

SFB-TRANSREGIO 40: TECHNOLOGISCHE GRUNDLAGEN FÜR DEN ENTWURF THERMISCH UND MECHANISCH HOCHBELASTETER KOMPONENTEN ZUKÜNFTIGER RAUMTRANSPORTSYSTEME – MOTIVATION UND STRUKTUR

N. A. Adams und C. Stemmer, Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik, Technische Universität München, Boltzmannstrasse 15, 85748 Garching, Deutschland

R. Radespiel, Institut für Strömungsmechanik, Technische Universität Braunschweig, Bienroder Weg 3, 38106 Braunschweig, Deutschland

T. Sattelmayer, Lehrstuhl für Thermodynamik, Technische Universität München, Boltzmannstrasse 15, 85748 Garching, Deutschland

W. Schröder, Lehrstuhl für Strömungslehre und Aerodynamisches Institut, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Wüllnerstr. 5a, 52062 Aachen, Deutschland

B. Weigand, Institut für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart

Zusammenfassung

Der Sonderforschungsbereich-Transregio 40 (TRR 40) befasst sich mit den Hauptkomponenten chemischer Raketenantriebe und ihrer Integration in das Gesamtsystem. Trotz intensiver Erforschung luftatmender Hochgeschwindigkeitsantriebe werden Raumtransportsysteme der nächsten Generation chemische Raketenantriebe nutzen, da diese Antriebsart auf absehbare Zeit den besten Kompromiss zwischen Entwicklungs- und Herstellungsaufwand und bereitgestellter Leistung bietet. In diesem seit Juli 2008 durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten transregionalen Sonderforschungsbereich haben sich 5 Universitätsstandorte mit Einrichtungen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt und der Astrium Space Transportation GmbH zusammengeschlossen, um die für diese Antriebstechnologie relevante Grundlagenforschung auf den Gebieten der Strukturkühlung, der Heckströmungen, der Thermofluidodynamik und der Fluid-Struktur-Wechselwirkung gemeinsam voranzutreiben. Durch den Zusammenschluss im TRR 40 soll die Position der beteiligten Einrichtungen im europäischen Wettbewerb um Forschung und Technologie nachhaltig gestärkt werden. In dem vorliegenden Artikel werden Motivation und Konzept des TRR 40 vorgestellt und die in der ersten Förderperiode erzielten wissenschaftlichen Fortschritte im Kontext des Gesamtkonzepts dargestellt. Detaillierte Darstellungen der erzielten Ergebnisse sind in den weiteren Artikeln zu den einzelnen Teilbereichen zu finden.

1. MOTIVATION

Der autonome Zugang zum erdnahen Weltraum und die technologische Möglichkeit des sicheren und kostengünstigen Transports von Nutzlasten in den Erdorbit sind Voraussetzungen für die Realisierung zahlreicher Hochtechnologieentwicklungen [1]. Daher wird im deutschen Raumfahrtprogramm [2] die Erhaltung und Sicherung der europäischen Raumtransportfähigkeit als eines der wichtigsten Ziele genannt und betont, dass nur eine Teilnahme an den die Raumfahrt ermöglichenden Technologien in europäischen Programmen eine signifikante Mitspra-

che und Mitgestaltung bei der Raumfahrtnutzung verspricht.

Raumtransportsysteme der nächsten Generation, ob (vollständig oder teilweise) wiederverwendbar oder nicht, werden Raketenantriebe nutzen, da diese Antriebe auf absehbare Zeit den besten Kompromiss zwischen Entwicklungs- und Herstellungskosten einerseits und Leistung andererseits bieten. Zum Erreichen des Missionsziels ist der atmosphärische Anteil der Aufstiegstrajektorie minimal, und somit stünde Umgebungsluft als Oxidator nur über einen sehr begrenzten Teil der Trajektorie zur Verfügung.

