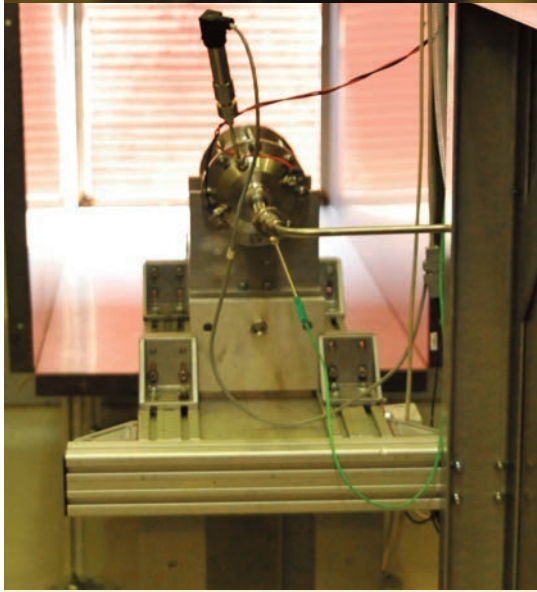
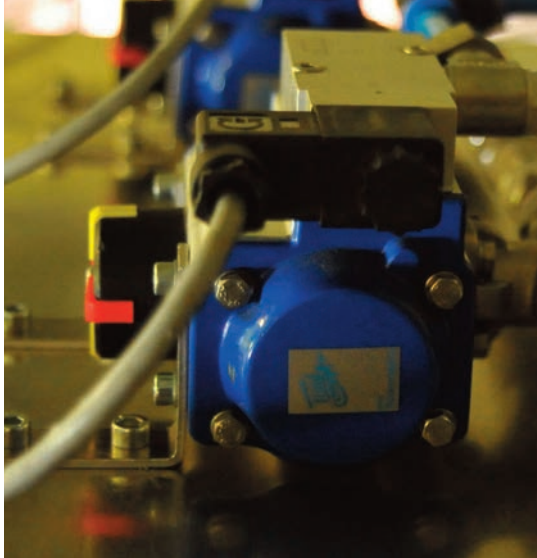


ABB. 1-3 Komponenten des Teststandes für Antriebe am ZARM



ANTRIEBE FÜR SATELLITENLAGEREGELUNG UND BAHNMANÖVER

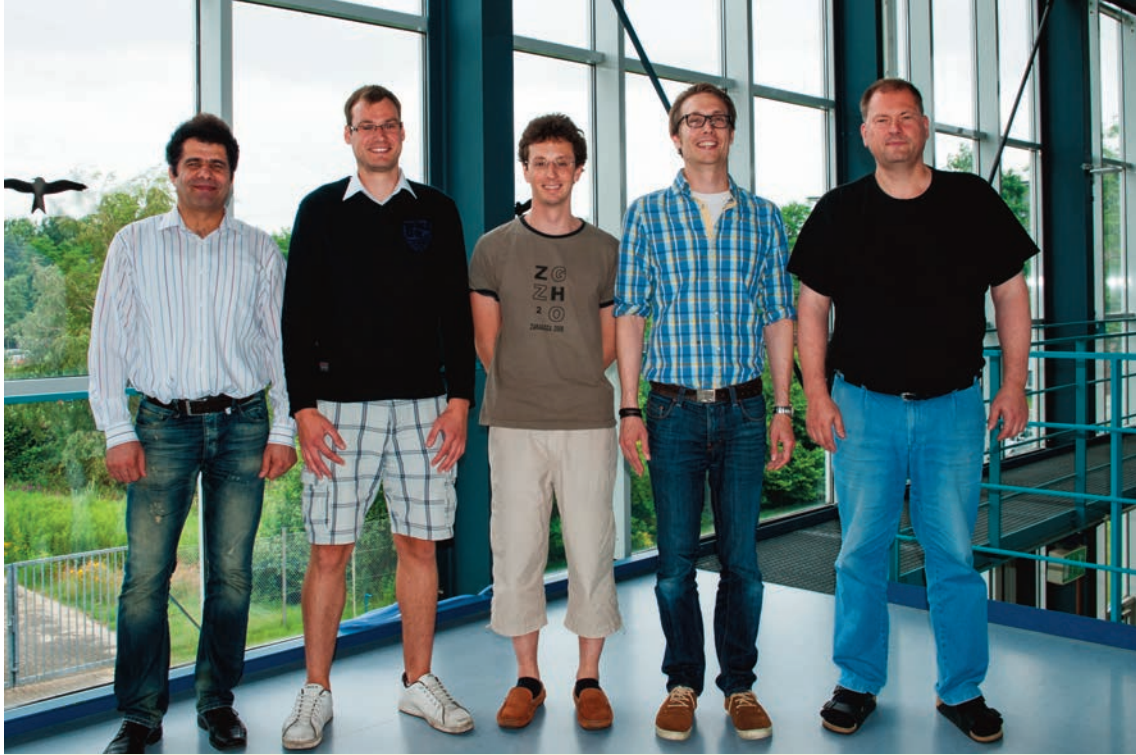
Jeder chemische Raumfahrantrieb zersetzt oder verbrennt eine oder mehrere chemische Komponenten; die dabei freigesetzte Energie erzeugt den Schub. Wird ein Treibstoff durch einen Katalysator zersetzt, so spricht man von einem monergolen Antrieb. Werden dagegen zwei Komponenten verwendet, die miteinander reagieren und verbrennen, spricht man von einem diergolen Antrieb. Diergole Antriebe sind das komplexere System, welches bei einer besseren Effizienz auch eine deutlich höhere Schubkraft erzeugen kann. Gleichzeitig sind sie etwas träger, was sie vor allem für Anwendungen mit einer längeren Brenndauer interessant macht. Bahnmanöver von Raumfahrzeugen, wo das Einschwenken von einem Orbit in den nächsten notwendig ist, sind solche Anwendungen.

Der Vorteil von monergolen Antrieben ist jedoch, dass sie kleiner und einfacher zu bauen sind und nur eine Treibstoffkomponente benötigen. Außerdem sind die Reaktionen in der Brennkammer aufgrund des Katalysators deutlich schneller, was z.B. für kurze Schubstöße von Relevanz ist. Daher wird diese Art von Antrieben häufig für die Lageregelung von Raumsonden und Satelliten genutzt. Beide Antriebsarten benötigen in ihrer klassischen Bauform einen zusätzlichen Hochdrucktank, um den Treibstoff

aus den Lagertanks in die Brennkammer zu treiben. Der Hochdrucktank bedeutet aber auch immer ein höheres Gewicht des Antriebssystems.

Im Projekt PulCheR soll nun ein Antriebskonzept entwickelt werden, bei dem ein Käfer als Vorbild dient. Der Bombardierkäfer besitzt eine Reaktionskammer – ähnlich einer Brennkammer –, in die er Chemikalien einleitet und mischt. Dabei erzeugt er heiße Gase, die er zur Verteidigung gegen Feinde pulsartig ausstößt. Ein Antrieb nach diesem Prinzip arbeitet somit ohne zusätzliche Hochdrucktanks, wodurch Masse eingespart werden kann.

Ein zweiter Ansatzpunkt für ein verbessertes Antriebskonzept ist im flüssigen Treibstoff selbst zu sehen. Das heutzutage meist verwendete Hydrazin ist zwar hochreaktiv aber auch hochgiftig, es gilt als krebserregend und umweltschädlich. Im Rahmen des PulCheR Projekts soll daher nach alternativen Treibstoffen gesucht werden. Diese Alternativen werden unter dem Begriff „green propellants“ zusammengefasst, da sie im Vergleich zum Hydrazin eine deutlich geringere Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen. Mögliche Optionen sind unter anderem in den Stoffen Wasserstoffperoxid und Lachgas zu sehen, das bereits erfolgreich als Oxidator in Hybridtriebwerken verwendet wird. •



v.l.n.r.: Sarbeland Yari, Stephan Schorbahn, Carlos Muñoz Moya, Peter Rickmers, Michael Peters

Dr.-Ing. Peter Rickmers

peter.rickmers@zarm.uni-bremen.de

+49 421 218-57872

+49 421 218-57872

MEng. Carlos Muñoz Moya

carlos.munoz-moya@zarm.uni-bremen.de

+49 421 218-57911

Michael Peters

michael.peters@zarm.uni-bremen.de

+49 421 218-57868

Students

- **BSc. Nicole Corus**
- **BSc. Malte Drinkewitz**
- **Cornelius Fabian Klemmer**
- **BSc. Fabian Orłowski**
- **Daniel Salden**
- **Kai Schilling**
- **Marvin Warner**
- **Johannes von Hasseln**
- **Stephan Schorbahn**
- **Sarbeland Yari**

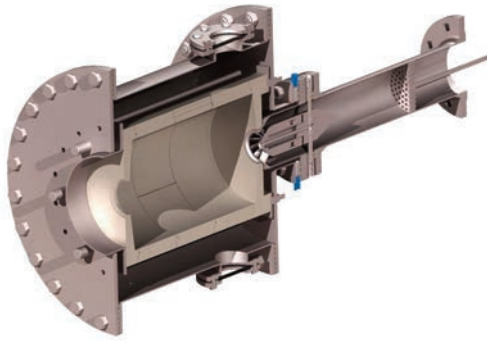


ABB. 1 Schnittansicht der Vormischbrennkammer mit keramischer Auskleidung. Die Brennkammer wird mit einem Propan / Luftgemisch aus einem pilotierten Drallbrenner betrieben.



ABB. 2 Neben der vergleichenden Untersuchung technischer Kraftstoffe werden Modellbrennstoffe für die Zünd- und Verbrennungssimulation experimentell bestimmt.

VERBRENNUNGSTECHNOLOGIEN IN DER LUFT- UND RAUMFAHRT

In Gasturbinen für Flugantriebe oder zur Stromerzeugung in Kraftwerken werden flüssige Treibstoffe verbrannt. Die effizienteste Methode mit den geringsten Emissionen an umweltschädlichen Stickoxiden, ist die Verbrennung im vorverdampften und vorgemischten Zustand. Zusätzlich dürfen die Temperaturen 1500 Grad Celsius (1600 Grad Celsius mit Abgas-Katalysator) nicht überschreiten. Das ist nur durch einen hohen Luftüberschuss, also sehr magere Verbrennung, zu erreichen, bei der ein Großteil der Luft der Kühlung des Prozesses dient.

Bei gasförmigen Brennstoffen wie Erdgas oder Biogas lässt sich dieser Zustand vergleichsweise leicht erreichen, da sowohl Brennstoff als auch Luft bereits gasförmig vorliegen. Ein flüssiger Treibstoff wie Kerosin muss als Brennstoffspray zunächst vollständig verdampfen bevor er gleichmäßig mit Luft gemischt werden kann.

Ein fein verteilter Brennstoff, der in verdichtete heiße Luft eingebracht wird, neigt jedoch zur Selbstzündung, bevor er völlig verdampft ist. Reicht die Zeit nicht für eine vollständige Verdampfung, fehlt sie allemal für die erst anschließend mögliche gleichmäßige Mischung mit Luft. Die Verbrennung erfolgt dann sehr heiß, mit hohen Stickoxid-Emissionen. Will man also ein Flugtriebwerk oder eine Kraftwerksturbine entwickeln, in der die nötigen Prozesse vor der Verbrennung vollständig ablaufen können,

muss man zunächst wissen, welche physikalischen und chemischen Prozesse zur Selbstzündung führen und wie man diese kontrollieren kann. Die Erforschung dieser Vorgänge um Einzeltropfen sowie die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen benachbarten Tropfen eines Sprays definieren einen Forschungsschwerpunkt der Arbeitsgruppe.

Zwei weitere Themengebiete knüpfen hier direkt an:

Selbst wenn die Gemischbildung für die stickoxidärmste Verbrennung gelungen ist, steht man vor dem nächsten Problem. Eine Flamme, die so mager ist, dass sie gerade noch brennt, ist sehr empfindlich gegen Störungen. Schon eine kleine Störung kann sich zu periodischen Schwingungen im Verbrennungsvorgang aufbauen, die die Integrität der Maschine gefährden oder zumindest zum Verlöschen der Flamme führen können. Die Arbeitsgruppe entwickelt eine passive Technologie zur Unterdrückung dieser Verbrennungsinstabilitäten.

Auf absehbare Zeit bleibt die Luftfahrt auf flüssige Treibstoffe angewiesen. Wir arbeiten an der Frage, durch welche Treibstoffe fossiles Kerosin oder Heizöl umweltverträglich ersetzt werden können. Die Arbeitsgruppe untersucht daher die Zündeneigenschaften von biosynthetischen Kraftstoffen und entwickelt vereinfachte Modellsubstanzen, mittels derer die Computersimulation der Gemischbildungs- und Zündprozesse möglich wird. •

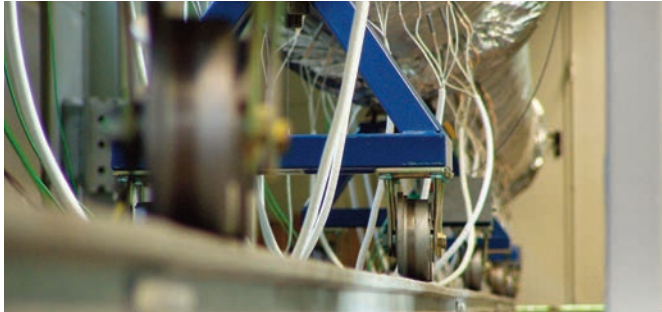


ABB. 1 Der heiße blow-down Windkanal zur Vermessung der Zündung technischer Sprays...

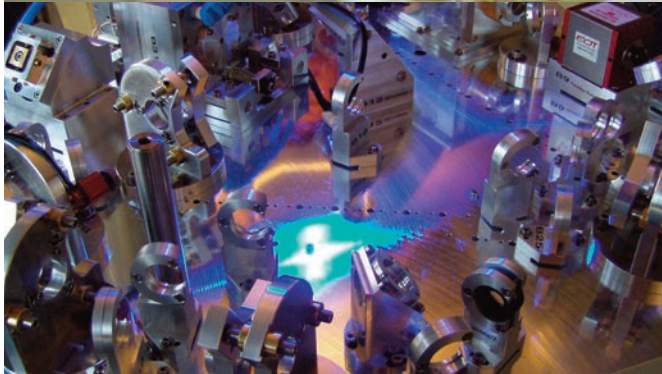


ABB. 2 ...und im Detail

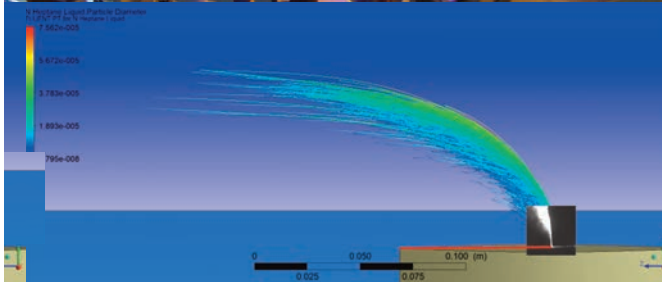


ABB. 3 Der gepulste Hochenergie-Scheibenlaser regt Formaldehyd-Moleküle zum Leuchten an. Damit ermöglicht er, die räumliche und zeitliche Entwicklung der Formaldehyd-Konzentration während der Zündung aufzunehmen – mit 1000 Bildern/Sekunde.

ABB. 4 Die Simulation liefert Informationen über Tropfenflugbahnen und Gemischbildung. Das Insert-Foto belegt die Korrektheit der Simulation.

DIE SPRAYZÜNDUNG – EIN KOMPLEXES PROBLEM

Seit 120 Jahren gibt es den Dieselmotor, Gasturbinen immerhin seit 80 Jahren. Bezüglich Zündung, Verbrennung und Schadstoffbildung ist praktisch alles bekannt – sollte man meinen. Doch das ist nicht der Fall. Wie der „Selbstzünder“ im Detail funktioniert, ist bis heute unbekannt. Genauso ist es bis heute nicht gelungen, dessen Zündzeitpunkt und die nachfolgende Druckentfaltung zu kontrollieren. Deshalb gehen Ingenieure den komplizierten Umweg, indem sie Zeiten und Mengen der Einspritzung mikrosekunden- und mikrolitergenau kontrollieren. Die eingespritzte Menge, soll unverzüglich zünden und brennen.

Bei einer Gasturbine strömt der Brennstoff zwar kontinuierlich mit einer dauernd brennenden Flamme, dennoch spielt auch hier die Selbstzündung eine wichtige Rolle: Die Gemischbildung, z.B. von Brennstoff und Luft, findet noch vor der Flamme statt. Sie ist beendet, ob abgeschlossen oder nicht, wenn das Gemisch die Flamme erreicht oder von selbst zündet. Für die Effizienz der Verbrennung und die Schadstoffbildung ist das Gemisch aber entscheidend.

Will man die Prozesse um ein Brennstoffspray in heißer Hochdruckumgebung beschreiben oder am Computer nachbilden, benötigt man genaue Kenntnisse der chemischen Reaktionskinetik. Kerosin

und Diesel bestehen aber jeweils aus rund 100 chemischen Komponenten und nur von etwa einem Zehntel ist der Ablauf bei der Reaktion mit Luft halbwegs bekannt. Um über Simulationen bessere Maschinen zu entwickeln, stehen wir also eher ganz am Anfang.

Seit rund 15 Jahren erforscht das ZARM im Fallturm die Zündung einzelner Brennstofftropfen, entwickelt einfache Modellbrennstoffe mit bekannter Reaktionschemie, simuliert die Versuche und verkompliziert dann weiter im Computer. Dort werden Tropfen-Tropfen-Wechselwirkungen und Wechselwirkungen zwischen Tropfen und turbulenter Luftströmung eingesetzt. So ist es Ende 2011 erstmals gelungen, die Selbstzündung eines Heptan-Sprays in heißer turbulenter Luftströmung so zu simulieren, dass die Ergebnisse mit realen Sprayzündversuchen im Heißgaskanal übereinstimmen.

Derzeit wird das numerische Modell durch Versuche im Fallturm zur Zweitropfen-Zündung weiter verfeinert. Eine speziell hierfür entwickelte Laserdiagnostik liefert zeitlich und räumlich hochauflösende Informationen über Zünd-Zwischenprodukte. Für 2015 planen wir zusammen mit japanischen Kollegen Versuche an bis zu neun Tropfen. Diese Versuche finden dann nicht mehr am Fallturm sondern auf einer Forschungsrakete statt. •

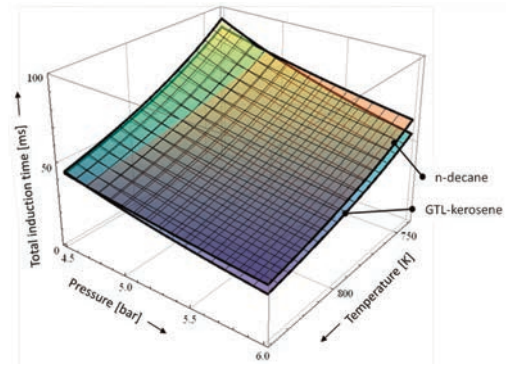
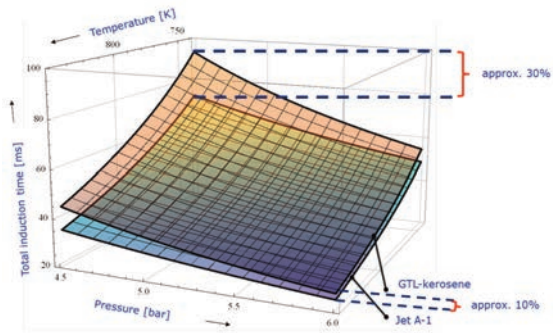


ABB. 2 Der Vergleich zwischen fossilem und einem Gas-to-Liquid-Kerosin zeigt die Unterschiede und das Potenzial. GTL-Kerosin erlaubt längere Vormischzeiten bis zu seiner Selbstentzündung.

