



DLR.de

# Institut für Systemdynamik und Regelungs- technik





# Inhalt

<b>Robotik und Mechatronik Zentrum (RMC)</b> .....	<b>4</b>
<b>Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik (SR)</b> .....	<b>5</b>
<b>Raumfahrt</b> .....	<b>6</b>
On-Orbit-Servicing .....	6
Planetare Exploration .....	7
InSight – Unter die Oberfläche des Mars.....	8
MASCOT – Springend auf Asteroiden.....	9
Satellitensysteme .....	10
Trägersysteme.....	11
<b>Luftfahrt</b> .....	<b>12</b>
Flugregelung.....	12
Flugdynamik und Lasten .....	13
Flugzeugenergiesysteme .....	14
<b>Verkehr</b> .....	<b>18</b>
Straßenfahrzeuge .....	18
Schienenfahrzeuge .....	20
<b>Synergiethemen</b> .....	<b>22</b>
ROboMObil – Raumfahrt und Verkehr .....	22
Windenergie – Luftfahrt und Energie.....	23
ROBEX – Tiefsee trifft Raumfahrt .....	24
<b>Technologietransfer</b> .....	<b>26</b>
Industrierobotik .....	26
Leichtbauproduktionstechnologie .....	27
DLR Robotic Motion Simulator .....	28
<b>Methoden- und Toolentwicklung</b> .....	<b>29</b>
Modellierung .....	29
Optimierung .....	31
Regelung .....	32
<b>Impressum</b> .....	<b>34</b>
<b>Das DLR im Überblick</b> .....	<b>36</b>

# Robotik und Mechatronik Zentrum (RMC)

Das Robotik und Mechatronik Zentrum (RMC) ist ein Cluster bestehend aus den Instituten für Robotik und Mechatronik (RM) und für Systemdynamik und Regelungstechnik (SR) in Oberpfaffenhofen sowie dem Institut für Optische Sensorsysteme (OS) in Berlin. Es ist das DLR-Kompetenzzentrum für Forschung und Technologie auf den Gebieten Robotik, Mechatronik, Systemdynamik und optische Sensorsysteme.

Die breite fachliche Basis des Zentrums bildet die Mechatronik. Als Schlüsseltechnologie unserer Industriegesellschaft bedeutet sie die höchstmögliche Integration von Mechanik, Optik, Elektronik und Informatik (Software) zur Schaffung intelligenter Komponenten bis hin zu autonomen robotischen Systemen. Dementsprechend konzentrieren sich die Arbeiten des RMC auf interdisziplinäre Entwürfe und realitätsnahe Simulationen. Darüber hinaus sind die Realisierung komplexer mechatronischer Systeme und Mensch-Maschine-Schnittstellen sowie deren Regelung und intelligente Programmierung wesentliche Bestandteile der Forschung.

Die Anwendung der im RMC entwickelten Technologien und Systeme fokussiert sich primär auf die Forschungsbereiche Raumfahrtrobotik, Luftfahrt und Verkehr. Die entwickelten Technologien haben auch unmittelbare Auswirkungen auf andere gesellschaftlich relevante Bereiche, wie die Medizintechnik, die Fabrik der Zukunft bis hin zur persönlichen robotischen Assistenz und finden dort Anwendung. Der Technologietransfer ist so ein wesentliches Ziel des RMC.



# Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik (SR)

Die rasanten Fortschritte im Bereich der Mikroprozessor-, Sensor- und Softwaretechnik ermöglichen es, intelligente und leistungsfähige Regelungsfunktionen mechatronischer Systeme zu realisieren. Im Hinblick auf Leistungsfähigkeit, Energieeffizienz, Sicherheit und Komfort komplexer Regelungssysteme arbeitet das Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik deshalb an der Weiterentwicklung und Anwendung fortschrittlicher Steuerungs- und Regelungsverfahren.

Die übergeordneten Ziele des Instituts sind innovative Problemlösungen für Raumfahrtroboter und -systeme, Flächenflugzeuge und Straßen- und Schienenfahrzeuge sowie der Technologietransfer zu Industrierobotern und Windkraftanlagen. Dabei arbeitet das Institut sehr eng mit Industrie- und Forschungspartnern sowie zahlreichen DLR-Instituten zusammen. Die erzielten Problemlösungen basieren auf der systemdynamisch ganzheitlichen Auslegung, Optimalsteuerung und robusten Regelung der betrachteten Systeme.

Für die physikalische Modellierung und Simulation des Systemverhaltens trägt das Institut federführend zur Entwicklung und Etablierung der internationalen Modellierungsstandards Modelica und Functional Mock-up Interface (FMI) bei und entwickelt Modellbibliotheken für die verschiedenen Anwendungsgebiete.

Die Durchgängigkeit vom rechnergestützten Entwurf bis zum Hardwaretest demonstriert das Institut mit seinen Prüfständen und Versuchsfahrzeugen, wie dem DLR Robotic Motion Simulator und dem DLR-ROboMObil.



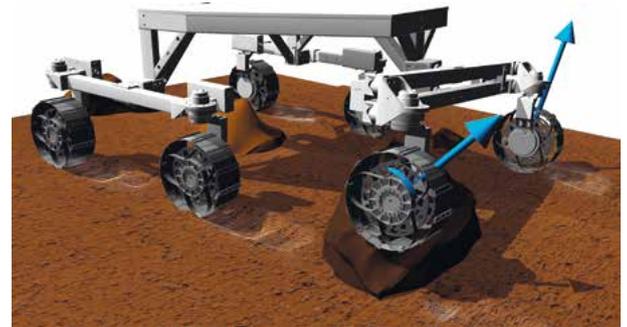
# Raumfahrt

Im Rahmen der RMC-Querschnittsthemen planetare Exploration und On-Orbit-Servicing werden wesentliche Beiträge zu Simulation, Entwurfsoptimierung, Verifikation und Regelung von Raumfahrtssystemen sowie einzelner Subsysteme geleistet. Forschungsschwerpunkte sind die Rad-Boden-Interaktion bei planetaren Rovern, die Mobilität von Landern auf Asteroiden, die Kontaktdynamik bei Satelliten-Dockingmanövern und die Bewertung von Trägersystemen inklusive wiederverwendbarer Trägersysteme.