Bei wiederverwendbaren Systemen kommt das Problem des mehrfachen Einsatzes der Triebwerke und des (teilweisen) atmosphärischen Wiedereintritts hinzu. Mittel- bis langfristige Planungen der führenden Weltraumnationen (U.S.A., Russische Föderation, Europäischer Staatenverbund) stützen sich klar auf chemische, nicht-luftatmende Raketenantriebe als Hauptantriebseinheit zivil genutzter Raumtransportsysteme. Da im zivilen Bereich Lagerungsfähigkeit von Antrieben keine besondere Relevanz hat, spielen feste Treibstoffe wegen ihrer weniger kontrollierbaren Verbrennung, Schubschwankungen infolge strömungsmechanischer Instabilitäten und ihrer schlechteren Umweltverträglichkeit nur eine untergeordnete Rolle, z.B. als Start-Hilfsraketen. Da insbesondere in den U.S.A. der Aufbau eines privatwirtschaftlichen Launcher-Sektors forciert wird, ist es für das wirtschaftliche Überleben europäischer Hersteller notwendig, im technologischen Wettbewerb bestehen zu können. Zu diesem Zweck muss die wissenschaftliche Grundlage der Antriebstechnologie zukünftiger ziviler Raumtransportsysteme langfristig in der Forschungslandschaft verankert werden.

Bei näherer Betrachtung der Untersuchungsergebnisse zu dem Unfall des amerikanischen Space Shuttle Columbia in 2003 [3] und zu dem Verlust einer leistungsgesteigerten Version der Ariane 5 [4] zeigt sich, dass in beiden Fällen Materialversagen durch extreme thermische Belastung auftrat, die mittels der verfügbaren Simulationswerkzeuge nicht vorhergesagt werden konnte. Konkret wurden im Untersuchungsbericht [4] zwei zentrale Ursachen für den Unfall herausgestellt:

- eine übermäßig starke thermomechanische Belastung der Schubdüse,
- eine ungenaue Vorhersage der auf die Schubdüse wirkenden mechanischen und thermischen Lasten als Grundlage der Konstruktion.

Kritische, thermisch und mechanisch hochbelastete Komponenten raketengetriebener Raumtransportsysteme sind Brennkammer, Schubdüse und Heckbereich, wobei die Strukturkühlung wesentlich für die Funktionalität dieser Komponenten ist. Wegen ihrer zentralen Bedeutung für die Funktion des Gesamtsystems sind diese Komponenten auch diejenigen mit dem größten Potential zur Effizienzsteigerung. Da alle Komponenten in enger, direkter Wechselwirkung miteinander stehen, setzt die Optimierung einer Komponente die Berücksichtigung der Beeinflussung aller anderen Komponenten voraus. Daher ist es

nicht sinnvoll, einzelne Komponenten von den anderen losgelöst zu betrachten. Eine solche Vorgehensweise würde zu groben Vernachlässigungen führen und das Ergebnis in Frage stellen. Soll die Grundlagenforschung auf dem Gebiet der thermisch und mechanisch hochbelasteten Komponenten raketengetriebener Raumtransportsysteme vorangetrieben werden, kann dies nur in einem koordinierten Forschungsprogramm geschehen. Dies ist die zentrale Motivation für den Sonderforschungsbereich-Transregio (TRR) 40.

Konzeptionell vergleichbar zum TRR 40 sind zwei Verbünde unter dem Dach des durch das Department of Energy der U.S.A. finanzierten Predictive Science Academic Alliance Program (PSAAP)¹, nämlich PECOS (Predictive Engineering and Computational Sciences) der University of Texas in Austin² und das Zentrum „Predictive Simulations of Multi-Physics Flow Phenomena, with Application to Integrated Hypersonic Systems“ der Stanford University³. Während das zentrale Thema von PECOS der Atmosphären-Eintritt von Raumflugkörpern ist, widmet sich das Zentrum an der Stanford University Hyperschall-Atmosphärenflugzeugen. Beide Anwendungen sind zum Teil durch militärische Anwendungen motiviert. Ein PSAAP Projekt wird mit jährlich bis zu 4 M\$ über 5 Jahre finanziert. Die tatsächlich finanzierten Projekte liegen deutlich unterhalb dieser Grenze und sind bezüglich des öffentlichen Gesamtfördervolumens vergleichbar mit dem des TRR 40. Interessant zu beobachten ist, dass PSAAP Zentren prinzipiell an einem Universitätsstandort konzentriert sind, jedoch am Standort fehlende Expertise durch Einbinden weiterer Universitäten ergänzt werden kann. Der Vorteil des SFB-Transregio-Konzepts der Deutschen Forschungsgemeinschaft ist, dass es besser möglich ist, nationale Kompetenzen zu bündeln, ohne jedoch eine unüberschaubare Vielzahl von Standorten einzubinden. Desweiteren ist zu betonen, dass Sonderforschungsbereiche aus der wissenschaftlichen Gemeinschaft heraus entwickelt und vorgeschlagen werden und daher thematisch weniger stark von dritter Seite beeinflusst werden als dies für die im Rahmen der „Advanced Simulation and Computing Initiative“ der „National Nuclear Security Administration“ der U.S.A. finanzierten Zen-