ABB. 3 Das Paraffin n-Dekan ist dem Gas-to-Liquid-Kerosin bzgl. der Temperatur- und Druckabhängigkeit der Zündung sehr ähnlich.

ABB. 1 Die Fallkapsel zur Diagnostik der Tropfenzündung. Mit 750 Kilogramm und fast 4 Meter Länge das größte jemals am Fallturm abgeworfene Experiment.

SYNTHETISCHES KEROSIN, FOSSILES KEROSIN

– EIN VERGLEICH

Schon seit Mitte der 1920er Jahre ist die Fischer-Tropsch-Synthese bekannt, mit der Kerosin oder Diesel aus Biomasse, Kohle oder Erdgas synthetisch hergestellt werden können. Außer in den Zeiten des Energieembargos während des Zweiten Weltkriegs war die Herstellung von Kraftstoffen auf diesem Wege gegenüber dem billigen Rohöl aber nie konkurrenzfähig. Das ändert sich derzeit.

Besonders interessant ist der Weg über Biomasse, hat er doch als Einziger das Potenzial einer erheblichen CO₂-Reduzierung. Die Biotreibstoffe der sogenannten zweiten Generation stehen dabei nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelherstellung, denn es werden keine öl- oder zuckerhaltigen Früchte, sondern die Lignin enthaltenden holzigen Stängel und das Blattwerk verarbeitet.

Ob die Basis des synthetischen Treibstoffs fossil (Kohle, Erdgas) oder Biomasse ist, lässt sich an dem Produkt nur über die C¹⁴-Methode feststellen. D.h. die Produkte sind unabhängig vom Ausgangsmaterial identisch. Ein Vorteil der Synthese-Treibstoffe ist, dass sie sehr rein sind und vor allem keine rußbildenden aromatischen Kohlenwasserstoffe enthalten. Hierdurch sind sie allerdings auch anders als ihre fossilen Partner auf Rohölbasis und bestehende Maschinen können sie nicht ohne weiteres verwenden.

Am ZARM wurde zunächst in Versuchen am Heißwindkanal das Zündverhalten von Sprays aus fossilem Kerosin (JET A1) mit dem eines synthetischen Kerosins von Shell verglichen. Die Versuche ergaben, dass das synthetische Kerosin eine zwischen

10 und 30 Prozent längere Zünddauer aufweist. Dies liefert zusätzliche Zeit für Prozesse, die den Verbrennungsprozess optimieren können, etwa das Vorverdampfen oder die Bildung des Gemischs.

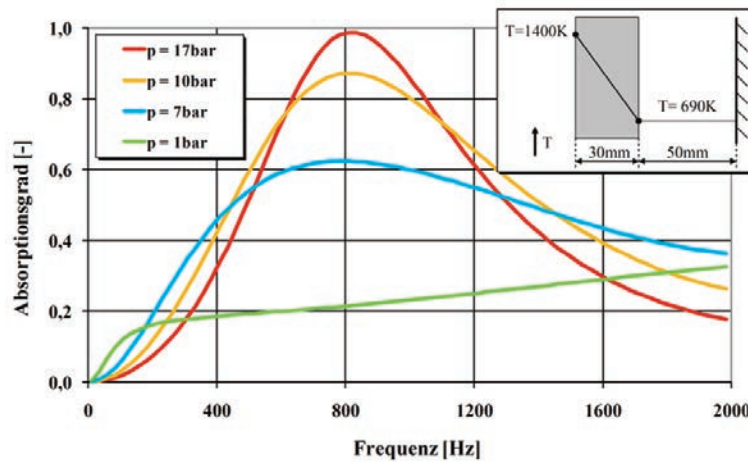
Auf der Suche nach einem Modellbrennstoff mit bekannten Komponenten, der dem sehr heterogenen Synthese-Kerosin nahekommt, wurden Hunderte von Versuchen an Einzeltropfen durchgeführt. Die meisten am Boden, die vielversprechendsten Kandidaten wurden dann auch im Fallturm in Schwerelosigkeit untersucht. Zunächst muss dabei ein Normal-Alkan gefunden werden, ein Kohlenwasserstoff mit einfacher C-Kette, dessen temperatur- und druckabhängiges Zündverhalten ähnlich dem des Vorbilds ist. Dann sucht man eine weitere Komponente, die die Ähnlichkeit zum Synthese-Kerosin verbessert und die auch im Vorbild enthalten ist. Darüber hinaus muss sie eine ähnliche Siedetemperatur und einen ähnlichen oder höheren Dampfdruck aufweisen. Nur so ist sichergestellt, dass diese Komponente auch gleichzeitig mit dem Alkan in der Gasphase vorhanden ist und sich nicht in der Flüssigphase aufkonzentriert.

Die Versuche haben ergeben, dass reines Normal-Dekan, ein Kohlenwasserstoff mit einer einfachen Kette aus zehn C-Atomen, ohne zusätzliche Komponenten, dem synthetischen Kerosin am nächsten kommt. Was für ein Glück – ist doch das Normal-Dekan einer der wenigen Stoffe, bei dem die chemischen Abläufe während der Verbrennung bereits bekannt und geprüft sind. Der Simulation steht also nichts mehr im Wege. •



ABB. 1 Eine dichte, schallreflektierende Hitzeschutzkachel (unten) und schalldämmende Keramiken oben. Links durch vulkanisches Perlit und rechts durch Styropor als Platzhalter hochporös gemacht.

ABB. 2 Die akustische Charakterisierung der Keramiken erfolgt bei Umgebungsdruck. Die Grafik zeigt, welche Absorptionseigenschaften bei hohen Temperaturen und hohem Brennkammerdruck zu erwarten sind. Dabei zeigt das Insert rechts das Temperaturszenario mit 690 Kelvin auf der „kalten“ Seite der Kachel und 1400 Kelvin auf der der Flamme zugewandten Seite. Mit steigendem Druck verlagert sich das Dämmverhalten von der grünen zur roten Kurve. Steigende Temperatur reduziert die Dämmung, steigender Druck erhöht sie. Allerdings verschiebt sich das Absorptions-Maximum zu höheren Frequenzen.



KONTROLLIERTE RAUMAKUSTIK – BEI 1.600 GRAD CELSIUS

Teppiche und Vorhänge, Tapeten und Polster dienen dazu, einen Raum akustisch zu dämmen. Reicht dies nicht, werden Absorberelemente an Wand oder Decke montiert, die Mineralfasermatten enthalten. Die Brennkammer einer Kraftwerks-Gasturbine ist hingegen „gefließt“. Hitzebeständige Keramikschalen schützen den metallischen Brennkammerträger vor der Hitze, die bis zu 1600 Grad Celsius betragen kann. Für eine einfache Schalldämmung sind die Voraussetzungen denkbar schlecht.

Dabei ist die Schalldämmung nicht erforderlich, um die Umwelt vor Lärm zu schützen, das kann man leicht außerhalb der Maschine machen. Im Zusammenspiel zwischen möglichen Schwingungsmoden der Brennkammer und Frequenzen aus der Verbrennung kann ein zunächst breitbandiges Rauschen in Resonanz geraten. Es entsteht ein diskreter Ton, der in der Flamme weiter verstärkt wird. Derartige verbrennungsinduzierte Instabilitäten können extreme Schalldrücke ausbilden, die im harmlosen Fall zum Verlöschen der Flamme, im schlimmsten Fall aber zur Beschädigung oder gar Zerstörung der Maschine führen.

Um dieses Problem anzugreifen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die anspruchsvollste Herangehensweise ist sicher, derartige Resonanzen vermeiden zu wollen. Man bedenke, dass die Maschine mit einer definierten Drehzahl rotiert, dass sie eine bestimmte Anzahl von Brennern hat, deren

Flammen ebenfalls rotieren und neue Frequenzen anbieten, dass die Luft aus einem rotierenden Verdichter mit einer endlichen Anzahl von Schaufeln kommt und in eine ebensolche Turbine abfließt. Hier wird eine große Zahl von wiederkehrenden Elementen angeboten, die in der Lage sind, Schwingungen zu erzeugen. Diese Anregungen gegenseitig zu verstimmen, ist nahezu unmöglich. Eine andere Möglichkeit besteht darin, Schwingungen bei der Verbrennung gezielt durch eine gegenphasige aktive Anregung zu dämpfen. Eine dritte Möglichkeit besteht in der Anordnung von Helmholtz-Resonatoren, die auf die Unterdrückung diskreter Frequenzen ausgelegt werden können.

Im DFG-Graduiertenkolleg PoreNet ist die Arbeitsgruppe einen vierten Weg gegangen, der darin besteht, die ohnehin vorhandenen aber schallharten Keramiken durch solche zu ersetzen, die im kritischen Frequenzbereich möglichst stark schallabsorbierend wirken. Hierdurch lässt sich zwar kein schalltoter Raum realisieren, aber die Keramiken können auf jeden Fall dazu beitragen, dass auch bei höheren Leistungen ein stabiler Betrieb möglich ist. In einem Brennkammerversuch konnte das resonante „Brummen“ erfolgreich verhindert werden. Innerhalb von fünf Jahren hat das Graduiertenkolleg PoreNet einen Entwicklungsstand erreicht, der eine Fortführung der Arbeiten als industrielles Verbundprojekt unter Federführung von SIEMENS erlaubt. •

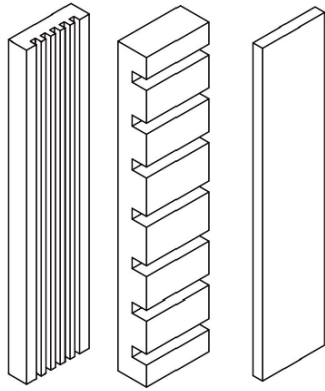


ABB. 1 Drei verschieden strukturierte Plexiglas-Proben wurden untersucht. Neben der ebenen des standardisierten Test eine horizontal genutete und eine vertikal genutete.

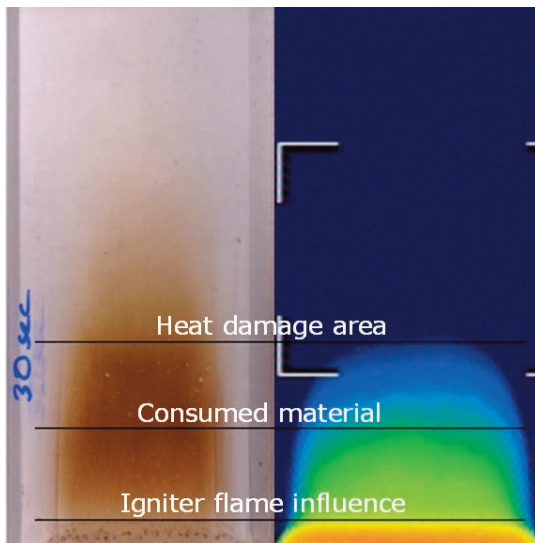


ABB. 2 Am Beispiel der ebenen Probe zeigt die Abbildung den Vergleich der sichtbaren Schädigung der Platte nach 30 Sekunden Brenndauer (links) und dessen Darstellung in der Infrarot-Aufnahme (rechts) sowie die verschiedenen Schädigungszonen.

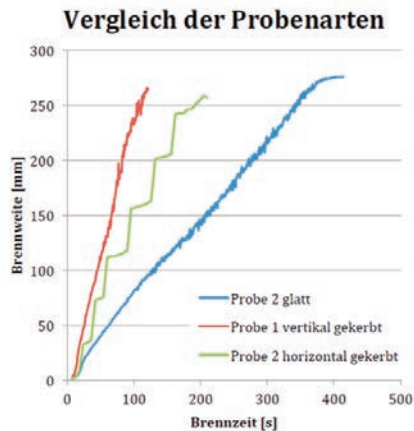


ABB. 3 Der Vergleich der Oberflächenstrukturen zeigt, dass die standardisierte ebene Platte nicht den „worst-case“, sondern im Gegenteil den „best-case“ darstellt. Die glatte Probe (blau) zeigt die geringste Flammenausbreitungsgeschwindigkeit, die vertikal genutete die höchste. Dies belegt, dass der derzeit angewandte Standard-Test ungeeignet ist.

FEUERSICHERHEIT IN DER BEMANNTEN RAUMFAHRT

Ein Brand auf einer Raumstation könnte schnell zu einer Katastrophe mit Verlust von Menschenleben und Investitionen führen. Die Feuerwehr kann nicht gerufen werden, Flucht ist nur bedingt möglich und die Brandbekämpfung in einer zwangsweise sehr verbauten und nicht entrauchbaren Umgebung ist äußerst schwierig. Daher müssen Materialien, die zum Bau gerade einer bemannten Raumstation verwendet werden, auf ihre Flammbarkeit geprüft werden. Solche Tests werden am Boden gemacht und damit unter anderen Bedingungen als im Einsatz im All. Dagegen ist soweit nichts einzuwenden, solange sichergestellt ist, dass Worst-Case-Bedingungen ebenfalls in die Untersuchung einbezogen werden. Versuche haben aber gezeigt, dass das nicht der Fall ist.

Im terrestrischen Standardtest werden senkrecht stehende, ebene Materialproben am unteren Ende angezündet. Die Probe besteht den Test, wenn die Flamme von selbst verlöscht, bevor sie 15 Zentimeter Höhe erreicht und keine brennenden Teile oder Tropfen herabfallen. Eigentlich ein simpler Test. Die Ausbreitung einer Flamme hängt hier von zwei Faktoren ab: dem Sauerstoffgehalt der umgebenden Luft und der Strömungsgeschwindigkeit entlang der Oberfläche. Bei normaler Sauerstoffkonzentration (21 Volumenprozent auf der Erde und auf der Raumstation) stellt sich ohne Zutun eine Strömung durch thermischen Auftrieb ein. Man könnte das Feuer zwar anblasen, um eine schnellere Strömung zu erhalten, eine niedrigere Strömungsgeschwindigkeit als die der Auftriebsströmung lässt sich aber nicht untersuchen.

In der Schwerelosigkeit einer Raumstation fehlt diese Auftriebskomponente. Ist deshalb die Strömungsgeschwindigkeit Null – so der Gedanke –, würde eine Probe, die den terrestrischen Test bestanden hat, in der Schwerelosigkeit auf jeden Fall verlöschen. Der Test entspräche damit der Worst-Case-Bedingung.

Keine Strömungsgeschwindigkeit ist aber in der Raumstation nicht gegeben. Sie würde den Astronauten gar nicht gut bekommen, da der Austausch verbrauchter Atemluft nicht gleichmäßig gewährleistet wäre. Deshalb sorgen Klimaanlage für einen Luftstrom innerhalb der Station. Diese Strömung ist zwar immer geringer als die Auftriebsgeschwindigkeit beim Brandtest, der Wert, bei dem eine brennende Materialprobe an Bord einer Raumstation aber auf jeden Fall verlöscht, bleibt aus dem Bodenversuch unbekannt.

Das ZARM hat sich in einem internationalen Team aus den USA, Russland, Japan, Frankreich, Dänemark und Großbritannien die Aufgabe gestellt, den Einfluss der Klimaanlage auf die Feuerausbreitung an Bord einer Raumstation zu testen. Darüber hinaus wird die Oberflächenstruktur des Materials in die Betrachtungen einbezogen. Bodenversuche haben bereits gezeigt, dass die ebene Platte nicht den Worst-Case, sondern vielmehr den Best-Case darstellt. An Bord des unbemannten Versorgungsschiffs CYGNUS soll daher in naher Zukunft während des Abstiegs, also nach dem Abdocken von der Raumstation, ein großes offenes Feuer entfacht werden, um die aus den Bodenversuchen entwickelten Modelle zu überprüfen. •

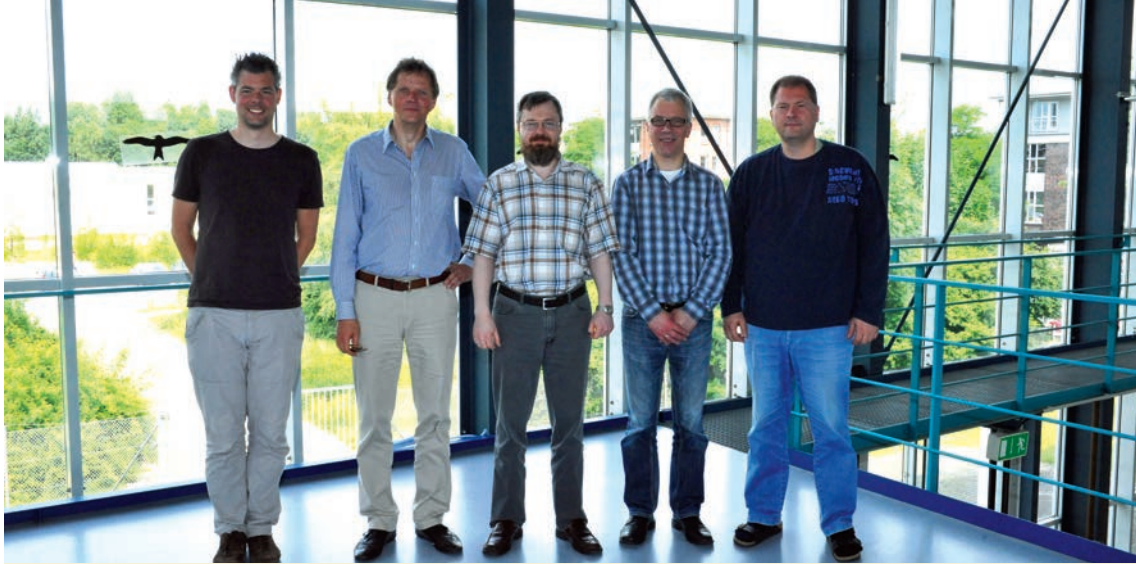


ABB. 1 v.l.n. r.: Hans-Christoph Ries, Christian Eigenbrod, Konstantin Klinkov, Günther Marks, Michael Peters

TEAMMITGLIEDER

Dipl.-Ing. Christian Eigenbrod

christian.eigenbrod@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57780

Dr. Konstantin Klinkov

konstantin.klinkov@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57878

Dipl.-Math. Hans-Christoph Ries

hans-christoph.ries@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57936

Dipl.-Ing. Günther Marks

guenther.marks@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57939

Dipl.-Ing. Michael Peters

michael.peters@zarm.uni-bremen.de

☎ +49 421 218-57868

Dr.-Ing. Frank Giese

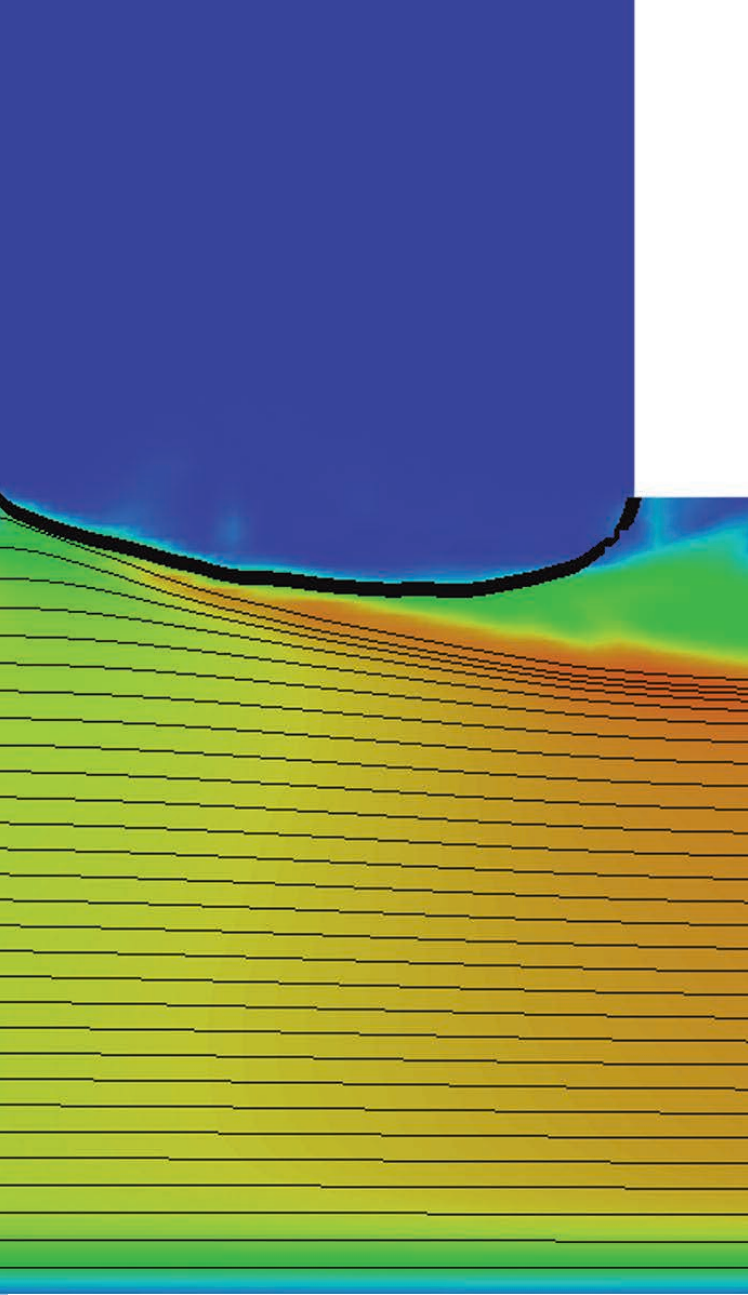
(jetzt: OHB-System AG Bremen)

Dr.-Ing. Manfredo Reimert

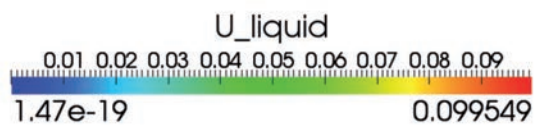
(jetzt: Capricornio Ltd.
Bogotá, Columbien)

Dr.-Ing. Peter Rickmers

(jetzt: Raumfahrtantriebe
und Energiesysteme)



$l = 20 \text{ mm}$
 $Q = 6.0 \text{ ml/s}$





ZAR

STRÖMUNGSMECHANIK

MEHRPHASENSTRÖMUNGEN

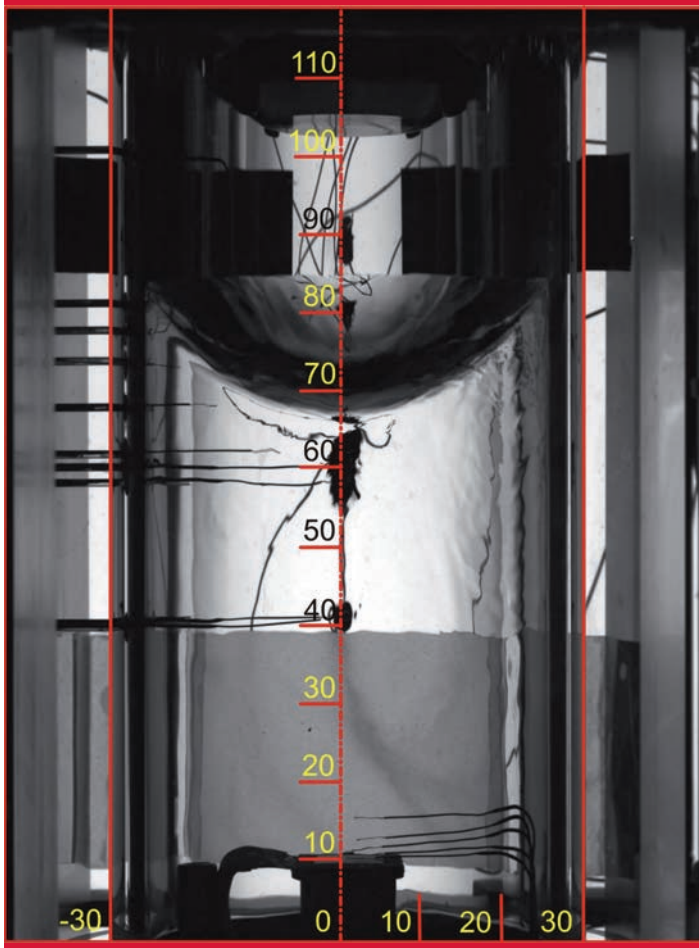


ABB. 1 Stark gekrümmte freie Oberfläche unter Schwerkraft in einem zylindrischen Behälter mit beheizten Wänden (SOURCE-2 Experiment auf Maser 12)

MEHRPHASENSTRÖMUNGEN

In der Arbeitsgruppe Strömungsmechanik und Mehrphasenströmungen werden strömungsmechanische Problemstellungen einschließlich des Wärme- und Stofftransportes betrachtet, bei denen freie Oberflächen eine Rolle spielen. Freie Oberflächen können unter Schwerelosigkeit eine Krümmung aufweisen, die den Druck im System bestimmt. Die Berechnung erfordert die Berücksichtigung der zweiten Ableitung der Oberflächenfunktion und ist somit mathematisch ein anspruchsvolles Randwertproblem. Zudem werden die Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationsfelder berechnet. Die Themen werden vom Labormaßstab auf reale Anwendungen in der Raumfahrt skaliert.

Weiterhin sind wir an variablen Beschleunigungen interessiert, die entweder Reaktionskräfte wie beim Schwappen hervorrufen oder die Schwerkraft kompensieren, wie beim freien Fall. Viele unserer Themen erfordern aufgrund des Bezugs zu Raumfahrtanwendungen kryogene Temperaturen von 4 Kelvin bis 120 Kelvin (-269 bis -153 Grad Celsius). Die Stoffeigenschaften ändern sich bei diesen Temperaturen sehr stark und Wärmeströme sind allgegenwärtig.

Die Arbeitsgruppe behandelt folgende Themen:

- Einsatz poröser Keramiken in der Raumfahrt für die Handhabung kryogener Flüssigkeiten (im Graduiertenkolleg 1860 MIMENIMA der Deutschen Forschungsgemeinschaft);
- Das ISS-Experiment CCF mit EU#1 (rechteckiger Kanal) und EU#2 (dreiecksförmiger Kanal) sowie Softwareentwicklung und dreidimensionale Modellierung (Teilprojekte des Vorhabens „Strömungen in offenen Kapillarkanälen“, gefördert durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR e.V.);
- Teilprojekte des Vorhabens „Spezielle Untersuchungen zur kryogenen Fluidhandhabung in Raketenoberstufen“ (gefördert durch das DLR e.V.):
 - Vorbereitung eines Raketenexperimentes mit flüssigem Wasserstoff
 - Freie Flüssigkeitsoberflächen mit nicht-isothermen Randbedingungen – Fallturmexperimente mit flüssigem Wasserstoff
 - Kapillarer Flüssigkeitstransport zwischen parallelen perforierten Platten
 - Freie Oberflächen unter Rotation und reduzierter Schwerkraft
 - Teilnahme am Projekt PREPARE: programme to enhance upper stage performance and reliability of future expendable launchers (in Zusammenarbeit mit EADS Astrium Space Transportation, Bremen);
 - Wärme- und Stoffübertragung bei der Bedrückung kryogener Tanks (in Zusammenarbeit mit dem DLR-Institut für Raumfahrtssysteme in Bremen).

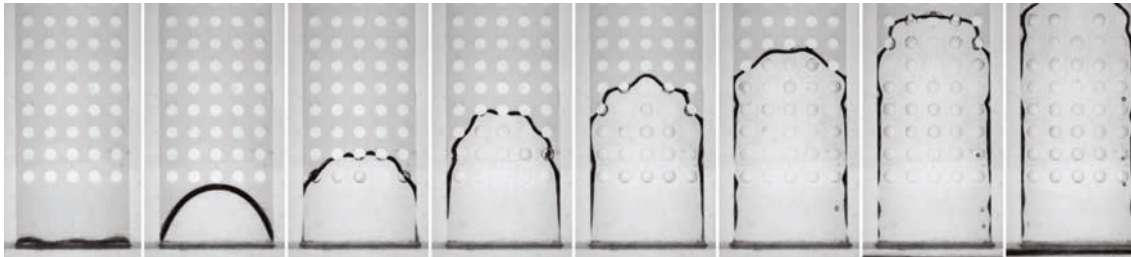
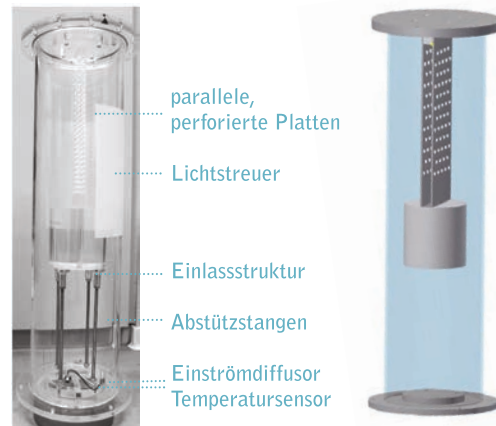


ABB. 1 Die Bildserie des unter Mikrogravitation durchgeführten Fallturmexperiments zeigt den Transport der Flüssigkeit zwischen zwei parallelen, perforierten Platten über einen Untersuchungszeitraum von vier Sekunden. Die Parameter der Testgeometrie betragen: Durchmesser der Hohlräume $d = 5$ mm, Abstand zwischen den Platten $a = 7,5$ mm, Breite der Platten $b = 45$ mm, Porosität $\phi = 0,25$, Anordnung der Hohlräume = serial.

ABB. 2 Die Skizze des Modells mit Testgeometrie und Kunststoffzylinder.

ABB. 3 Die vereinfachte Geometrie der Kapillarstruktur, wie sie für die numerischen Rechnungen verwendet wurde.



KAPILLARTRANSPORT ZWISCHEN PARALLELEN PERFORIERTEN PLATTEN

In der Schwerelosigkeit gibt es kein Oben und kein Unten. Eine Flüssigkeit sammelt sich also nicht automatisch am Boden des Behälters, sondern befindet sich irgendwo. Für die meisten Vorgänge an Bord von Raumsonden oder Raumstationen ist es aber notwendig, die exakte Position von Flüssigkeiten festlegen zu können. Dafür können Kapillarkräfte als treibende Kräfte genutzt werden. Das Projekt „Kapillartransport zwischen parallelen perforierten Platten unter Mikrogravitation“ untersucht dafür die Eigenschaften Flüssigkeit tragender Technologien unter geringer Beschleunigung oder Schwerelosigkeit. Es ist Bestandteil des Projektes „Kryogene Flüssigkeitshandhabung“. Auf Basis von Fallturmexperimenten wird der Einfluss von Perforationseigenschaften auf das kapillare Transportvermögen von Flüssigkeit zwischen parallelen Platten untersucht. Die erzielten Experimentdaten dienen dazu, eine Software für die numerische Simulation zu kalibrieren und in einem nächsten Schritt die Studie durch veränderte Simulationen zu erweitern. Ist der mathematische Zusammenhang zwischen den Eigenschaften der Perforationen und der Kapillarität erst entschlüsselt, können analytische Lösungen für einen optimalen Flüssigkeitstransport entwickelt werden.

Ein Verständnis der Funktionalitäten ist notwendig für die Entwicklung von perforierten Kapillarstrukturen unter Mikrogravitation. Das exakte Positionieren von Flüssigkeit ist bei geringen Beschleunigungen und ganz besonders in Schwerelosigkeit mit besonderen Herausforderungen verknüpft. Um Flüssigkeit exakt zu positionieren und für

weitere Vorgänge an einer bestimmten Stelle bereitzuhalten, können als treibende Kräfte Kapillarkräfte genutzt werden. Hierzu werden z.B. in Tanks Einbauten vorgesehen, die einen bestimmten Flüssigkeitsvorrat für eine Wiederzündung des Triebwerkes bereitstellen (Propellant Management Devices). Um eine möglichst schnelle Aufnahme der Flüssigkeit zu gewährleisten, sollten die treibenden kapillaren Kräfte möglichst hoch sein. Dem entgegen stehen eine möglichst geringe Masse der Einbauten und ein möglichst geringer Widerstand beim Durchströmen. Die Perforation solcher Einbauten stellt sich als eine Kompromisslösung dar, die wissenschaftlich bislang noch nicht näher untersucht wurde. Das Projekt dient daher dem Verständnis, wie sich die Eigenschaften der Perforationen auf die kapillare Transportfähigkeit und damit auf die Möglichkeit zur akkuraten und schnellen Positionierung von Flüssigkeitsmengen auswirken.

Anhand eines vereinfachten Modells wird der Kapillaranstieg zwischen parallelen perforierten Platten untersucht, da der kapillare Transport von Flüssigkeit zwischen parallelen Platten weitestgehend bekannt ist. Zur Untersuchung des Einflusses der Perforationseigenschaften werden verschiedene Porositäten, Perforationsdurchmesser, Plattenabstände, Plattendicken und Perforationsanordnungen analysiert. Es werden Transportlänge der Flüssigkeit und Füllverhalten der Perforationen gemessen, um die Ergebnisse mit bestehenden Kenntnissen zum kapillaren Transport von Flüssigkeiten abgleichen zu können. •

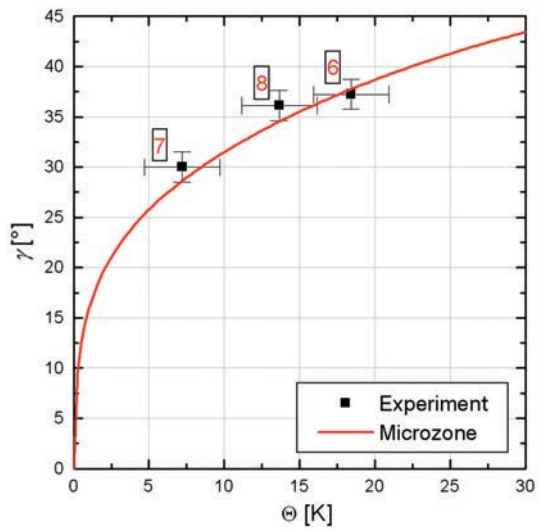
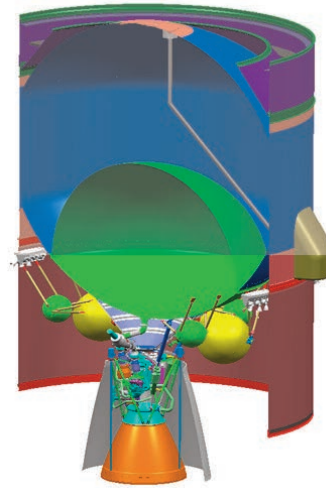
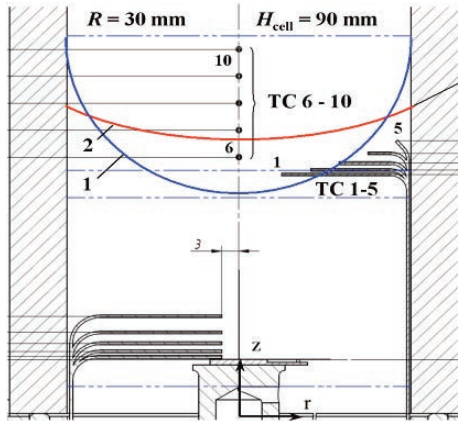


ABB. 1 Deformation der Flüssigkeitsoberfläche und Veränderung des Randwinkels

ABB. 2 Tanksystem einer Raketenoberstufe

ABB. 3 Korrelation von Randwinkel und charakteristischer Temperaturdifferenz für bestimmte Betriebspunkte des Experimentes SOURCE-II. Das Verhalten des Randwinkels lässt sich mit dem Mikrozonemodell beschreiben (siehe durchgezogene Linie).

DEFORMATION FREIER FLÜSSIGKEITSOBERFLÄCHEN

Im Rahmen der Neuentwicklung von Raketenoberstufen, die die Fähigkeit zur Mehrfachzündung haben sollen, sind mehrere kritische Aspekte bei der Treibstoffhandhabung während der Flugphase unter Schwerelosigkeit (ballistische Phase) identifiziert worden. Im Fokus steht das Verhalten der Oberfläche einer Flüssigkeit zu Beginn der Mikrogravitationsphase, wie auch ihre Veränderung unter der Wirkung eines Wärme- und Stoffaustauschs zwischen Tankwand und Flüssigkeit sowie zwischen Dampfphase und Flüssigkeit.

Während der angetriebenen Phase der Oberstufe wird die Flüssigkeitsoberfläche des Treibstoffs zunächst durch Schwappbewegungen beeinflusst, aufgrund der Beschleunigung ist sie in der Regel aber dennoch eben. Zugleich kann davon ausgegangen werden, dass der Flüssigkeitspegel durch die Beschleunigung nach unten gedrückt wird, so dass der Treibstoff nicht mit dem oberen Bereich des Tanks in Kontakt kommt. Dieser unterliegt oft äußeren Störfaktoren wie Solarstrahlung oder störende Wärmeströme der Triebwerke. Ein weiterer Wärmeaustausch kann durch die übereinander liegende Anordnung der kryogenen Flüssigkeitstanks entstehen, dort wo der Bereich des flüssigen Wasserstoffs, LH₂ mit ca. -253 Grad Celsius, auf den des flüssigen Sauerstoffs, LOX mit ca. -183 Grad Celsius, trifft. Beide Stoffe unterliegen zusätzlich unterschiedlichen Sättigungstemperaturen.

Daraus ergibt sich, dass die Temperatur der Tankwand meist höher ist als die der Flüssigkeit. Diese charakteristische Temperaturdifferenz hat

zur Folge, dass die Form der Flüssigkeitsoberfläche mit dem Ende der Beschleunigungsphase und dem Beginn der ballistischen Phase plötzlich einer starken Beeinflussung ausgesetzt ist, denn unter Mikrogravitation reorientiert sich die Flüssigkeit im Tank und gelangt nun auch in den oberen, erwärmten Tankwandbereich. Der Grad der Deformation der Flüssigkeitsoberfläche wird mit dem Randwinkel angegeben. Unter isothermen Bedingungen und der Verwendung einer ideal benetzenden Flüssigkeit stellt sich ein Randwinkel von ca. 0 Grad ein, die Flüssigkeit wandert dann bis weit in den erwärmten Bereich des Tanks (siehe blaue Linie in ABB. 2).

Im Experiment konnte nachgewiesen werden, dass bei nicht-isothermen Bedingungen, ein Ausbreiten der Flüssigkeit nach oben aufgrund der erhöhten Deformation und der Vergrößerung des Randwinkels nicht mehr möglich ist (siehe rote Linie in ABB. 2). Die charakteristische Temperaturdifferenz zwischen der Tankwand und der Flüssigkeit wirkt ähnlich einer Benetzungssperre, die das Vordringen der Flüssigkeit in den erwärmten Bereich verhindert. Es ist anzunehmen, dass dadurch auch die Verdampfung – aufgrund der Überhitzung der Flüssigkeit im Bereich der Kontaktlinie zur Tankwand – sich reduzieren lässt und ein unkontrollierter Druckanstieg im Tank verhindert werden kann.