¹ <http://www.sandia.gov/NNSA/ASC/univ/psaap.html>,
<http://www.federalgrantswire.com/predictive-science-academic-alliance-program-psaap.html>

² <http://pecos.ices.utexas.edu/>

³ <http://psaap.stanford.edu/>

tren der Fall ist.

2. KONZEPT

Der TRR 40 wurde nach zweistufiger Beratung bzw. Begutachtung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) am 1. Juli 2008 für eine erste Förderperiode von vier Jahren eingerichtet. Zwei erfolgreiche Wiederbegutachtungen vorausgesetzt, kann der TRR 40 für zwei weitere, jeweils vierjährige Perioden gefördert werden.

Die übergreifenden Ziele des TRR 40 orientieren sich an den langfristigen Planungen der European Space Agency zu den Raumtransportsystemen der nächsten und übernächsten Generation [5]. Diese Systeme sollen ein breites Anforderungsspektrum abdecken können, sind daher modular aufgebaut und benötigen mehrfach zündbare Oberstufentriebwerke. Neben der Effizienzsteigerung der primären Antriebssysteme durch den Einsatz neuer Technologien rücken auch Forderungen nach besserer Umweltverträglichkeit des Gesamtsystems in den Vordergrund.

Die wichtigsten langfristigen Ziele des TRR 40 sind:

- Grundlagen neuer Schubdüsenkonzepte,
- Modellierung und Simulation alternativer Treibstoffe und Brennkammeroptimierung,
- Entwicklung neuer Methoden für die Kontrolle der Heckströmung,
- Entwicklung innovative Kühlmethoden für Antriebskomponenten.

Forschungsschwerpunkte, die eine besonders intensive Kooperation erfordern, werden in den Teilbereichen des TRR 40 zusammengefasst. Diese Forschungsschwerpunkte können anhand der Untereinheiten des Antriebssystems abgeleitet werden, siehe BILD 1.

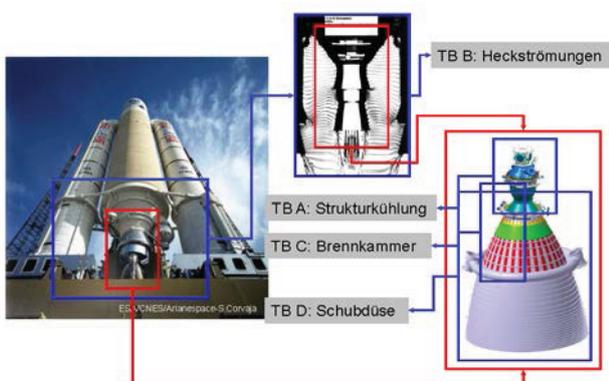


BILD 1: Teilbereiche des TRR 40.

Wichtigstes Element ist die Schubkammer, die aus Brennkammer und Schubdüse besteht. Mit der Thermofluidodynamik der Brennkammer, BILD 2, befasst sich der **Teilbereich (TB) C**. Im Vordergrund stehen in der ersten Förderperiode die Untersuchung von Mischungs- und Verbrennungsvorgängen im Bereich der Treibstoffinjektoren, sowie die Untersuchung thermoakustischer Instabilitäten.