Als Ergebnis des Experiments ist daher die Aussage zulässig, dass der Randwinkel γ und die charakteristische Temperaturdifferenz θ sich korrelieren lassen. Dargestellt in der unteren Abbildung sind die Messergebnisse von SOURCE-II. •

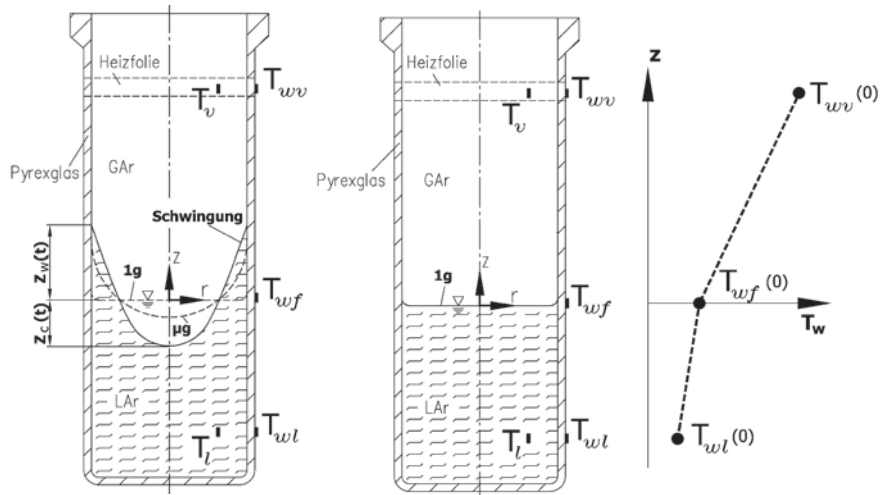


ABB. 1 Reorientierung einer freien Flüssigkeitsoberfläche in die neue Gleichgewichtslage unter Schwerelosigkeit (links), Temperaturverteilung vor der Reorientierung, die freie Oberfläche befindet sich auf Sättigungstemperatur, die Flüssigkeit ist unterkühlt und der Dampf ist überhitzt (rechts)

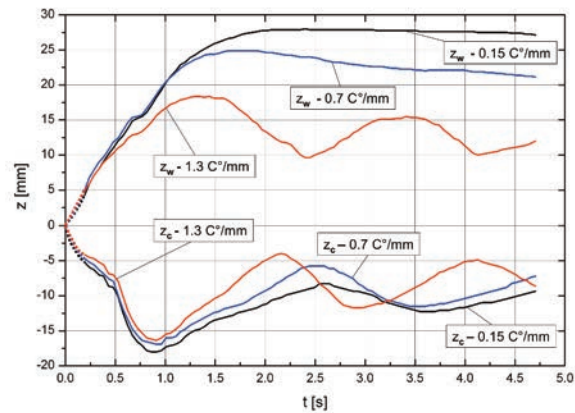


ABB. 2 Zeitlicher Verlauf der charakteristischen Punkte der Schwingung, im oberen Teil des Bildes die Kontaktlinie der Flüssigkeit mit der Wand, im unteren Teil der Mittelpunkt der Flüssigkeitsoberfläche

FALLTURMEXPERIMENTE MIT KRYOGENEN FLÜSSIGKEITEN

Weltraumraketen bestehen aus mehreren Stufen, die nach und nach oder gemeinsam für den Schub sorgen und nach dem Erlöschen abgeworfen werden. Zuletzt fliegt nur noch die übrig gebliebene Raketenoberstufe mit der Nutzlast. Nach dem Abschalten auch ihrer Triebwerke im Orbit werden im Tanksystem die Kapillarkräfte dominant. Sie bewirken, dass der tiefkalte Treibstoff entlang der wärmeren Tankwand aufsteigt. Die Arbeitsgruppe untersucht dieses Verhalten von kryogenen (bis zu -250 Grad Celsius kalten) Flüssigkeiten unter reduzierter Schwerkraft. Sie will die Wirkung thermaler Einflüsse aus der Umgebung – in diesem Falle von der wärmeren Tankwand – auf die Schwingungen der Flüssigkeitsoberfläche quantifizieren.

Die im Experiment eingesetzten, kryogenen Flüssigkeiten ähneln den real verwendeten Treibstoffen in ihren fluid-dynamischen Eigenschaften maximal und sind ebenso vollbenetzend. Beim Übergang der Testzelle in die Mikrogravitation (μg) entstehen Schwingungen auf der Oberfläche der Flüssigkeiten (siehe ABB. 1 links). Die relativ warme Tankwand führt aber zu einer Verdampfung und damit zu einem größeren Randwinkel. Die Flüssigkeit kann weniger hoch in der Testzelle ansteigen.

Bisher sind Fallturmexperimente mit flüssigem Argon (Siedepunkt $-185,8$ Grad Celsius) und flüssigem Methan (Siedepunkt $-161,5$ Grad Celsius) in einem teilgefüllten Zylinder aus Pyrexglas erfolgt. Eine Heizfolie am oberen Ende des Zylinders sorgt für einen linearen Temperaturgradienten entlang der Wand, der definiert zwischen $0,15$ Grad Celsius pro mm und $2,9$ Grad Celsius pro Millimeter variiert. Während des freien Falls nimmt eine Hochgeschwindigkeitskamera die Schwingungen an der Oberfläche der Flüssigkeit auf, Sensoren messen Temperatur und Druck im System.

Mit einem steileren Temperaturgradienten ändert sich die Art der Schwingung an der Flüssigkeitsoberfläche und erhöht sich ihre maximale Auslenkung (siehe ABB. 2). Der zeitliche Verlauf des Dampfdrucks entspricht der Bewegung der Benetzungslinie, die die Steighöhe der Flüssigkeit an der Behälterwand beschreibt. Damit lassen die Ergebnisse die Annahme zu, dass eine Abhängigkeit zwischen der Bewegung der Benetzungslinie, dem Dampfdruck und dem Benetzungswinkel besteht. Für die Handhabung kryogener Treibstoffe unter Schwerelosigkeit sind diese Ergebnisse von besonderer Bedeutung, da Treibstoffvorräte beim Übergang in die Schwerelosigkeit einen unkontrollierten Druckanstieg erzeugen können. •

ABB. 1 Der zeitliche Verlauf (t = fortlaufende Zeit von links nach rechts) einer kollabierenden Flüssigkeitsoberfläche im CCF Experiment. Verwendet wurde hier ein Kapillarkanal, der aus zwei parallel angeordneten Glasplatten besteht, die zur linken Seite eine Öffnung haben.

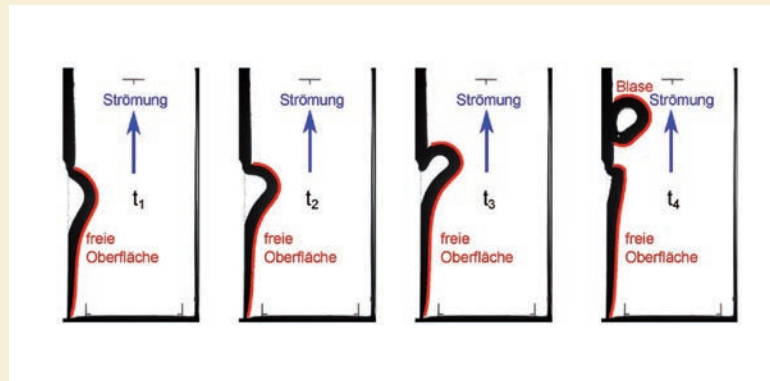


ABB. 2 Commander Scott Kelly installiert das CCF Experiment in die dafür vorgesehene Laboreinheit „Microgravity Science Glovebox“ auf der ISS (Quelle: NASA)



DAS CCF EXPERIMENT AUF DER INTERNATIONALEN RAUMSTATION ISS

CCF (Capillary Channel Flow) ist ein Experiment, das sich zurzeit auf der internationalen Raumstation ISS befindet. Dort wird das Strömungsverhalten von Flüssigkeiten in Transportkanälen mit teilweise freien Oberflächen unter Schwerelosigkeit erforscht. Unter Mikrogravitation treten strömungsmechanische Vorgänge im Vergleich zu den Bedingungen auf der Erde stark verändert auf. Flüssigkeiten sammeln sich nicht automatisch am Boden eines Behälters und auch Transportkanäle müssen anders beschaffen sein, um Flüssigkeiten in Raumfahrzeugen kontrolliert handhaben zu können. Der Einsatz von Kapillarkanälen nutzt die Adhäsions- und Kohäsionskräfte von Flüssigkeiten, um deren Transport ohne aktive Komponenten wie Pumpen oder Ventile zu erreichen.

Im Jahr 2011 haben Wissenschaftler am ZARM und an der Portland State University in den USA 100 Tage lang das CCF-Experiment auf der ISS in Echtzeit von ihren jeweiligen Bodenstationen aus gesteuert. Dabei wurden verschiedene Parameter wie zum Beispiel der Volumenstrom und die Länge der offenen Messstrecke verändert. Aus den gesammelten Daten soll nun der maximale Volumenstrom bestimmt werden, bei dem die Flüssig-

keitsströmung stabil bleibt und eben nicht an der freien Oberfläche einbricht oder kollabiert, sodass Gasbläschen in den Flüssigkeitsstrom eindringen – eine Störung, die auch als „Choking“ bezeichnet wird (siehe ABB. 1). Die Ergebnisse des CCF-Experiments haben schon jetzt zeigen können, dass solche offenen Kapillarkanäle durch geschicktes geometrisches Design auch umgekehrt dazu verwendet werden können, Gas passiv aus einer strömenden Flüssigkeit zu trennen.

Zur Gewinnung von Daten ist der Versuchsaufbau (siehe ABB. 2) mit zahlreichen Sensoren und einer Hochgeschwindigkeitskamera ausgerüstet. Eine weitere Versuchsreihe ist für die nahe Zukunft geplant. Generell stellen die Experimentergebnisse eine wertvolle Datenbank für fluidmechanische Vorgänge in kompensierter Schwerkraft dar. Diese können verwendet werden, um grundlegende mathematische Modelle und darauf basierende Computersimulationen zu validieren, die beispielsweise dann für die Berechnung von Strömungskanälen mit unterschiedlichster Geometrie zur Verfügung stehen. Aufwendige, kostenintensive und langwierige Experimentkampagnen könnten so zukünftig umgangen werden. •

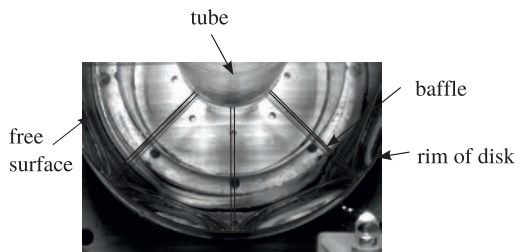
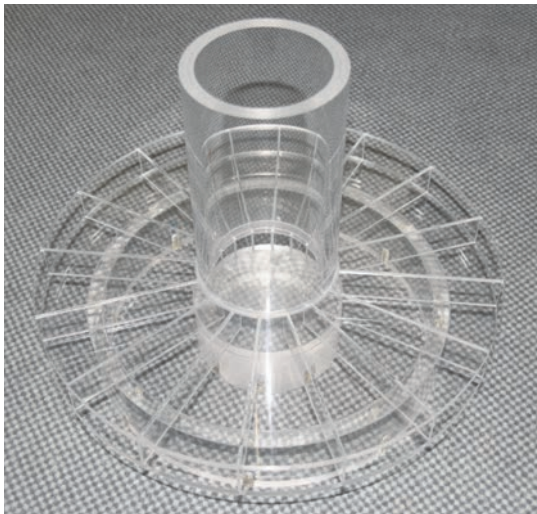
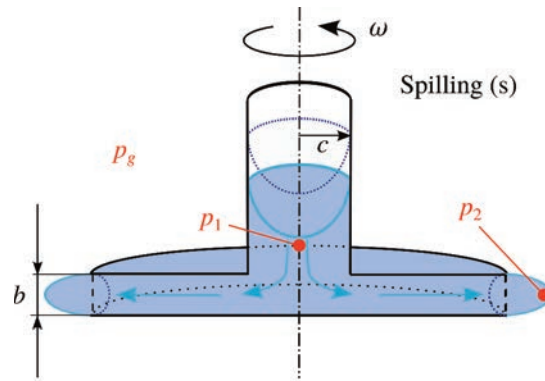
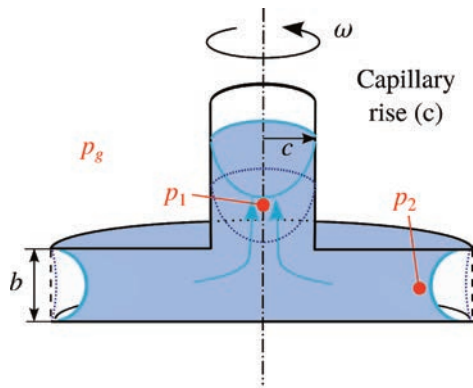


ABB. 2 UND 3 Die Abbildungen zeigen das Modell im Querschnitt. Zu sehen sind die Instabilitäten „capillary rise“ und „spilling“. Die gestrichelten Linien markieren jeweils die Ausgangskonfiguration der Flüssigkeit. Die Parameter p_1 und p_2 repräsentieren die Drücke in der Flüssigkeit und der Umgebungsdruck ist als p_g bezeichnet.

ABB. 1 Vereinfachtes Untersuchungsmodell eines PMD

ABB. 4 Fallturmversuch mit einem mit einem Modell ohne Rotation. Die geometrischen Parameter des Modells betragen: $n = 8$, $b = 0,3$ und $c = 0,25$

STABILITÄTEN FREIER FLÜSSIGKEITSOBERFLÄCHEN BEI ROTATION

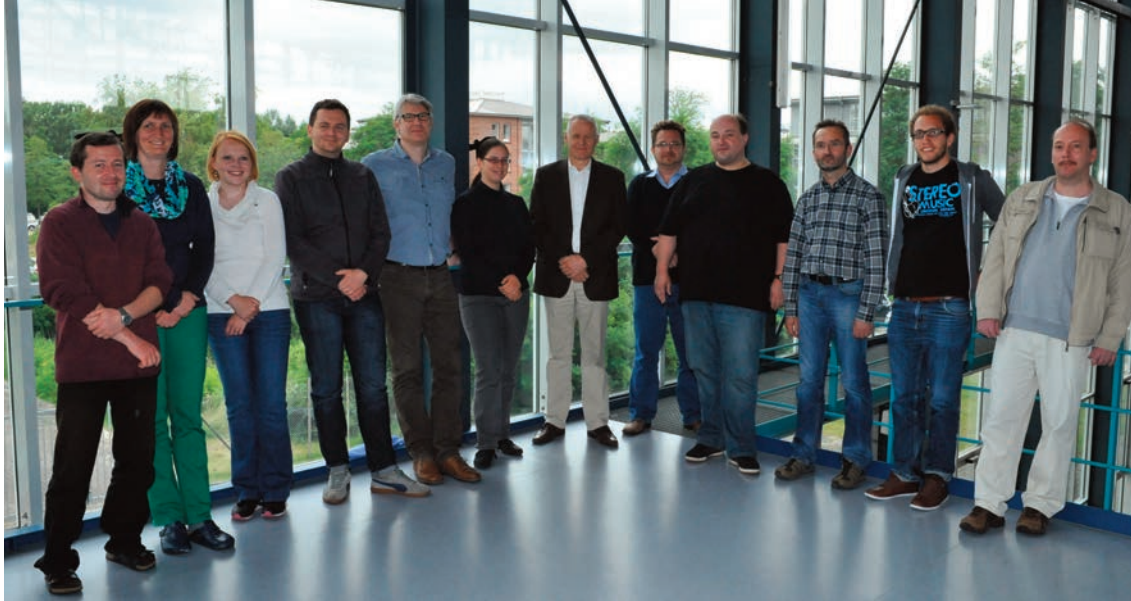
Raketenoberstufen werden derzeit mit flüssigen Treibstoffen betrieben und sollen in Zukunft die Fähigkeit zur Wiederzündung haben. Im Fokus des Projekts steht die Problematik der Flüssigkeits-handhabung bei Rotation. Bei Oberstufen ist dies der Fall, wenn sich diese im Weltraum langsam in eine Drehbewegung begeben. Die Zentrifugalkräfte treiben den Treibstoff an die Wand des Tanks und weg vom Auslass, durch den er eigentlich in die Brennkammer geführt werden soll, was zum Ausfall des Triebwerks führen kann.

Spezielle Einbauteile und Versorgungskanäle im Tank (Propellant Management Devices, PMD) können den Treibstoff stabil gegen Störbeschleunigungen über dem Auslass positionieren und die Treibstoffversorgung sicherstellen. Anhand vereinfachter Modelle eines PMD will die Arbeitsgruppe herausfinden, ab wann die Rotation ein Heraustreiben der Flüssigkeit aus dem PMD verursacht und sich keine stabile Form der Grenzfläche zwischen Gas und Flüssigkeit mehr ausbilden kann. Bereits am Computer durchgeführte Simulationen sollen durch Ergebnisse von Experimenten im Fallturm gestützt werden.

Die Modelle bestehen aus zwei parallel angeordneten Scheiben, die in Segmente unterteilt sind. Die obere Scheibe hat zusätzlich ein zentral angeordnetes Rohr (siehe ABB. 1). Die einzelnen Modelle unterscheiden sich dabei in ihrer Geometrie: Anzahl der Segmente, Abstand zwischen den Scheiben und der Radius des Rohrs. Die verwendete Testflüssigkeit ist ein inkompressibles, vollständig benetzendes Fluid.

Bei einer moderaten Rotation von ca. fünf RPM stellt sich eine stabile Form der Grenzflächen am äußeren Rand der Segmente ein. Bei schnelleren Drehungen tritt die Flüssigkeit zwischen den parallelen Scheiben aus, die Oberfläche der Flüssigkeit wird instabil (spilling, siehe ABB. 2). Bei geringerer oder keiner Rotation steigt die Flüssigkeit im Rohr auf und zieht sich in die Segmente zurück (capillary rise, siehe ABB. 3). Beeinflusst wird diese Wirkung vom Abstand zwischen den Scheiben und vom Radius des Rohrs.