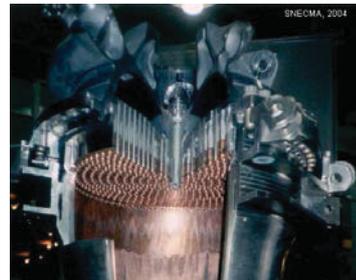


BILD 2: Ausschnitt der Brennkammer eines Vulcain 2 Triebwerkes.

Die mechanisch und thermisch am stärksten belastete Komponente ist die Schubdüse. Der mechanischen und thermischen Wechselwirkung mit der Strömung in der Düse widmet sich der **Teilbereich D**. Ziel der ersten Förderperiode ist die Etablierung detaillierter Simulationswerkzeuge für die Fluid-Struktur-Wechselwirkung und für die Schadensvorhersage der Düsenstruktur, wobei sowohl hochdetaillierte Simulationsverfahren zur physikalischen Untersuchung von Wechselwirkungen als auch effiziente Verfahren, die sich als Vorhersagewerkzeuge für die Entwicklung eignen, betrachtet werden. Abgestützt werden diese Entwicklungen auf speziell entworfene Referenzexperimente.

Die Schubkammer ist in das Heck des Raumtransportsystems integriert. Daher steht die Düsenströmung mit der Heckströmung in Wechselwirkung. Die Heckströmung selbst ist vergleichsweise komplex und zeigt insbesondere im schallnahen Geschwindigkeitsbereich der Aufstiegstrajektorie Buffeting und hohe instationäre Wärmelasten. Effiziente numerische Werkzeuge, die sich zur Entwurfsoptimierung und Ableitung von Strömungsbeeinflussungsmaßnahmen eignen, sind bisher nicht in der Lage, diese Effekte zuverlässig darzustellen. Gegenstand der Forschung des **Teilbereichs B** in der ersten Förderperiode ist die Verbesserung von Vorhersagewerkzeugen anhand einer Reihe generischer Referenzexperimente, welche die relevanten Geschwindigkeitsbereiche der Aufstiegstrajektorie repräsentieren.

Eine für alle Antriebskomponenten zentrale Problematik sind die Strukturkühlung und der Wärmeübergang. Daher ist der **Teilbereich A** dieser Thematik gewidmet. Sowohl bereits angewendete Methoden und Verfahren (Filmkühlung, Resonatoren) als auch neuartige Ansätze (Transpirations- und Effusionskühlung) werden experimentell und numerisch untersucht.

Um sicher zu stellen, dass neu gewonnene Erkenntnisse in den Entwicklungsprozess einfließen und dass Anforderungen aus dem Entwicklungsprozess an die Teilprojekte kommuniziert werden, wurde der verbundartige, kooperative **Teilbereich K „Schubkammer“** eingerichtet, der in der ersten Förderperiode aus 2 Teilprojekten bestehen, die im Verbund mit der Astrium Space Transportation durchgeführt werden.

Abstrahiert kann man die inhaltliche Struktur des TRR 40 schalenartig darstellen, BILD 3.

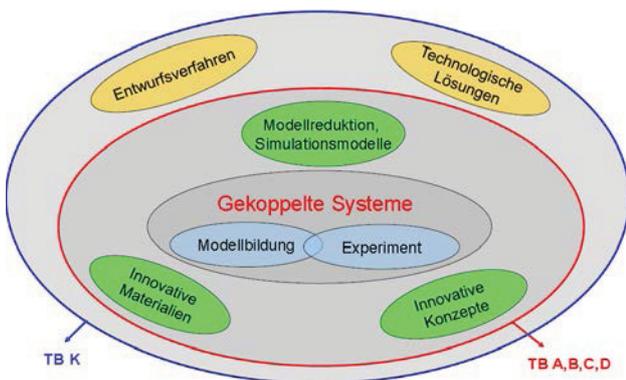


BILD 3: Inhaltliche Strukturierung des TRR 40.

Die Grundlagen gekoppelter Systeme, mit dem konkreten Thema mechanisch und thermisch hochbelasteter Strukturen, bilden den Kern. Anhand generischer Experimente werden detaillierte mathematische und numerische Modelle für diese gekoppelten Systeme entwickelt. Gestützt auf diese Modellbildung werden vereinfachte Simulationsmodelle entwickelt, die sich für die numerische Vorhersage komplexer Konfigurationen eignen. Ebenfalls werden neuartige Lösungsansätze, z.B. für Kühlmaßnahmen, entwickelt und der Einsatz innovativer Materialien untersucht. Das Schubkammersystem wird auf der äußeren, umfassenden Schale betrachtet. Hier fließen die neu gewonnen Erkenntnisse in die Verbesserung von Entwicklungswerkzeugen und in neue technologische Lösungen ein.

3. FORSCHUNGSPROGRAMM

Forschungsfortschritte des TRR 40 werden regel-

mäßig in Jahresberichten dokumentiert, die auf Anfrage bei der Geschäftsstelle erhältlich sind⁴ [6,7].

Grundlagen neuer Schubdüsenkonzepte:

Mit den Forschungsaktivitäten im Teilbereich D „Schubdüse“ sollen Grundlagen für die Entwicklung neuer Schubdüsenkonzepte gewonnen werden. Auf zwei Ebenen werden numerische Vorhersagewerkzeuge entwickelt. Grundlegende Erkenntnisse bezüglich relevanter mechanischer und thermischer Wechselwirkungen und Lebensdauer werden durch einen gemeinsamen experimentellen und numerischen Ansatz gewonnen, siehe als Beispiel BILD 4. Aus diesen grundlegenden Erkenntnissen werden vereinfachte numerische Modelle abgeleitet, die im Entwicklungsprozess eingesetzt werden können. Als neues Schubdüsenkonzept wird die sogenannten „dual-bell“-Düse in einem Teilprojekt des Teilbereichs K experimentell untersucht. Weitere Informationen zu dieser Thematik sind in dem Beitrag „SFB Transregio 40: Schubdüse“ zu finden.

Modellierung und Simulation alternativer Treibstoffe und Brennkammeroptimierung:

Mit den Forschungsaktivitäten im Teilbereich C „Brennkammer“ sollen Grundlagen für die Verbesserung von Einspritz-, Vermischungs- und Verbrennungsvorgängen gewonnen werden. Die Verbindung von Realgas-Thermodynamik für die überkritische Brennstoffeinspritzung mit Feinstrukturmodellierung und Verbrennungsmodellierung stellt eine besondere Herausforderung dar.

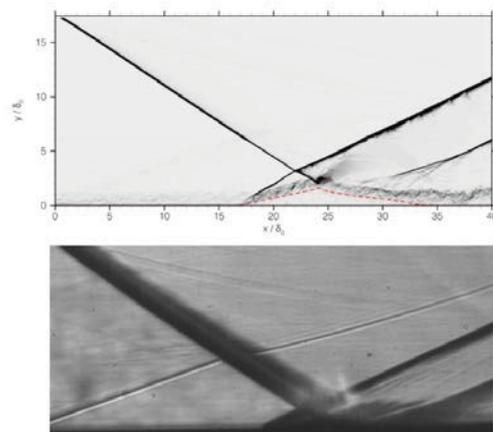


BILD 4: Vergleich zwischen LES und Experiment für die turbulente Stoß-Grenzschicht-Wechselwirkung.

⁴ sfbtr40@aer.mw.tum.de

Eine weitere Komplexität tritt durch den Phasenübergang beim unterkritischen Einspritzen auf und erfordert eine mehrstufige, auf Referenzexperimente basierte, Modellierungsstrategie. Darüber hinaus sind zentrale Themen die Untersuchung thermofluidodynamischer Instabilitäten und die Verbrennungsmodellierung alternativer Treibstoffe. Zusätzlich zu den Aktivitäten in den einzelnen Teilprojekten des Teilbereiches C wurde in einer zentral koordinierten Aktivität die turbulente Strömung von überkritischem Wasserstoff in einem Kühlkanal untersucht [8]. Solche Large-Eddy-Simulationen können wichtige Aussagen zu räumlichen und zeitlichen Wärmelasten für die Strukturmodellierung liefern, siehe BILD 5. Weitere Informationen zu dieser Thematik sind in dem Beitrag „SFB Transregio 40: Brennkammer“ zu finden.