Bei der Entwicklung von PMDs für zukünftige Raketenoberstufen können diese Ergebnisse berücksichtigt werden, um den Treibstoff in ausreichender Menge am Auslass eines Tanks zu platzieren und eine Wiederzündung sicherzustellen. •





v.l.n.r.: Michael Conrath, Stephanie Dackow, Yvonne Reichel, Przemyslaw Max Bronowicki, Ronald Mairose, Diana Gaulke, Michael Dreyer, Nikolai Kulev, Helmuth Behrens, Peter Prengel, Sebastian Schmitt, Eckart Fuhrmann

TEAM STRÖMUNGSMECHANIK

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Dreyer


michael.dreyer@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57866

 +49 421 218-9857866


M. Sc. Helmuth Behrens

helmuth.behrens@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57908


Dipl.-Ing. Przemyslaw Max Bronowicki

max.bronowicki@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57856


M. Sc. Peter Canfield

peter.canfield@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57855


Dr.- Ing. Michael Conrath

michael.conrath@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57859


Stephanie Dackow

stephanie.dackow@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57852


Dipl.- Ing. Holger Faust

holger.faust@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57867


Dipl.-Ing. Eckart Fuhrmann

eckart.fuhrmann@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57842


Dipl.-Ing. Diana Gaulke

diana.gaulke@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57863


M. Sc. Yulia Grebenyuk

yulia.grebenyuk@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57908


Dipl.-Phys. Nikolai Kulev

nikolai.kulev@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57843


Dipl.-Ing. Carina Ludwig

carina.ludwig@dlr.de

 +49 421 24420-1175


Dipl.-Ing. Ronald Mairose

ronald.mairose@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57875


Dipl.-Ing. Peter Prengel

peter.pregel@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57870


Dipl.-Ing. Yvonne Reichel

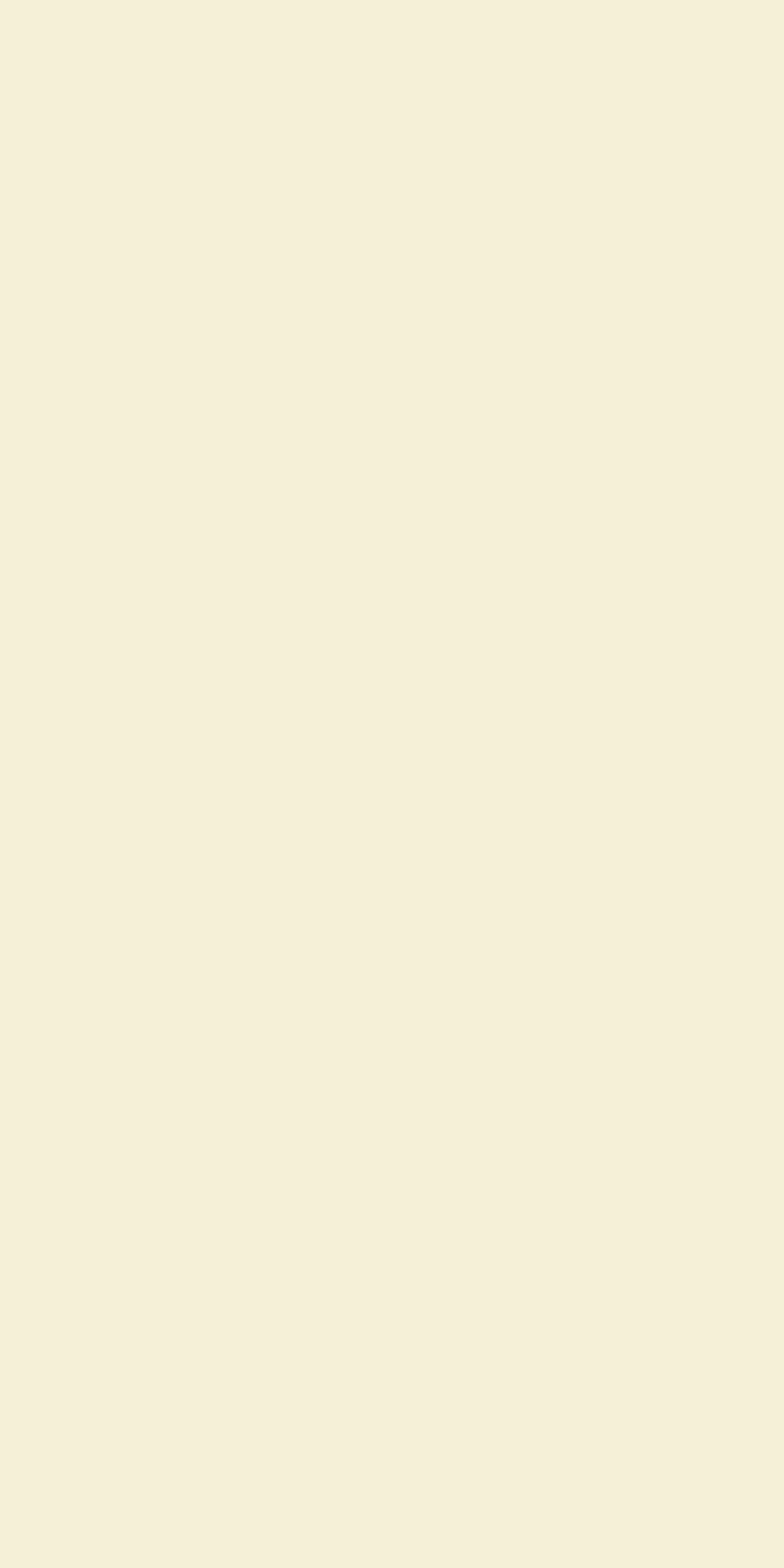
yvonne.reichel@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57864

Dipl.-Ing. Sebastian Schmitt

sebastian.schmitt@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57948





ZARM

ZARM FAB

FALLTURM-

BETRIEBSGESELLSCHAFT MBH



FALLTURM BREMEN

Millionen von kleinen Polystyrol-Kugeln fliegen durch den Raum. Innerhalb von Sekundenbruchteilen bremsen diese weißen Kugeln, die nicht größer als ein Streichholzkopf sind, die Fallkapsel sanft von 167 auf 0 Kilometer pro Stunde ab – so sanft, dass selbst ein Reagenzglas unversehrt bleiben würde. Nach wenigen Sekunden ist der Versuch unter Schwerelosigkeit beendet. Seit 1990 wiederholt sich diese Szene bis zu fünfzehnmal in der Woche im 146 Meter hohen Fallturm Bremen. Das in Europa einzigartige Großlabor ist damit eine kostengünstige Variante zur Forschung unter Weltraumbedingungen.

Das Prinzip ist dabei denkbar einfach: Alle Gegenstände, die im Vakuum frei fallen, sind unmittelbar schwerelos. So auch die Fallkapsel in der sich das Experiment befindet. In einem einfachen Freifallexperiment wird diese 500 Kilogramm schwere Kapsel von der Spitze der evakuierten Fallröhre fallen gelassen und landet nach 4,74 Sekunden im Abbremsbehälter des Fallturmes.

Seit Dezember 2004 ist das im ZARM entwickelte und weltweit einzigartige Katapultsystem in Betrieb, mit dem sich die Versuchszeit auf 9,3 Sekunden nahezu verdoppelt. Dieser Ablauf ist anspruchsvoller, da die Katapultkapsel mit Hilfe des pneumatisch angetriebenen und hydraulisch gesteuerten Kata-

pultsystems so beschleunigt wird, dass sie bis fast zur Spitze der Fallröhre fliegt und dann wieder herunter in den schwenkbaren Abbremsbehälter fällt.

Durch das Vakuum in der Fallröhre ist der Luftwiderstand der Kapsel so gering, dass in Bremen die beste Qualität an Schwerelosigkeit erzielt wird – sogar noch besser als auf der Internationalen Raumstation (ISS), wo man mit Störfaktoren wie z.B. den von Astronauten und lebenserhaltenden Klimasystemen verursachten Vibrationen zu kämpfen hat. Der Fallturm Bremen bietet daher mit seiner stets gleichbleibenden Qualität an Mikrogravitation von 10^{-6} g, also einem Millionstel der Erdbeschleunigung g, eine hervorragend reproduzierbare Experimentierumgebung für Kurzzeitexperimente.

Wissenschaftliche Forschungsgruppen aus aller Welt und aus den verschiedensten Fachgebieten fragen den Fallturm Bremen nach. Er ist daher durchgehend für ein Jahr im Voraus ausgebucht. Unter den Forschungsteams befindet sich jedes Jahr auch eine studentische Gruppe, die über das „Drop-Your-Thesis“-Programm gefördert wird. DYT ist ein erfolgreiches Studierendenprogramm in Kooperation mit der ESA, welches regelmäßig studentischen Nachwuchs an die Forschung unter Weltraumbedingungen heranzuführt. •



ABB 1

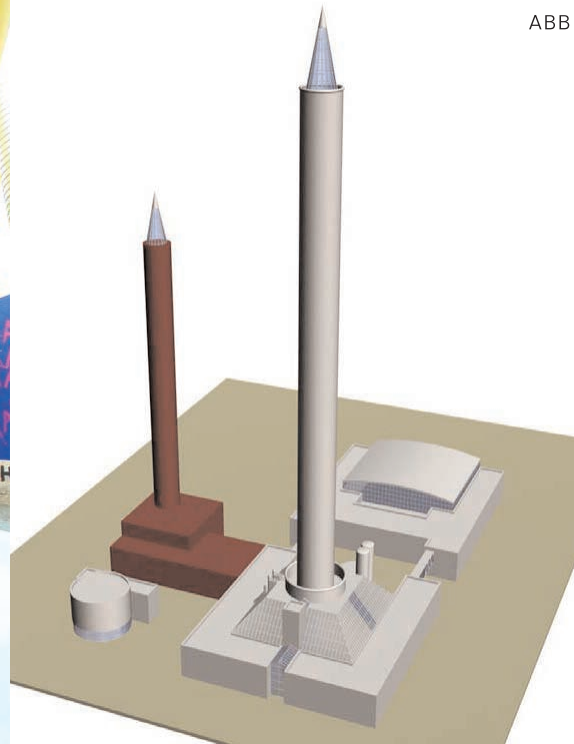


ABB 2

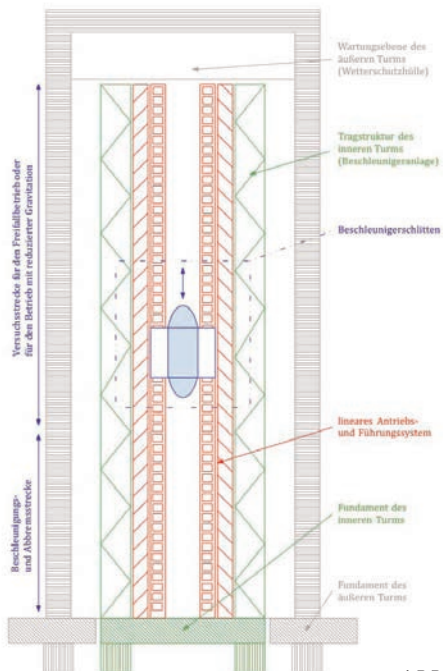


ABB 3

ABB. 1 Hydraulikanlage und Luftdrucktanks des Katapultsystems (oben links)

ABB. 2 UND 3 Das Free-Flyer-System des GraviTower sowie eine Darstellung einer idealen Anbindung der Gebäude zur effizienten Nutzung der vorhandenen Infrastruktur

GRAVITOWER BREMEN

Am ZARM wird zur Zeit an einer neuen Freifallanlage gearbeitet, mit der die Zahl an Experimenten im Vergleich zum bestehenden Fallturm Bremen um einem Faktor von mindestens 30 gesteigert werden kann. Grund für dieses Vorhaben ist die enorm hohe Nachfrage nach Versuchen in der Schwerelosigkeit. Diese Nachfrage rührt daher, dass man für Präzisionsexperimente eine bessere Statistik benötigt, in kürzerer Zeit den für das jeweilige Experiment wichtigen Parameterraum austesten kann und es immer mehr Experimente gibt, die von einer Schwerelosigkeit von exzellenter Qualität, wie sie im Fallturm Bremen existiert, profitieren.

Eine höhere Wiederholrate von Experimenten würde auch die Laufzeiten von wissenschaftlichen Projekten entscheidend verkürzen und zudem die Kosten von Experimenten wesentlich verringern. Neben dem freien Fall soll am so genannten „GraviTower Bremen“ auch reduzierte Gravitation erzeugt werden, mit der das Gravitationsfeld von Planeten, Monden, etc. nachgebildet werden kann.

Die Technik des neuen GraviTower Bremen basiert auf einem geführten Beschleunigerschlitten, der von einem elektromagnetischen Linearantrieb bewegt wird, einem „Free-Flyer“, der während der Freifallphase in dem Schlitten frei schwebt, sowie dem in diesem „Free-Flyer“ eingebauten Experiment.

Durch die Nähe zum bestehenden Fallturm, der weiterhin für besondere Experimente und für Vorexperimente genutzt wird, können kostensparende Synergieeffekte sowie die vor Ort vorhandene Expertise für Mikrogravitation genutzt werden. Durch den neuen GraviTower Bremen wird eine stets zugängliche und preiswerte Umgebung unter Welt-raumbedingungen für Forschung und Technologieentwicklungen auf Dauer zur Verfügung stehen. Der bestehende Fallturm wird weiterhin für Vorexperimente genutzt werden und für Experimente, die eine längere Freifallzeit benötigen. •



ABB. 1 UND 2 Der Vibrationsstand und die 30 g Zentrifuge ergänzen als wichtige Qualifikations- und Materialprüfungsanlagen die Laboreinrichtungen des ZARM

ZARM ALS DIENSTLEISTER FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT

Das ZARM bietet mit seinen vielfältigen Einrichtungen exzellente Möglichkeiten für die Forschung und Technologieentwicklung sowie für Tests und die Qualifikation von Komponenten in der Luft- und Raumfahrt an einem einzigen Standort. Die Forschung unter Schwerelosigkeit am ZARM wird durch den Fallturm Bremen geprägt. Die Schwerelosigkeit ist allerdings für Teile der Forschung und Entwicklung nur ein Aspekt, Hypergravitation ein anderer.

Um auch Beschleunigungen bis zum 30-fachen der Erdbeschleunigung auf Experimente ausüben zu können, wurde im Jahr 2005 in einem Gebäude neben dem Fallturm eine Großzentrifuge in Betrieb genommen. Sie ist in der Lage, auch Fallkapseln mit ihren Experimenten aus dem Fallturm ohne Umbauten zu zentrifugieren. Hauptsächlich bedient die 30g-Zentrifuge des ZARM die Luft- und Raumfahrtindustrie. Sie ist eine hoch anerkannte Test- und Qualifikationseinrichtung, die für einzelne Komponenten bis hin zu größeren und komplexeren Aufbauten genutzt wird.

Luft- und Raumfahrtkomponenten können ebenfalls auf dem Vibrationsteststand (Shaker) des ZARM nach internationalen Standards geprüft werden. Dieser Vibrationsteststand nimmt in der Regel mittelgroße Aufbauten mit einem testspezifischen Gesamtgewicht von bis zu 180 Kilogramm auf. So können z.B. einzelne Testkomponenten oder auch vollständige Experimente für entsprechend anstehende Raumfahrtmissionen oder für wissenschaftliche Flüge auf Höhenforschungsraketen vorbereitet und qualifiziert werden. Weiterhin können auch am ZARM Materialprüfungen und -qualifikationen in einer Thermalvakuumkammer durchgeführt werden, um die extremen Bedingungen im Weltall direkt zu simulieren.

Alle Einrichtungen des ZARM stehen der Wissenschaft und der Industrie zur Nutzung offen. Darüber hinaus kann auf ein hochqualifiziertes und sehr erfahrenes Team an Ingenieuren zurückgegriffen werden, das zur Unterstützung während der Versuche und Testläufe sowie als technische Entwickler für spezielle Projektaufgaben zur Verfügung steht. •




ABB 1: v.l.n.r.: Simon Mawn, Sandra Vázquez, Claus Lämmerzahl, Andreas Pommerening, Luce-Patrizia Arndt, Dieter Bischoff, Ulrich Kaczmarczik, Irina Schön, Fred Oetken, Michael Heseding, Andreas Gierse, Birgit Kinkeldey, Christian Eigenbrod, Torsten Lutz, Jan Siemer, Peter von Kampen, Thorben Könemann

Geschäftsführer

Prof. Dr. Claus Lämmerzahl


claus.laemmerzahl@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57834

Kaufmännischer Geschäftsführer


Peter von Kampen

peter.vonkampen@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57750


Lucie-Patrizia Arndt

lucie-patrizia.arndt@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57817


Manfred Behrens

manfred.behrens@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57798


Dieter Bischoff

dieter.bischoff@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57798


Christian Eigenbrod

christian.eigenbrod@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57780

Andreas Greif


andreas.greif@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57782

Andreas Gierse


andreas.gierse@zarm.uni-bremen.de

andreas.greif@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57761


Michael Heseding

michael.heseding@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57783


Ulrich Kaczmarczik

ulrich.kaczmarczik@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57790


Birgit Kinkeldey

birgit.kinkeldey@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57755


Thorben Koenemann

thorben.koenemann@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57788


Torsten Lutz

torsten.lutz@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57798


Simon Mawn

simon.mawn@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57758


Fred Oetken

fred.oetken@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57787


Andreas Pommerening

Andreas.Pommerening@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57796


Jan Siemer

jan.siemer@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57786


Irina Schön

irina.schoen@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57760


Maike Thielen

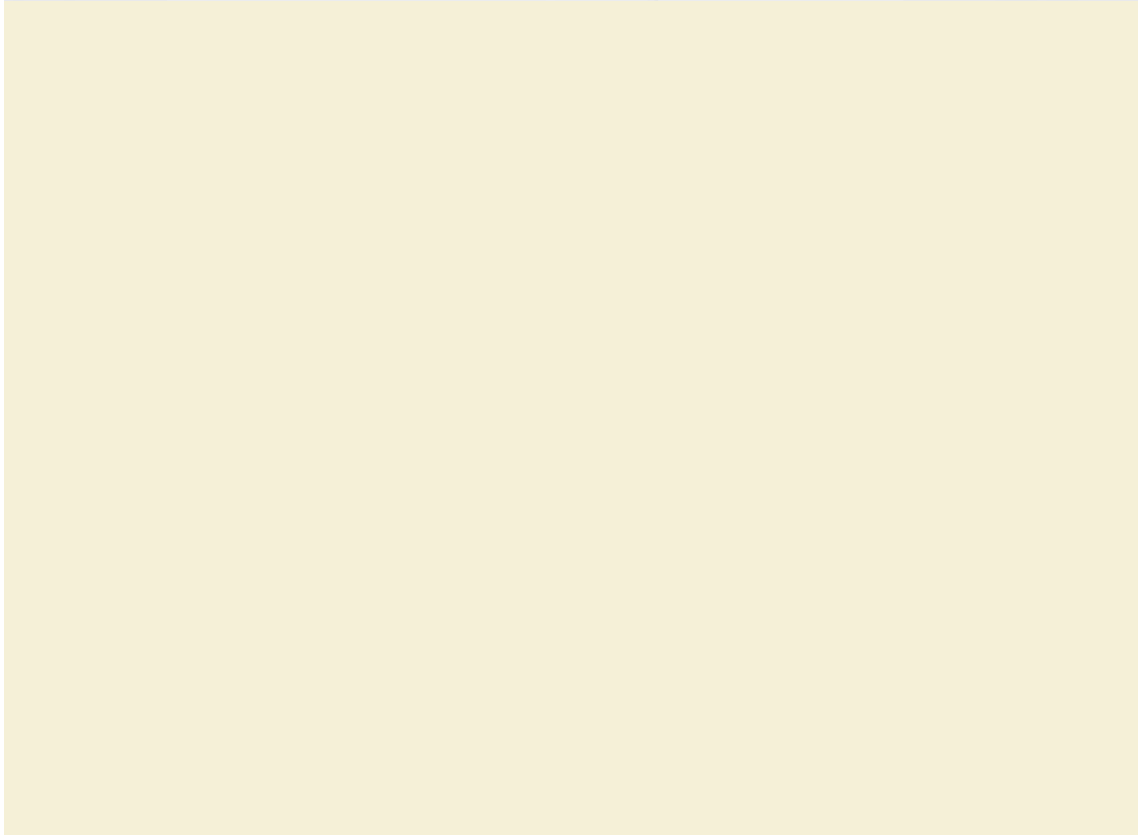
maike.thielen@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57752

Sandra Vázquez

sandra.vazquez@zarm.uni-bremen.de

 +49 421 218-57817



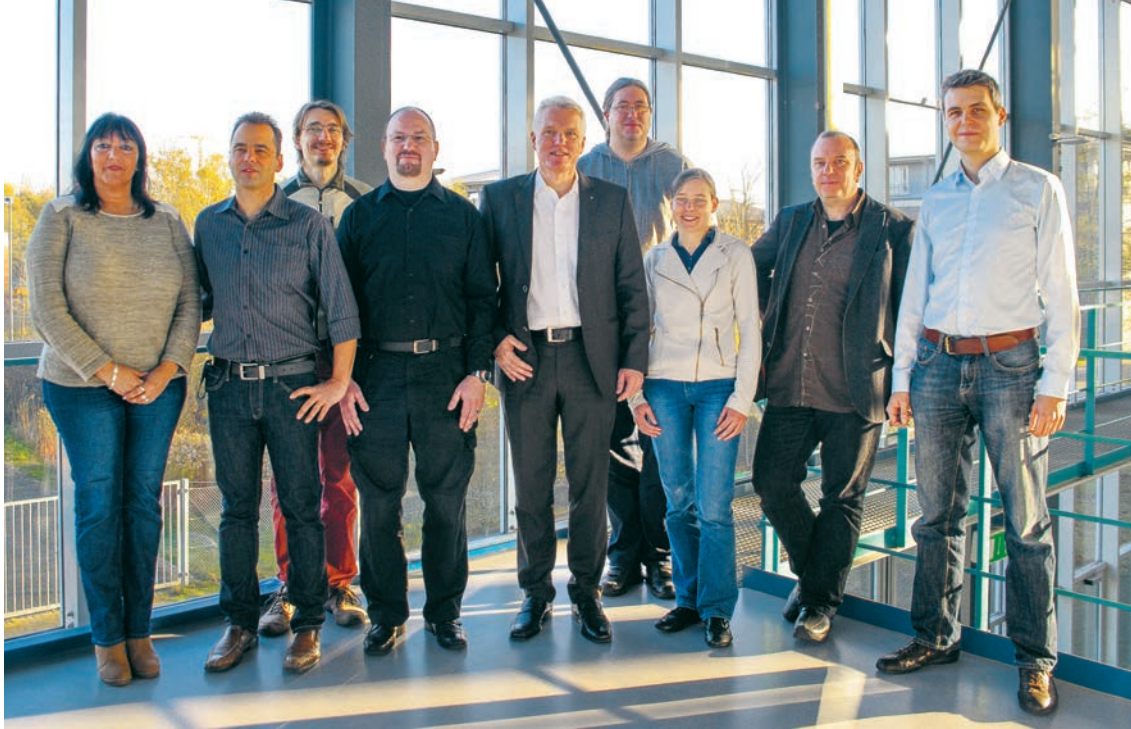
ZARM TECHNIK

Die ZARM Technik AG ist eines der erfolgreichsten Spin-Offs der Universität Bremen. Gegründet 1997, um die am ZARM erzielten Erkenntnisse in Form von Dienstleistungen und Produkten anzubieten, hat sie sich in den letzten Jahren in Europa zu dem führenden Entwickler und Hersteller von Komponenten zur magnetischen Lage-
regelung von Satelliten entwickelt.

Das Prinzip der Satellitensteuerung mit Hilfe des Magnetfeldes der Erde ist die energieeffizienteste Methode, einen Satelliten auszurichten, zumal die benötigte Energie mit Hilfe von Solarzellen erzeugt wird und somit nicht mit dem Satelliten mitgeführt werden muss. Sie beruht auf den Kräften, die unterschiedliche Magnetfelder aufeinander ausüben. Mit Hilfe von Spulen (Magnetic Torquer) wird ein magnetisches Dipolmoment erzeugt, welches dann mit dem Erdmagnetfeld in Wechselwirkung tritt und auf diesem Weg ein Drehmoment auf den Satelliten erzeugt.

Die logische Erweiterung des Produktspektrums erfolgte 2009 mit dem Magnetometer. Innerhalb von nur drei Jahren gelang es, ein Model zur Bestimmung des Magnetfeldes anzubieten, das den höchsten Qualitäts- und Performance-Ansprüchen gerecht wird und mittlerweile nicht nur von den europäischen Raumfahrt-Systemhäusern gewählt wird.


Bis heute sind Magnetic Torquers und Magnetometer der ZARM Technik AG in über 200 Satelliten eingesetzt worden. Die längste Mission ist mittlerweile über 13 Jahre in Betrieb. Ausgestattet wurden in Europa unter anderem die Satelliten der Firma OHB System (EnMap, Navigations satellitensystem Galileo), EADS Astrium (Terra-SAR, TerraX, Swarm, Sentinel, Spot6 und Spot7) und Thales Alenia Space. Auch außerhalb Europas werden die Produkte inzwischen nachgefragt, so dass auch asiatische und amerikanische Satelliten, unter anderem der NASA, ausgestattet werden. •



v.l.: Tanja Weber, Peter Offterdinger, Martin Ernst, Bernd C. Sander, Holger Oelze, Rüdiger Bruns, Susann Neustadt, Michael Warnke, Alexander Schotten


Holger W. Oelze

holger.w.oelze@zarm-technik.de

 +49 421 218-57770


Alexander Schotten

alexander.schotten@zarm-technik.de

 +49 421 218-57777


Bernd C. Sander

bernd-carsten.sander@zarm-technik.de

 +49 421 218-57781


Joachim Zademack

joachim.zademack@zarm-technik.de

 +49 421 218-57774


Martin Ernst

martin.ernst@zarm-technik.de

 +49 421 218-57776


Michael Warnke

Michael.Warnke@zarm-technik.de

 +49 421 218-57778


Peter Offterdinger

Peter.Offterdinger@zarm-technik.de

 +49 421 218-57772


Rüdiger Bruns

ruediger.bruns@zarm-technik.de

 +49 421 218-57779

Susann Neustadt

susann.neustadt@zarm-technik.de

 +49 421 218-57751

Tanja Weber

tanja.weber@zarm-technik.de


 +49 421 218-57771



ABB. 1 Die Gewinner des ZARM-Förderpreises 2012 präsentieren sich gemeinsam mit der Jury und ihren Begleitpersonen. Die Preisträger (zu erkennen an den blauen Mappen) von links nach rechts:

Johannes Neukam (1. Preis, dotiert mit 1.400 EUR): „Konstruktion eines vibrationsresistenten Total Doubling Interferometers zur Bestimmung der Diffusionsgeschwindigkeit in überkritischem CO₂“, betreut durch Prof. Dr. Antonio Delgado, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Thomas Albin (2. Preis, dotiert mit 800 EUR): „Maximizing the ground based detection of near-Earth objects“, betreut durch Prof. Dr. Jutta Kunz-Drolshagen, Universität Oldenburg

Mathias Rohrbeck (2. Preis, dotiert mit 800 EUR): „Conceptional Study of Large Transfers Stages Extended Summary“, betreut durch Prof. Vörsmann, TU Braunschweig



ABB. 2 Mit dem vom Förderverein ZARM e.V. finanzierten Lego-Bausatz entwickeln Praktikant_innen ihren eigenen Mechanismus für den Fallturmbetrieb

FÖRDERVEREIN ZARM E.V.

Präsident: Dr. Michael Menking (Astrium GmbH)

Vizepräsidenten: Prof. Manfred Fuchs (OHB AG),

Holger Böse (Sparkasse Bremen AG)

Geschäftsführer:

Prof. Dr. Claus Braxmaier, ZARM Direktor

Für weitere Informationen oder

Anmeldungen als Vereinsmitglied kontaktieren Sie bitte:

fv@zarm.uni-bremen.de oder ☎ 0421 218-57900

Spendenkonto ZARM Förderverein e. V.:

Sparkasse Bremen, BLZ 290 501 01, Konto 80 33 1507

FÖRDERVEREIN ZARM E.V.

Seit seiner Gründung 1989 ist der Förderverein ZARM e.V. ein gelungenes Beispiel dafür, wie sich gesellschaftliches Engagement von Industrie und Universität zu einem gemeinsamen Projekt vereinen lassen. Der Förderverein entspringt einem Initiativkreis von Unternehmen und Privatpersonen, die es sich am Raumfahrtstandort Bremen zum Ziel gemacht haben, den internationalen Austausch und die Nachwuchsförderung auf den Gebieten der Strömungsmechanik, Forschung unter Mikrogravitation, Raumfahrttechnologie, Weltraumforschung sowie der raumfahrtbezogenen Umwelttechnik zu stärken.

Eine besondere Aufgabe ist die jährliche Vergabe der sogenannten ZARM-Förderpreise. Hauptsponsoren dieser mit insgesamt 3.000 Euro dotierten Preise sind die derzeit 48 Mitglieder, davon 39 Privatpersonen und 9 Firmen. Die Jury, bestehend aus Professorin Dr. Kirsten Tracht – FB Produktionstechnik der Universität Bremen, Dr. Peter Vits – Astrium GmbH, Dr. Detlev Hüser – OHB-System AG und Professor Dr. Wolfram Schroer – FB Biologie und Chemie der Universität Bremen, stellt sich jedes Jahr der schwierigen Aufgabe, aus einer Vielzahl von deutschlandweit eingereichten Studien-, Bachelor-, Master- oder Diplomarbeiten die drei besten Arbeiten zu prämiieren. Die große Anzahl von eingereichten Arbeiten spiegelt den hohen Stellenwert der Nachwuchsförderung am ZARM wider.

Der Verein vergibt Stipendien für Besuche internationaler Gastwissenschaftler_innen und Tagungsaufenthalte junger ZARM-Mitarbeiter_innen, die

innerhalb der regulären Projektförderung nicht finanzierbar wären. Seit Kurzem fördert er auch gezielt ZARM-Projekte zur Nachwuchsförderung. So wurden z.B. die Kosten für ein Lego-Set übernommen, mit dem Praktikant_innen selbstständig den Fallturm inklusive seiner technischen Module nachbauen und dadurch ein umfassendes Verständnis für die Technik des Fallturms erlangen.

In Anwesenheit des Präsidenten Dr. Michael Menking (Astrium GmbH), des 1. Vizepräsidenten Professor Manfred Fuchs (OHB AG) sowie des 2. Vizepräsidenten Holger Böse (Sparkasse Bremen AG), wurde auf der Jahreshauptversammlung am 31. Mai 2013 ein neuer Geschäftsführer gewählt. Professor Claus Braxmaier, Direktor am ZARM, löst damit seinen Vorgänger Peter von Kampen als Geschäftsführer ab, der nunmehr über fünf Jahre die Geschäftsführung innehatte.

Am gleichen Tag wurden die ZARM-Förderpreise an drei Wissenschaftler_innen aus der Physik, Luft- und Raumfahrt verliehen.

Der Förderverein möchte seine Aktivitäten verstärken, die Stipendien anheben sowie generell die Nachwuchsförderung ausdehnen. Da dieses Engagement nur durch die Mitgliedsbeiträge garantiert und ausgebaut werden kann, will der Förderverein intensiv um neue Mitglieder werben. Dazu wird sich u.a. am 20. Juni 2014 eine gute Gelegenheit bieten, wenn Mitglieder und Freunde des ZARM zu einer großen Jubiläumsfeier in der Maschinenhalle des Bremer Fallturms eingeladen sind, um 25 Jahre erfolgreiche Vereinsarbeit zu feiern. •

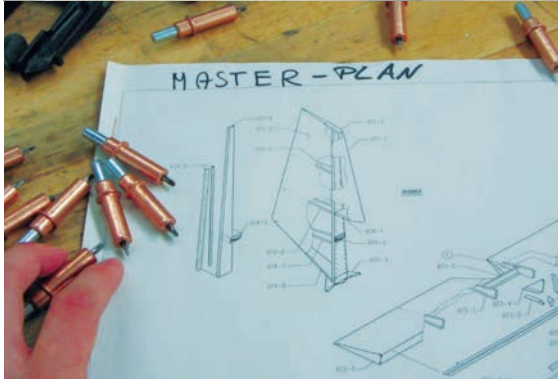


ABB. 1 Neben Wasserkanal, Shaker und Windkanal wird das Ultraleichtflugzeug gebaut.

ABB. 2 Pläne, Prüfungen, Abnahmen, Zulassung... das Flugzeug braucht mehr Papier als Benzin

ABB. 3 Beim Bremer Verein für Luftfahrt e.V. lernen die Studierenden Theorie und Praxis

ABB. 4 So, oder schöner, soll sie einmal aussehen. Das Airbuswerk-Bremen hat schonmal die Lackierung spendiert.

FLUGTECHNISCHE VEREINIGUNG HENRICH FOCKE E.V.

c/o Universität Bremen, Christian Eigenbrod (1. Vorsitzender)

Eingetragen in das Vereinsregister des Amtsgerichts Bremen, Nr. 5150

Spendenkonto Nr. 1022459003

bei der Bremer Landesbank BLZ 290 500 00

DEM ERSTFLUG NÄHER

Noch bauen Studierende, Ehemalige und wissenschaftliche Mitarbeiter in den Hallen des ZARM gemeinsam am ersten Ultraleichtflugzeug der „Akademischen Fliegergruppe“. Rumpf, Leitwerk und Tragflächen der ZODIAC CH 601 XL sind bereits erkennbar oder fertig, aber Motor, Rettungssystem und Instrumente fehlen noch. Die FVHF e.V. wird vom Fachbereich 4 der Universität Bremen in Zusammenarbeit mit dem „Bremer Verein für Luftfahrt“, der die Ausbildung durchführt, betrieben und ist gänzlich durch Spenden und geringe Mitgliedsbeiträge finanziert.

Der universitäre Verein beschäftigt sich mit dreiachsgesteuerten Ultraleichtflugzeugen. Studentisch organisiert, dient er als Bindeglied zwischen theoretischen Studieninhalten und der praktischen Luftfahrtanwendung. Dabei vermittelt er „know-how“ im komplexen Zusammenspiel zwischen Struktur, Aerodynamik und Antrieb und erlaubt die Verbesserung und Neuentwicklung von Komponenten auf der ständigen Suche nach dem „optimalen Kompromiss“. Eingebunden in die Lehre an der Universität Bremen werden auch fachgebietsübergreifende Projekte, Bachelor- und Masterarbeiten durchgeführt.

So wurde z.B. die Wirkung von Gurney-Flaps zur Erhöhung des Auftriebs bei kaum erhöhtem

Widerstand im Wasserkanalversuch und in numerischen Simulationen in Zusammenarbeit mit der FH-Osnabrück untersucht. Gemeinsam mit dem Faserinstitut FIBRE der Universität Bremen wurde die Möglichkeit geprüft, das Seitenruder oder sogar den gesamten Tragflügel in CFK-Verbundwerkstoffen auszuführen. Da jede Änderung am Flugzeug, die das Gewicht, die Antriebsleistung oder die Aerodynamik beeinflusst, im flugmesstechnischen Versuch nachgewiesen werden muss, wurde in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Technische Mechanik-Strukturmechanik ein Wingboom entwickelt, mittels dessen Fluggeschwindigkeit, Anstell- und Schiebewinkel präzise gemessen werden können. Mit dem Institut für Strukturmechanik BIME wird das Konzept für ein integriertes elektronisches Dashboard entwickelt.

Neben den rund 40 Mitgliedern, zu denen Studierende als auch Lehrende gehören, arbeiten inzwischen auch Ehemalige und interessierte Mitarbeiter des Bremer Airbus-Werks in ihrer Freizeit mit. Nicht zuletzt ermöglicht der Verein interessierten Studierenden praktische Erfahrung in der Fliegerei zu sammeln und bietet Gelegenheit zu studienbegleitender Freizeitgestaltung. •

ZARM-WORKSHOPS 2011/2012

ALGEBRO-GEOMETRIC METHODS IN FUNDAMENTAL PHYSICS

- *Physikzentrum Bad Honnef*
2. bis 7. September 2012
- *Hanse-Wissenschaftskolleg*
Delmenhorst, 12. bis 16. September 2011

FROM QUANTUM TO COSMOS 5 (Q2C5)

„Space-Based Research in
Gravitational and Quantum Physics“
Internationaler Workshop in Köln,
9. bis 12. Oktober 2012

INAUGURAL MEETING "MODELS OF GRAVITY"

1. Workshop des DFG-Graduiertenkollegs
„Models of Gravity“, Universität Bremen
28. bis 30. März 2012

GIF WORKSHOP 2011

1st German-Israel Workshop on
Exploration of Electrodynamics
Funded by the German-Israeli Foundation
ZARM, Universität Bremen
15. bis 17. August 2011

PROBLEMS AND DEVELOPMENTS IN CLASSICAL ELECTRODYNAMICS

Physikzentrum Bad Honnef, 21. bis 25. März 2011



ABB. 1-3 Das ZARM ist Ausrichter großer Raumfahrt-messen, Podiumsdiskussionen, Vorträge und Posterausstellungen.

ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

PRESSEARBEIT

Ein wichtiges Anliegen des ZARM ist es, die Forschungsthemen des wissenschaftlichen Instituts und die Experimente im Fallturm Bremen der Öffentlichkeit vorzustellen. Aus diesem Grund wurde die Pressearbeit seit 2010 deutlich intensiviert und die jährliche Veröffentlichung von Pressemitteilungen im Vergleich zum Zeitraum von 2000 bis 2009 über 150 Prozent gesteigert. Entsprechend hoch ist die Präsenz des ZARM in den Medien. Allein für das Jahr 2012 belegt die kontinuierlich durchgeführte, systematische Medienanalyse 380 Beiträge in TV-, Hörfunk-, Print- und Online-Medien. Darüber hinaus bearbeitet die Kommunikationsabteilung durchschnittlich 75 Anfragen für Bild-, Text- und Videomaterial pro Jahr. Die erfolgreiche Bilanz der Pressearbeit zeigt sich nicht zuletzt auch in der Berichterstattung sowohl internationaler Medien wie Space UK (Magazin der britischen Raumfahrtagentur), Discovery Channel und The Guardian Online, als auch großer nationaler Medienanstalten, darunter ARD und ZDF.

KONFERENZEN UND MESSEN

Ein zentrales Kommunikationselement des ZARM ist die Ausrichtung internationaler Veranstaltungen, die in idealer Weise den wissenschaftlichen Austausch und das Networking fördern. Dazu zählen Wissenschaftsworkshops ebenso wie größere Fachkongresse, aber auch Ausstellungen und Messeauftritte. Insbesondere als Gastgeber der beiden weltweit größten Raumfahrtkongressen „International Astronautical Congress (IAC 2003)“ und „Committee on Space Research (COSPAR 2010)“ hat sich das ZARM international einen Namen als Konferenz-

ausrichter gemacht. Darüber hinaus gilt das ZARM-Konferenzteam als kompetenter Berater für die Akquisition und Durchführung von internationalen Tagungen für seine Bremer Partner. Weitere ZARM Aktivitäten umfassen die Darstellung des ZARM und des Bremer Fallturms auf Messen und Ausstellungen.

KOOPERATIONEN UND SPONSORING

Das ZARM engagiert sich in zahlreichen Kooperationen sowohl für die internationale Raumfahrtgemeinschaft als auch regional für den Raumfahrtstandort Bremen. Es ist (Förder-)Mitglied folgender Organisationen:

- Aviabelt Bremen e.V.
- Committee on Space Research (COSPAR)
- Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal - Oberth e.V. (DGLR)
- European Low Gravity Research Association (ELGRA)
- Freunde der Universität Bremen und der International University Bremen e.V. (unifreunde)
- Gesellschaft von Freunden des DLR e.V.
- Gesellschaft für Umweltsimulation e.V. (GUS)
- International Astronautical Federation (IAF)
- Technologiepark Uni Bremen e.V.
- Wissenschaftliche Gesellschaft der Freien Hansestadt Bremen e.V. (Wittheit zu Bremen)
- Women in Aerospace (WIA)
- Yuri's Night Bremen e.V.



ABB. 1 UND 2

Die Praktikant_innen Leonie Sander, Gökhan Canli und Lennart Stipulkowski sind bei der Vorbereitung der Fallturmexperimente hautnah dabei.