BILD 5: Wirbel im Kühlkanal dargestellt durch Isoflächen des sogenannten Q-Kriteriums. Einfärbung der Isoflächen gemäß der lokalen dimensionslosen Temperatur.

Entwicklung neuer Methoden für die Kontrolle der Heckströmungen:

Mit den Forschungsaktivitäten im Teilbereich B „Heckströmungen“ wird das grundlegende Strömungsverhalten im Heckbereich einer Rakete mit integriertem Antrieb untersucht. Wesentliche Grundlage dieser Untersuchungen sind eine Reihe spezifisch definierter Referenzexperimente über dem relevanten Geschwindigkeitsbereich (atmosphärischer Teil der Trajektorie). Anhand dieser Experimente werden Simulationsverfahren, die auf den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen beruhen oder mit Large-Eddy-Simulation gekoppelt werden weiterentwickelt. Ein wichtiger methodischer Baustein ist die Entwicklung einer Particle-Image-Velocimetry-Methode für Hochgeschwindigkeitsströmungen, siehe BILD 6. Weitere Informationen zu dieser Thematik sind in dem Beitrag „SFB Transregio 40: Heckströmungen“ zu finden.

Entwicklung innovativer Kühlmethoden für Antriebskomponenten:

Mit den Forschungsaktivitäten im Teilbereich A „Strukturkühlung“ werden Maßnahmen zur Optimierung der Kühlung thermisch hochbelasteter Strukturen untersucht. Auch hier ist Grundvoraussetzung die Entwicklung geeigneter numerischer Vorhersagewerkzeuge anhand generischer Referenzexperimente. Sowohl kann die Filmkühlung anhand verfügbarer Werkzeuge zur Verfahrensoptimierung nicht hinreichend genau vorhergesagt werden, als auch sind für innovative Konzepte, wie Effusions- oder Transpirationskühlung, Verfahrensverbesserungen notwendig.

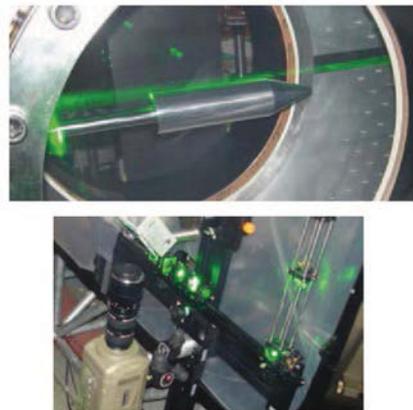


BILD 6: PIV Messungen im Trisonischen Windkanal München.

Best-Practice Turbulenzmodellierung:

Ein zentrales, die Teilbereiche übergreifendes Anliegen ist die Modellierung turbulenter Strömungen in Antriebseinheiten eines Raumtransportsystems. Wegen der vorliegenden Strömungszustände erfordert diese die Berücksichtigung zusätzlicher Komplexität im Vergleich zu klassischen turbulenten Niedrig- oder Hochgeschwindigkeitsströmungen:

- Kompressibilitätseffekte,
- Fluid-Struktur-Wechselwirkung,
- Stoß-Turbulenz-Wechselwirkung,
- Realgas- und Hochtemperatureffekte,
- Chemisches und thermisches Nichtgleichgewicht,
- Verbrennung,
- Mehrphasenströmung mit Phasenübergang,
- Oberflächeneffekte (thermisch, katalytisch, Rauigkeit),
- Strahlungswärmetransport.

Oft treten diese Phänomene kombiniert auf. Laminar-turbulente Transition ist nur von begrenzter Relevanz für Strömungskonfigurationen des TRR 40. Lediglich für generische Kühlkonfigurationen werden transitionelle Strömungen hinsichtlich großskaliger Mischungsvorgänge untersucht. Alle anderen Konfigurationen können als turbulent angenommen werden.