NACHWUCHSARBEIT

Gute Nachwuchsarbeit ist ein wichtiges Thema am ZARM. So können kluge junge Köpfe aus dem regionalen Umfeld für die Raumfahrt, die Physik und die Naturwissenschaften allgemein gewonnen werden, um dem Nachwuchsmangel in diesen Disziplinen entgegenzusteuern. Dabei werden insbesondere Mädchen für diese Fächer angesprochen, weil hier typischerweise eine sehr niedrige Frauenquote besteht. Zudem sehen wir die Nachwuchsarbeit als eine Investition in unsere eigene Zukunft, mit der wir bei möglichst vielen Jugendlichen frühzeitig Interesse für unsere Forschung wecken wollen. Es werden unterschiedliche Projekte für verschiedene Zielgruppen angeboten:

SCHÜLERPRAKTIKA

Schülerpraktika, die in der Regel zwei Wochen dauern, geben Schüler_innen der Altersgruppe von 15 bis 19 Jahren einen guten Einblick in die vielfältige Forschung am ZARM. Wir haben ein Praktikumssystem entwickelt, das den Schüler_innen ermöglicht, gemeinsam mit ihren Betreuer_innen aus den verschiedenen technischen und wissenschaftlichen Bereichen vielfältige Aufgabenstellungen zu bearbeiten. Mit diesen Modulen können wir individuell auf die Interessen und Fähigkeiten der Praktikant_innen eingehen.

INFORMATIONSVANSTALTUNGEN DER UNIVERSITÄT BREMEN

Das ZARM engagiert sich bei den jährlichen Informationsveranstaltungen an der Universität Bremen, um Schüler_innen für ein Studium der Ingenieurs-

wissenschaften oder der Physik zu begeistern. Dazu öffnen wir regelmäßig unsere Türen für interessante Führungen durch die Versuchshalle und die Abbremskammer des Fallturms. Die Führungen werden von Vorträgen begleitet, in denen Wissenschaftler_innen ihre Forschung speziell für das junge Publikum präsentieren. Solche jährlich stattfindenden Veranstaltungen sind

- die Kinderuni, die Kindern im Alter von 8 bis 14 Jahren den Alltag an einer Universität näher bringt.
- der Weltrettertag des Fachbereichs Produktionstechnik, bei dem Schüler_innen ab 16 und insbesondere Abiturient_innen die Möglichkeiten des Ingenieurberufs kennenlernen sollen.
- der Zukunftstag / Girls' Day.

FÖRDERUNG WEIBLICHEN NACHWUCHSES

Um vorrangig Mädchen für die Naturwissenschaften zu gewinnen, hat die Universität Bremen den Klub MINTIA gegründet. Auch ZARM-Mitarbeiterinnen beteiligen sich mit interessanten Vorträgen zum Mitmachen und Mitdenken, beispielsweise über Schwarze Löcher und das Entstehen von Sternen. Die Sommeruni der Ingenieurinnen bietet ein Förderprogramm, das besonders auf Frauen zugeschnitten ist, die in diesem Beruf arbeiten, studieren oder an einem ingenieurwissenschaftlichen Studium interessiert sind. Auch hier präsentiert sich das ZARM als ein interessantes Tätigkeitsfeld mit vielen engagierten Mitarbeiterinnen. •



BUCHUNG DER RÄUMLICHKEITEN IN DER FALLTURMSPITZE

Der Meetingraum und die Panorama-Lounge in der Fallturmspitze sind für Gruppen bis maximal 14 Personen zugelassen. Für detaillierte Informationen und Terminabsprachen wenden Sie sich bitte an office@zarm.uni-bremen.de, ☎ +49 421 218-57755



ABB. 1-4 Der Konferenzraum und die Panorama-Lounge in der Fallturmspitze können für exklusive Events gebucht werden.

BESUCHSPROGRAMME

Es ist fester Bestandteil des Informationsangebotes am ZARM, der Öffentlichkeit Besuche und Besichtigungen zu ermöglichen. Bei Führungen durch den Fallturm erhalten interessierte Laien, Fachbesucher_innen und Schulklassen Einblicke in die wissenschaftliche Arbeit und die labortechnischen Einrichtungen des ZARM.

Sehr positiv ist die Resonanz unserer Gäste auf die Möglichkeit, Räume in der Fallturmspitze für private und geschäftliche Veranstaltungen anmieten zu können. Der Meetingraum und die Panoramalounge in ca. 130 Metern Höhe werden seit der Wiedereröffnung im September 2011 regelmäßig und häufig in Verbindung mit einer Führung angefragt.

Die rund 200 Besuchsgruppen pro Jahr für 2011 und 2012 belegen das große Interesse, welches das ZARM mit seinen Laboren, Forschungsprojekten und nicht zuletzt dem Fallturm – als einem der markantesten Bauwerke Bremens – hervorruft. •

FALLTURMBESICHTIGUNGEN

Gruppen bis zu 25 Personen können sich unter info@zarm.uni-bremen.de, ☎ +49 421 218-57900, nach Besichtigungsterminen erkundigen.



📌 PUBLIKATIONEN

"WISSENSCHAFTLICHE VERÖFFENTLICHUNGEN"

2012

- [1] CONRATH, M., DREYER, M. E.: Gas breakthrough at a porous screen, *Int. J. Multiphase Flow* 42, 29-41 (2012).
- [2] A. GARCIA, E. HACKMANN, C. LÄMMERZAHL, A. Macias: No-hair conjecture for Einstein-Plebanski non-linear electrodynamics static black holes, *Phys. Rev. D* 86, 024037 (2012).
- [3] B. CHRISTOPHE, L. J. SPILKER, J. D. ANDERSON, N. ANDRÉ, S. W. ASMAR, J. AURNOU, D. BANFIELD, A. BARUCCI, O. BERTOLAMI, R. BINGHAM, P. BROWN, B. CECCONI, J.-M. COURTY, H. DITTUS, L. N. FLETCHER, B. FOULON, F. FRANCISCO, P. J. S. GIL, K. H. GLASSMEIER, W. GRUNDY, C. HANSEN, J. HELBERT, R. HELLED, H. HUSSMANN, B. LAMINE, C. LÄMMERZAHL, L. LAMY, R. LEHOUCQ, B. LENOIR, A. LEVY, G. ORTON, J. PÁRAMOS, J. PONCY, F. POSTBERG, S. V. PROGREBENKO, K. R. REH, S. REYNAUD, C. ROBERT, E. SAMAIN, J. SAUR, K. M. SAYANAGI, N. SCHMITZ, H. SELIG, F. SOHL, T. R. SPILKER, R. SRAMA, K. STEPHAN, P. TOUBOUL, P. WOLF: OSS (Outer Solar System): a fundamental and planetary physics mission to Neptune, Triton and the Kuiper Belt, *Exp Astron.* 34, 203–242 (2012).
- [4] C. BRAXMAIER, H. DITTUS, B. FOULON, E. GÖKLÜ, C. GRIMANI, J. GUO, S. HERRMANN, C. LÄMMERZAHL, W. T. NI, A. PETERS, B. RIEVERS, É. SAMAIN, H. SELIG, D. SHAUL, D. SVEHLA, P. TOUBOUL, G. WANG, A. M. WU, A. F. ZAKHAROV: Astrodynamical Space Test of Relativity using Optical Devices I (ASTROD I)—a class-M fundamental physics mission proposal for cosmic vision 2015–2025: 2010 Update, *Exp. Astron.* DOI 10.1007/s10686-011-9281-y, (2012).
- [5] C. LÄMMERZAHL, P. RADEMAKER: Higher order equations of motion and gravity, *Phys. Rev. D* 86, 124017 (2012).
- [6] C. LÄMMERZAHL, V. PERLICK, W. HASSE: Observable effects in a class of spherically symmetric static Finsler spacetimes, *Phys. Rev. D* 86, 104042 (2012).
- [7] E. CASTELLANOS, C. LÄMMERZAHL: Ideal-Modified Bosonic Gas Trapped in an Arbitrary Three Dimensional Power-Law Potential, *Modern Physics Letters A* 27 (31), 1250181 (2012).
- [8] E. HACKMANN, C. LÄMMERZAHL: Observables for bound orbital motion in axially symmetric spacetimes, *Phys. Rev. D* 85, 044049 (2012).
- [9] S. GRUNAU, V. KAGRAMANOVA, J. KUNZ, C. LÄMMERZAHL: Geodesic motion in the singly spinning black ring spacetime, *Phys. Rev. D* 86, 104002 (2012).
- [10] V. ENOLSKI, B. HARTMANN, V. KAGRAMANOVA, J. KUNZ, C. LÄMMERZAHL, P. SIRIMACHAN: Inversion of a general hyperelliptic integral and particle motion in Hořava–Lifshitz black hole space-times, *J. Math. Phys.* 53, 012504 (2012).
- [11] J. I. RIVAS, J. I., A. CAMACHO, E. GÖKLÜ: Bogoliubov space of a Bose-Einstein condensate and quantum spacetime fluctuations, *Class. Quantum Grav.* 29, 165005 (2012).

- [12] J. STEINHOFF, D. PUETZFELD: Influence of internal structure on the motion of test bodies in extreme mass ratio situations, *Phys. Rev. D* 86, 044033 (2012).
- [13] HERRMANN, S., DITTUS, H., LÄMMERZAHL, C.: Testing the equivalence principle with atomic interferometry, *Class. Quant. Grav.* 29, 184003 (2012).
- [14] R. GROLL, C. ZIMMERMANN, H. J. RATH: Compressible Large-Eddy Simulation of Boundary-Layer Heat Transfer in a Turbulent Convective Flow, PAMM 12, Wiley 2012.
- [15] S. REICHEL, R. GROLL H. J. RATH: Unsteady numerical simulation with adaptive mesh refinement of a hypersonic double-cone geometry for re-entry phenomena prediction, *Computational Methods in Applied Science and Engineering* 6, ISBN: 978-3-9502481-9-7, Wien.
- [16] K. LEACH, R. GROLL, H. J. RATH: Large-Eddy Simulation of a Pneumatically Powered Abrading Sphere, *Fluid Flow Technologies* 15:600-607, ISBN 978-963-08-4586-1, FFT 2012.
- [17] C. ZIMMERMANN, R. GROLL: Modelling turbulent heat transfer of a Rayleigh-Benard problem with compressible Large-Eddy simulation, *Turbulence, Heat and Mass Transfer* 7:615-622, ISBN 978-1-56700-301-7, Begell House Inc. 2012.
- [18] R. GROLL, F. FASTABEND, H. J. RATH: Modelling Trans-sonic Flows Through Ring-Shape Thruster Geometries with DSMC, ASME electronic publication, Order No. ASME-I891DV, ASME 2012.
- 2011
- [19] B. HARTMANN, C. LÄMMERZAHL, P. SIRIMACHAN: Detection of cosmic superstrings by geodesic test particle motion, *Phys. Rev. D* 83, 045027 (2011).
- [20] ENOLSKI, V., HARTMANN, B., KAGRAMANOVA, V., KUNZ, J., LÄMMERZAHL, C., SIRIMACHAN, P.: Particle motion in Hořava – Lifshitz black hole space-times, eingereicht bei *Phys. Rev. D.*, 84, 084011 (2011).
- [21] ENOLSKI, V., HARTMANN, B., KAGRAMANOVA, V., KUNZ, J., LÄMMERZAHL, C., SIRIMACHAN, P.: Inversion of a general hyperelliptic integral and particle motion in Hořava-Lifshitz black hole space-times, *J. Math. Phys.* 53, 012504 (2012).
- [22] KUFNER, E., BLUM, J., CALLENS, N., EIGENBROD, CH., KOUDELKA, O., ORR, A., ROSA, C.C., VEDERNIKOV, A., WILL, S., REIMANN, J., WURM, G.: ESA's Drop Tower Utilization Activities 2000 – 2011, *Microgravity, Science and Technology* (2011), im Druck.
- [23] EIGENBROD, C., KLINKOV, K., FACHINI, F.: On the Effect of Pressure Oscillations on Droplet Autoignition, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, accepted for publication, (2011).
- [24] GIESE, F., EIGENBROD, CH., KOCH, D.: A Novel Production Method for Porous Sound-Absorbing Ceramic Material for High-Temperature Applications, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 8, 646 (2011).
- [25] BREMER, S., SELIG, H., LIST, M., DITTUS, H.: Modelling and simulation of the space mission MICROCOSCOPE, *Acta Astronautica* 68, 28 (2011).

- [26] ENOLSKI V., HACKMANN E., KAGRAMANOVA V., KUNZ, J., LÄMMERZAHL, C.: Inversion of hyperelliptic integrals of arbitrary genus with application to particle motion in general relativity, *J. Geom. Phys.* 61, 899 (2011).
- [27] PERLICK, V.: On the hyperbolicity of Maxwell's equations with a local constitutive law, *J. Math. Phys.* 52, 042903 (2011).
- [28] RIEVERS, B., LÄMMERZAHL, C.: High precision thermal modeling of complex systems with application to the flyby and Pioneer anomaly, *Ann. Phys.* 523, 439 (2011).
- [29] GIULINI, D.: Hamiltonian Method in General Relativity, in Arefeva, I., Sternheimer, D., *Modern Encyclopedia of Mathematical Physics*, 1st Edition: (2011).
- [30] GIULINI, D.: *Matter from Space*, Einstein–Studies Series, Birkhaeuser, (2011).
- [31] R. GROLL: Heat and mass transfer in evaporating turbulent Drop-laden flow, *Transactions on Engineering Sciences* 70, 129 (2011).
- [32] R. GROLL, T. SCHADOWSKI, S. REICHEL, H. J. RATH: Computational modelling of transsonic flow in a thermo-electric propulsion system, *DLRK 2011 Proceedings*, 1479-1480, DGLR 2011.
- [33] S. REICHEL, R. GROLL, H. J. RATH: Experimental Investigation and Numerical Modeling of Electric Heating Rate in a Generic Electric Propulsion System, e-publication: *Electronic Rocket Propulsion Society IEPC-2011-063*, ERPS 2011.
- [34] R. GROLL: Velocity and Temperature Boundary-Layer Modeling Using Averaged Molecule cluster Transport Equations, *IUVSTA 64 Proceedings*, IUVSTA 2011.
- ## 2010
- [35] RUDOLPH, J., GAALLOUL, N., SINGH, Y., AHLERS, H., HERR, W., SCHULZE, T.A., SEIDEL, S.T., RODE, C., SCHKOLNIK, V., ERTMER, W., RASEL, E.M., MÜNTINGA, H., KÖNEMANN, T., RESCH, A., HERRMANN, S., LÄMMERZAHL, C., VAN ZOEST, T., DITTUS, H., VOGEL, A., WENZLAWSKI, A., SENGSTOCK, K., MEYER, N., BONGS, K., KRUTZIK, M., LEWOCZKO-ADAMCZYK, W., SCHIEMANGK, M., PETERS, A., ECKART, M., KAJARI, E., ARNOLD, S., NANDI, G., SCHLEICH, W.P., WALSER, R., STEINMETZ, T., HÄNSCH T.W., REICHEL, J.: *Degenerate Quantum Gases in Microgravity*, *Microgravity Science and Technology* (2010).
- [36] CONRATH, M., FRIES, N., ZHANG, M., DREYER, M.E.: Radial Capillary Transport from an Infinite Reservoir, *Transport Porous Med.* 84, 109 (2010).
- [37] GRAH, A., DREYER, M.E.: Dynamic stability analysis for capillary channel flow: One–dimensional and three–dimensional computations and the equivalent steady state technique, *Phys. Fluids* 22, 014101 (2010).
- [38] HAAKE, D., KLATTE, J., GRAH, A., DREYER, M.E.: Flow rate limitation of steady convective dominated open capillary channel flows through a groove, *Microgravity Sci. Technol.* 22, 129 (2010).
- [39] JENSON, R., WEISLOGEL, M.M., KLATTE, J., DREYER, M.E.: Dynamic Fluid Interface Experiments aboard the International Space Station: Model Benchmarking Dataset, *J. Spacecraft Rockets* 47, 670 (2010).

- [40] KULEV, N., DREYER, M.E.: Drop Tower Experiments on Non-isothermal Reorientation of Cryogenic Liquids, *Microgravity Sci. Technol.* 22, 463 (2010).
- [41] ROSENDAHL, U., GRAH, A. AND DREYER, M.E.: Convective dominated flows in open capillary channels, *Phys. Fluids* 22, 052102 (2010).
- [42] SALIM, A., COLIN, C., DREYER, M.E.: Experimental Investigation of a Bubbly Two-Phase Flow in an Open Capillary Channel under Microgravity Conditions, *Microgravity Sci. Technol.* 22, 87 (2010).
- [43] SALIM, A., COLIN, C., GRAH, A., DREYER, M.E.: Laminar bubbly flow in an open capillary channel in microgravity, *Int. J. Multiphas. Flow* 36, 707 (2010).
- [44] GIESE, F., RIES, H.C., EIGENBROD, CH.: On the Performance of Porous Sound Absorbent Material in High Temperature Applications, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 132, 121301 (2010).
- [45] RICKMERS, P., EIGENBROD, CH., KLINKOV, K.: N-Heptane: Comparison of Spray Autoignition Experiments and Single Droplet Simulations, *AIAA Journal* (2010).
- [46] CARRERA, M., GIULINI, D.: Influence of global cosmological expansion on local dynamics and kinematics, *Rev. Mod. Phys.* 82, 169 (2010).
- [47] CARRERA, M., GIULINI, D.: Generalization of McVittie's model for an inhomogeneity in a cosmological spacetime, *Phys. Rev. D* 81, 043521 (2010).
- [48] HACKMANN, E., HARTMANN, B., LÄMMERZAHL, C., SIRIMACHEN, P.: Complete set of solutions of the geodesic equation in the space-time of a Schwarzschild black hole pierced by a cosmic string, *Phys. Rev. D* 81, 064016 (2010).
- [49] HACKMANN, E., LÄMMERZAHL C., HARTMANN B., SIRIMACHAN P.: Test particle motion in the space-time of a Kerr black hole pierced by a cosmic string, *Phys. Rev. D* 82, 044024 (2010).
- [50] HARTMANN, H., KLEIHAUS, B., KUNZ, J., LIST, M.: Rotating boson stars in five dimensions, *Phys. Rev. D* 82, 084022 (2010).
- [51] KLEIHAUS, B., KUNZ, J., LÄMMERZAHL, C., LIST, M.: Boson shells harboring charged black holes, *Phys. Rev. D* 82, 104050 (2010).
- [52] HACKMANN, E., KAGRAMANOVA, V., KUNZ, J., LÄMMERZAHL, C.: Analytic treatment of complete and incomplete geodesics in Taub-NUT space-times, *Phys. Rev D* 81, 124044 (2010).
- [53] F. MERCATI, D. MAZON, G. AMELINO-CAMELIA, J.M. CARMONA, L. CORTES, J. INDURAIN, C. LÄMMERZAHL, G. M. TINO: Probing the quantum-gravity realm with slow atoms, *Classical and Quantum Gravity* 27 (21), 215003 (2010).
- [54] LOREK, D., LÄMMERZAHL, C., WICHT, A.: Orientational atom interferometers sensitive to gravitational waves, *Phys. Rev. A* 81, 023621 (2010).
- [55] MACIAS, A., CAMACHO, A., BARRAGÁN-GIL, L.F., LÄMMERZAHL, C.: Is the non-physical states conjecture valid? *Gen. Rel. Grav.* 42, 489 (2010).
- [56] HERRMANN, S., GÖKLÜ, E., MÜNTINGA, H., RESCH, A., VAN ZOEST, T., DITTUS, H., LÄMMERZAHL, C.: Testing Fundamental Physics with Degenerate Quantum Gases in Microgravity, *Microgravity Science and Technology* 22, 529 (2010).