Im TRR 40 werden zwei Ansätze zur Simulation turbulenter Strömungen verfolgt: (i) der statistisch-gemittelte Ansatz RANS (Reynolds-gemittelte Navier-Stokes Gleichungen), (ii) der gefilterte Ansatz LES (Large-Eddy Simulation). LES wird in solchen Fällen angewendet, bei denen RANS-Annahmen nicht anwendbar sind oder zu fehlerhaften Ergebnissen führen.

Ziel dieser Aktivität ist es, eine Richtlinie für die Validierung und den Einsatz von RANS und LES Modellen für die Berechnung turbulenter Strömungen in thermisch und mechanisch hochbelastete Komponenten raketentriebener Raumtransportsysteme zu erstellen. Dazu werden zwei Validierungsstufen unterschieden. Stufe A betrifft die Validierung für generische Testfälle mit schrittweise zunehmender Komplexität, anhand derer physikalische Konsistenz des Modells nachgewiesen werden kann. Stufe B betrifft die Analyse der Vorhersagegenauigkeit des Modells für komplexe Strömungen und dient auch zur Kalibration von Modellparametern. Für beide Stufen werden relevante generische Konfigurationen definiert, anhand derer eine Validierung von Modellen durch einen Vergleich mit Experiment oder direkter numerischer Simulation, oder durch einen Quervergleich verschiedener Modelle bzw. numerischer Verfahren erfolgt. Die Ergebnisse werden in einem allgemein zugänglichen Bericht [9] zusammengefasst, der Hinweise zur Auswahl und zur Validierungsvorgehensweise enthält. Referenzdaten werden auf der Website des TRR 40 veröffentlicht.

4. AUSBLICK

In 2012 wird der TRR 40 von der DFG wiederbegutachtet und bei positivem Ergebnis dem Senat der DFG zur Weiterförderung vorgeschlagen. In der dann folgenden zweiten Förderperiode werden die Forschungsaktivitäten zunehmend hinsichtlich der integrierten Betrachtung der Schubkammer (Brennkammer, Schubdüse) fokussiert. Dazu wird der Teilbereich K um Projekte, welche Aspekte eines Schubkammer-Demonstrator-Systems betrachten

erweitert. Projekte, die mit der Entwicklung von Vorhersagewerkzeugen befasst sind, orientieren sich nun an den Vorgaben dieses Systems. Das abschließende Ziel nach einer möglichen dritten und letzten Förderperiode ist der Nachweis einer integrierten Simulationsfähigkeit durch den Verbund TRR 40 einer subskaligen Demonstrator-Schubkammer mit validierten und der Komplexität der jeweiligen Komponente angepassten numerischen Werkzeugen.

5. DANKSAGUNG

Die Forschungsarbeiten im TRR40 werden seit dem zweiten Halbjahr 2008 durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft ermöglicht. Signifikante Beteiligungen darüber hinaus erfolgen durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und durch Astrium Space Transportation.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] White paper. Space: A new frontier for an expanding union. An action plan for implementing the European space policy. 2003, European Community.
- [2] Deutsches Raumfahrtprogramm, 2001, Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- [3] Columbia Accident Report, 2003, National Aeronautics and Space Administration.
- [4] Report of the Inquiry Board on Arianespace Flight 157, 2003, European Space Agency.
- [5] FLPP NGL Preparation - Programme Perspectives, G. Pilchen, J. Kaufmann, ESA Launcher Directorate, 7th ESA Aerothermodynamics Conference, Brugge, 2011
- [6] SFB/TRR40 Annual Report 2009, N.A. Adams, R. Radespiel, T. Sattelmayer, W. Schröder, B. Weigand (Editoren), Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik, Technischen Universität München
- [7] SFB/TRR40 Annual Report 2010, N.A. Adams, R. Radespiel, T. Sattelmayer, W. Schröder, B. Weigand (Editoren), Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik, Technischen Universität München
- [8] Implicit Large-Eddy Simulation of the heat transfer in a cooling channel using supercritical parahydrogen, Z. Chen, S. Hickel, N.A. Adams, 7th ESA Aerothermodynamics Conference, Brugge, 2011
- [9] Best-Practice Guidelines for Turbulence Modeling in Rocket Propulsion, Report of the TRR 40 Task Force, Technische Universität München, 2011, in Vorbereitung.