- [57] VAN ZOEST, T., GAALOUL, N., SINGH, Y., AHLERS, H., HERR, W., SEIDEL, S. T., ERTMER, W., RASEL, E., ECKART, M., KAJARI, E., ARNOLD, S., NANDI, G., SCHLEICH, W.P., WALSER, R., VOGEL, A., SENGSTOCK, K., BONGS, K., LEWOCZKO-ADAMCZYK, W., SCHIEMANGK, M., SCHULDT, T., PETERS, A., KÖNEMANN, T., MÜNTINGA, H., LÄMMERZAHL, C., DITTUS, H., STEINMETZ, T., HÄNSCH, T.W., REICHEL, J.: Bose-Einstein Condensation in Microgravity, *Science* 328 (5985), 1540 (2010).
- [58] E. HACKMANN, V. KAGRAMANOVA, J. KUNZ, AND C. LÄMMERZAHL. Analytical solution of the geodesic equation in Kerr-(anti-) de Sitter space-time. *Phys. Rev., D* 81, 044020 (2010).
- [59] KEIL, R., THEIL, S.: Modelling the Attitude Noise of the Gaia Spacecraft. A Simplified Approach, *Space Science Reviews* 151, 197 (2010).
- [60] GROLL, R., RATH, H.J.: On Eulerian modelling of microchannel gas flows closing higher statistical moments of molecule velocity, *ASME* 54501, 407 (2010).
- [61] GROLL, R.: Statistical Eulerian diffusion approach of four-way-coupled multiphase systems, *Defect and Diffusion Forum* 297-301, 832 (2010).

A.2. BEITRÄGE ZU BÜCHERN UND TAGUNGSBÄNDEN (PROCEEDINGS)

2012

- [1] J. STEINHOFF, D. PUETZFELD: Influence of internal structure on the motion of test bodies in extreme mass ratio situations (MG13), *Proceedings of the 13th Marcel Grossman Meeting 2012*.
 - [2] N. GÜRLEBECK: Source integrals of asymptotic multipole moments, accepted for publication in the *Proceedings of the conference "Relativity and Gravitation - 100 Years after Einstein in Prague"*, June 25-29, 2012, Prague, arXiv:1302.7234 [gr-qc].
 - [3] N. GÜRLEBECK: Source Integrals for Multipole Moments in Static Spacetimes, contribution *Proceedings of the Thirteenth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity (Stockholm, July 1-7, 2012)*, arXiv:1303.1669 [gr-qc].
- ### 2011
- [4] HACKMANN, V. KAGRAMANOVA, J. KUNZ, AND C. LÄMMERZAHL. Analytic solution of the geodesic equations in higher-dimensional spherically symmetric space-times. In T. Damour, T. Jantzen, and R. Ruffini (Eds.), *Proceedings of the Twelfth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity*, page 1050, World Scientific, Singapore, 2011.
 - [5] E. HACKMANN, V. KAGRAMANOVA, J. KUNZ, AND C. LÄMMERZAHL. Complete set of analytic solutions for the geodesic equation in Plebanski--Demianski space-times. In T. Damour, T. Jantzen, and R. Ruffini (Eds.), *Proceedings of the Twelfth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity*, page 1841, World Scientific, Singapore, 2011.
 - [6] Y.N. OBUKHOV, D. PUETZFELD: Spinning particles in de Sitter spacetime, *Proceedings of the XIV-th Workshop on High Energy Spin Physics DSPIN-11*, Dubna, Russia, September 20-24, 2011.
 - [7] LOREK, D., LÄMMERZAHL, C., WICHT, A.: A new type of atom interferometry for testing fundamental physics, in Damour, T., Jantzen, T, Ruffini, R.

(Eds.): The Twelfth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, Paris, France, July 2009 (World Scientific, Singapore, 2011).

- [8] GÖKLÜ, E., LÄMMERZAHL, C., BREUER, H.-P.: Metric fluctuations and decoherence, in Damour, T., Jantzen, T, Ruffini, R. (Eds.): The Twelfth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, Paris, France, July 2009 (World Scientific, Singapore, 2011).
- [9] REICHEL, Y. AND DREYER, M. E.: Analysis of Critical Disturbances for Propellant Management Devices in Future Cryogenic Upper Stages, AIAA 2011-6036, 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, San Diego, California (August 2011).

2010

- [10] E. HACKMANN, C. LÄMMERZAHL, AND A. MACIAS. Complete classification of geodesic motion in fast Kerr and Kerr-(anti-)de Sitter space-times. In *New trends in statistical physics: Festschrift in honour of Leopoldo Garcia-Colin's 80 birthday*, pages 301-321, World Scientific, Singapore, 2010.
- [11] MILLER, R., JAVADI, A., MUCIC, N., MORADI, N., BORN, M., KRÄGEL, J., LOGLIO, G., PANDOLFINI, P., MAKIEVSKI, A.V., LESER, M.E., LIGGIERI, L., RAVERA, F., EIGENBROD, CH., MAWN, S., KOVALCHUK, V.I.: Capillary Pressure Studies of Adsorption Layers at Water/Hydrocarbon Interfaces, World Congress on Emulsions Lyon.
- [12] LÄMMERZAHL, C.: Testing basic laws of gravitation – Are our postulates on dynamics and gravitation supported by experimental evidence? in L. Blanchet, A. Spallicci, B. Whiting (Eds.), *Fundamental Theories of Physics 162* (Springer, Dordrecht 2011), p. 25.
- [13] BINDEL, D., BRUNS, R.: REIPOS - Relative Interferometric Position Sensor, in 61st International Astronautical Congress, Prague, Czech Republic, (2010).
- [14] ADAM, F., KOMANDURI, A. AND BINDEL, D.: Development of a Visual Navigation System for the Satellite Dynamic Simulator Model Luvex, in 61st International Astronautical Congress, Prague, Czech Republic, (2010).
- [15] KEIL, R., RISQUEZ, D., VAN LEEUWEN, F., BROWN, A.G.A.: An Attitude Model for the Spacecraft of the ESA Mission GAIA, in 61st International Astronautical Congress, Prague, Czech Republic, (2010).
- [16] KOMANDURI, A., BINDEL, D.: Guidance and Control Strategies for a Spacecraft to Rendezvous with an Non-Cooperative Spacecraft, in 61st International Astronautical Congress, Prague, Czech Republic, (2010).
- [17] ARANTES JR, G., DE FONSECA, I.M., BAINUM, P.M.: Visual Navigation System for Orbit and Attitude Determination of failed/dead Satellites on Orbit, in 61st International Astronautical Congress, Prague, Czech Republic, (2010).
- [18] RICKMERS, P., EIGENBROD, C., KLINKOV, K.: N-heptane: Comparison of spray autoignition experiments and single droplet simulations, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air, GT2010*, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, pp. 291.

A.3. HERAUSGEBERSCHAFTEN

2011

- [1] TINO, G., VELTRANO, F., LÄMMERZAHL, C.: Gravitational wave detection with atom interferometry, Special Issue, Gen. Rel. Grav. (June issue), (2011).

2010

- [2] RATH, H.: 25 Jahre Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation und 20 Jahre Fallturm Bremen, (ZARM, Universität Bremen 2010).

A.4. POPULÄRE ARTIKEL

- [1] LÄMMERZAHL, C.: Gravity Probe B: Detektivarbeit krönt Langzeitprojekt, Physik-Journal, Heft Juli 2011, Seite 19.
- [2] HERRMANN, S., LÄMMERZAHL, C.: Handwerkszeug Relativität, Physik-Journal, Heft November 2010, Seite 16.
- [3] LÄMMERZAHL, C.: Geheimnisvolle Quantenwelt, Festschrift 25 Jahre ZARM, Universität Bremen 2010, Seite 62.

➤ PROMOTIONEN AM ZARM, IM FACHBEREICH PRODUKTIONSTECHNIK

PROMOVIERENDE

TITEL DER ARBEIT

Eva Hackmann

»Geodesic equations in black hole space-times with cosmological constant«

Thorben Könemann

»Konzeption, Entwicklung und Umsetzung von atomoptischen Fallturm-experimenten für den Einsatz unter Schwerelosigkeit am Fallturm Bremen«

Peter Rickmers

»Experimental Investigation of the Spray Autoignition of n Heptane in a Jet in Cross Flow Configuration and Comparison to Single Droplet Ignition Simulations«

Nicolas Fries

»Capillary transport processes in porous materials – experiment and model«

Frank Giese

»Entwicklung und Charakterisierung keramischer Porenabsorber zu Dämpfung thermoakustischer Instabilitäten«

Ananth S. Komanduri

»Guidance and Control of a Spacecraft to Rendezvous and Dock with a Non-cooperative Target«

Tim Arndt

»Sloshing of Cryogenic Liquids in a Cylindrical Tank under Normal Gravity«

Gilberto Arantes Jun.

»Rendezvous with a Non-cooperating Target«

Jörg Klatte

»Capillary dominated flows along interior corners«

Benny Rievers

»High Precision modelling of thermal perturbations with application to Pioneer 10 and Rosetta«

Manfredo Reimert

»Characterization of the Autoignition of Single Droplets of Fischer-Tropsch Fuels and Development of Surrogates«

Stefan Lösch

»Agglomeration von Nickel-Nanopartikeln in einem thermisch erzeugten Nickel-Aerosol unter Gravitation und Mikrogravitation«

TECHNIK, UNIVERSITÄT BREMEN

JAHR	ERSTGUTACHTER	ZWEITGUTACHTER	BETREUER
2010	Prof. Claus Lämmerzahl	Prof. Peter Richter	Claus Lämmerzahl
2010	Prof. Hansjörg Dittus	Prof. Claus Lämmerzahl	Hansjörg Dittus
2010	Prof. Hans Rath	Prof. Friedrich Dinkelacker	Hans Rath
2010	Prof. Michael Dreyer	Prof. David Quéré	Michael Dreyer
2011	Prof. Hans Rath	Prof. Kurosch Rezwan	Hans Rath
2011	Prof. Hans Rath	Prof. Hansjörg Dittus	Hans Rath
2011	Prof. Michael Dreyer	Prof. Emil Hopfinger	Michael Dreyer
2011	Prof. Hans Rath	Prof. I. M. De Fonseca	Hans Rath
2011	Prof. Hans Rath	Prof. Michael Dreyer	Hans Rath
2011	Prof. Hans Rath	Prof. Hansjörg Dittus	Claus Lämmerzahl
2012	Prof. Hans Rath	Prof. Friedrich Dinkelacker	Hans Rath
2012	Prof. M. Busse	Prof. Claus Lämmerzahl	M. Busse

➔ INDEX

SEITE 17 UND 19 QUANTUS UND PRIMUS

FÖRDERUNG

Die QUANTUS- und PRIMUS-Kollaborationen werden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter den Förderkennzeichen 50WM1135 und 50WM1142.

PARTNER

- Institut für Quantenoptik (IQO), Universität Hannover
- Humboldt Universität zu Berlin
- Ferdinand Braun-Institut, Berlin
- Universität Hamburg
- Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ), Garching
- Universität Ulm
- TU Darmstadt
- University of Birmingham
- Menlo-Systems
- Laser-Zentrum Hannover
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Raumfahrtsysteme, Bremen (Integration, Rakete)
- ZARM, Universität Bremen

EINZELNE PROJEKTE

Die im Rahmen der QUANTUS-Kollaboration (Federführung IQO) und der PRIMUS-Kollaboration (Federführung ZARM) bearbeiteten Projekte sind:

- QUANTUS-I Apparat: Realisierung eines Bose-Einstein-Kondensats und Interferometrie im freien Fall im Fallturm
- QUANTUS-II Apparat: Erzeugung eines Bose-Einstein-Kondensats und Interferometrie mit zwei atomaren Spezies
- MAIUS: Realisierung eines BECs und Interferometrie auf einer suborbitalen Rakete.
- PRIMUS II: Test des Äquivalenzprinzips mit einem zwei-Spezies-Atominterferometer.
- ATUS: Theoretische Modellierungen für PRIMUS.

SEITE 15 MICROSCOPE

FÖRDERUNG

Das Projekt MICROSCOPE wird vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt(DLR) gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter den Förderkennzeichen 50 OY 0801 bzw. 50 OY 1305.

PARTNER

- The French Aerospace Lab - ONERA
- L'Observatoire de la Côte d'Azur - OCA
- Centre national d'études spatiales - CNES
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig – PTB

VERÖFFENTLICHUNGEN

REMER, S., SELIG, H., LIST, M., DITTUS, H. Modelling and simulation of the space mission MICROSCOPE, Acta

Astronautica 68, 2011.

SELIG, H., LÄMMERZAHL, C. Sensor Calibration for the MICROSCOPE Satellite Mission, Spaceflight Mechanics 148, 2013.

SEITE 89 BIO-SPRAY

FÖRDERUNG

DLR-Raumfahrtmanagement unter FKZ: 50WM0844

PARTNER

Institut für Photonische Technologien, IPHT, Jena

VERÖFFENTLICHUNGEN

EIGENBROD, C., KLINKOV, K., REIMERT, M., RICKMERS, P. Application of a "Spraylet" Model to the Simulation of Fuel Spray Autoignition. ICLASS 2012, 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Heidelberg, 2012.

KLINKOV, K., EIGENBROD, CH., GIESE, F., RICKMERS, P., REIMERT, M. Simulation of Spray Autoignition Introducing "Spraylets". In ASME, ed. IGTI Turbo-Expo, Power for Land, Sea and Air, Copenhagen, 2012.

SEITE 87 ADL – ADVANCED DISK LASER

FÖRDERUNG: DLR-Raumfahrtmanagement unter FKZ: 50WP0004, 50WP0007, 50WP0307

AUFTRAGNEHMER

Institut für Photonische Technologien, IPHT, Jena

PARTNER

Institut für Strahlwerkzeuge, Universität Stuttgart

VERÖFFENTLICHUNGEN

PAA, W., WAGNER, V., KLINKOV, K., EIGENBROD, CH. KHz Combustion Diagnostics by Means of an Onboard Drop Capsule Laser System. COSPAR 2010 Bremen, 2010

SEITE 87 DROPLET-DROPLET INTERACTIONS

FÖRDERUNG

DLR-Raumfahrtmanagement unter FKZ: 50WM1125

PARTNER

Institut für Photonische Technologien, IPHT, Jena

VERÖFFENTLICHUNGEN

EIGENBROD, C., KLINKOV, K., FACHINI, F. On the Effect of Pressure Oscillations on Droplet Autoignition. In ASME, ed. IGTI Turbo-Expo, Power for Land, Sea and Air, Vancouver, 2011.

REIMERT, M. Characterization of the Autoignition of Single Droplets of Fischer-Tropsch Fuels and Development of Surrogates. ZARM, p. 145 (University of Bremen, 2012).

SEITE 89 BIO-KEROSIN

FÖRDERUNG: Das Land Bremen und die Europäische Union unter FKZ: FV202.

PARTNER: SAACKE GmbH Bremen

VERÖFFENTLICHUNGEN

EIGENBROD, C., GIESE, F., REIMERT, M., RICKMERS, P., KLINKOV, K. Autoignition properties of fossil- and GTL-kerosene and its model fuel. In ASME, ed. IGTI Turbo-

Expo 2013, Power for Land, Sea and Air, San Antonio, Texas, 2013.

SEITE 91 SCHALLABSORBIERENDE HITZESCHUTZ-KERAMIK

FÖRDERUNG: Im Rahmen des Graduiertenkollegs Pore-Net mit der Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG

PARTNER: CERAMICS, Universität Bremen

VERÖFFENTLICHUNGEN

GIESE, F., EIGENBROD, CH., KOCH, D. A Novel Production Method for Porous Sound-Absorbing Ceramic Material for High-Temperature Applications. Int. J. Appl. Ceram. Technol., 2011, 8(3), 646-652.

GIESE, F. Entwicklung und Charakterisierung keramischer Porenabsorber zur Dämpfung thermoakustischer Instabilitäten. ZARM, p. 115 (Universität Bremen, 2011).

RIES, H.C., CARLESSO, M.V., EIGENBROD, C., KROLL, S., REZWAN, K. On the Performance of Porous Sound Absorbent Ceramic Lining in a Combustion Chamber Test Rig. In ASME, ed. IGTI Turbo-Expo 2013, Power for Land, Sea and Air, San Antonio, Texas, 2013.

SEITE 79 STERN

FÖRDERUNG

DLR-STERN (Studentische Experimentalraketen) gefördert durch das DLR-RM (Raumfahrt Management) unter der Projekt Nummer 50RL1253.

Veröffentlichungen

K. LAPPÖHN, D. REGENBRECHT, D. BERGMANN, M. SCHMID, P. RICKMERS, "STERN – Raketenprogramm für Studenten",

Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2012, Berlin

P. RICKMERS, M. DRINKWITZ AND F. ORLOWSKI, "The propulsion system of the ZEpHyR - ZARM Experimental Hybrid Rocket: A contribution to the DLR STERN Project by the University of Bremen", EUCASS 2013, München

SEITE 80 PULCHER PROJEKT

Das PulCheR Projekt wird durch die EU im 7. Rahmenprogramm (FP7/2007-2013) mit der Fördernummer n°313271 unterstützt.

SEITE 101 PROJEKT "KAPILLARTRANSPORT ZWISCHEN PARALLELEN PERFORIERTEN PLATTEN UNTER MIKROGRAVITATION" (PPP)

FÖRDERUNG

Gefördert von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 50 RL 0921. Das Experiment wurde im Rahmen des deutsch-französischen Projektes COMPERE durchgeführt.

SEITE 103 DEFORMATION FREIER FLÜSSIGKEITSOBERFLÄCHEN

FÖRDERUNG

Gefördert von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 50 RL 0921.

SEITE 105 FALLTURMEXPERIMENTE MIT KRYOGENEN FLÜSSIGKEITEN

FÖRDERUNG

Gefördert von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 50 RL 0921.

Veröffentlichungen

KULEV, N., DREYER, M. E.: , Drop Tower Experiments on Non-isothermal Reorientation of Cryogenic Liquids, *Microgravity Sci. Technol.* 22 (4), 463-474 (2010)

SEITE 107 DAS CCF EXPERIMENT AUF DER INTERNATIONALEN RAUMSTATION ISS

FÖRDERUNG

Gefördert von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 50 WM 1145. Das Experiment wird zusammen mit unserem amerikanischen Partner Prof. Dr. Mark Weislogel von der Portland State University in Oregon durchgeführt. Wir bedanken uns für die hervorragende Unterstützung durch die NASA (National aeronautics and space administration)

Veröffentlichungen

CANFIELD, P. J., BRONOWICKI, P. M., CHEN, Y., KIEWIDT, L., GRAH, A., KLATTE, J., JENSON, R., BLACKMORE, W., WEISLOGEL, M. M., DREYER, M. E.: The capillary channel flow experiments on the International Space Station: experiment set-up and first results, *Exp. Fluids* 54 (1519), 1-14 (2013)

GRAH, A., DREYER, M. E.: Dynamic stability analysis for

capillary channel flow: One-dimensional and three-dimensional computations and the equivalent steady state technique, *Phys. Fluids* 22, 014101 (2010)

GRAH, A., HAAKE, D., ROSENDAHL, U., KLATTE, J., DREYER, M. E.: Stability limits of unsteady open capillary channel flow, *J. Fluid Mech.* 600, 271-289 (2008)

SEITE 109 STABILITÄTEN FREIER FLÜSSIGKEITSOBERFLÄCHEN BEI ROTATION

FÖRDERUNG

Gefördert von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 50 RL 0921.

Veröffentlichungen

REICHEL, Y., DREYER, M. E.: A Study of Rotating Menisci in a Generic Propellant Management Device, *AIAA Journal*, (DOI: 10.2514/1.J052461), Accepted (2013)

SEITE 115 FALLTURM BREMEN

FÖRDERUNG

Die wissenschaftliche Nutzung des Fallturm Bremen wird gefördert durch das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 50 WF 1102 und durch die Europäische Raumfahrt Agentur ESA.

ZENTRUM FÜR ANGEWANDTE RAUMFAHRTTECHNOLOGIE UND MIKROGRAVITATION

AM FALLTURM
28359 BREMEN
GERMANY

WWW.ZARM.UNI-BREMEN.DE