## On-Orbit-Servicing

Das Institut SR entwickelt Modelle und Technologien für die robotergestützte Wartung, Reparatur und Entsorgung von Satelliten. Die Aktivitäten umfassen die Verifizierung und Verbesserung von Satelliten-Dockingsystemen sowie den Entwurf von „Guidance, Navigation and Control (GNC)“-Strategien für Servicesatelliten. Dabei spielt die Verfügbarkeit hochgenauer und flexibler Mehrkörper- und Kontaktdynamikmodelle eine entscheidende Rolle.

Im Rahmen der Clean-Space-Initiative der ESA werden unter anderem Technologieentwicklungen vorangetrieben, um Weltraumschrott aus der Umlaufbahn von Satelliten beseitigen zu können (Active Debris Removal, ADR). Zu diesen Technologien zählen auch GNC-Lösungen, die eine integrierte Steuerung und Regelung von Servicing-Satelliten und eines darauf montierten Roboterarms erlauben, um inaktive Satelliten anzufliegen, zu greifen und aus der Umlaufbahn zu entfernen. Das Institut SR hat in einem ESA-Projekt für das Envisat-ADR-Szenario (eDeorbit) ein entsprechendes Simulationstool entwickelt, die notwendigen GNC-Algorithmen darin implementiert und Fly-Around, Rendezvous, Zugriff, Stabilisierung und De-Orbiting eines unkooperativen, taumelnden Targets erfolgreich demonstriert.



## Planetare Exploration

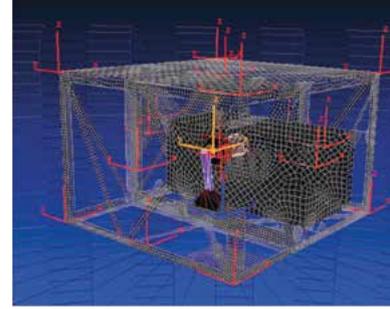
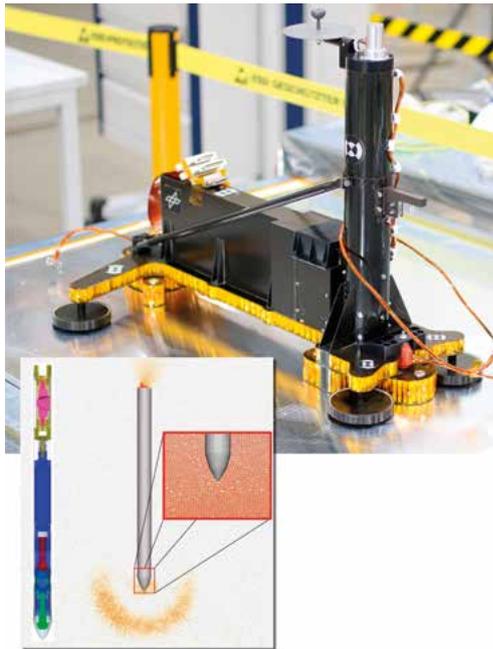
Am Institut SR wird Simulationsexpertise für die robotische planetare Exploration kontinuierlich aufgebaut. Das Expertenwissen wird in Form von Modellbibliotheken zugänglich gemacht und im Rahmen von Raumfahrtmissionen mit Planetenrovern (zum Beispiel ExoMars Rover; ESA), Asteroidenlandern (zum Beispiel MASCOT Mobility Unit; JAXA) oder Penetrationsystemen (zum Beispiel InSight HP3; NASA) angewendet. Prädiktion und Verifikation der Systemdynamik sowie modellbasierte Regelung und Fehlerdetektion stehen im Fokus der Forschungsarbeiten.

Eine Schlüsselrolle spielt dabei die Terramechanik. Das SR Rover Simulation Toolkit, das für den Entwurf planetarer Mobilitätssysteme eingesetzt wird, bietet deshalb eine breite Palette von Bodenkontaktmodellen an. Diese reicht von echtzeitfähigen Lösungen über Modelle mit plastischer Bodenverformung bis hin zu komplexen Partikelmodellen. Die Entwicklung und Validierung der Modelle erfolgt auf Basis experimenteller Einzelrad- und Gesamtsystemtests sowie verfügbarer Missionsdaten.



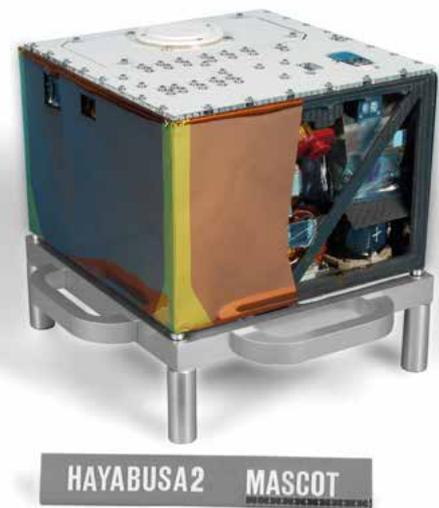
## InSight – Unter die Oberfläche des Mars

Das DLR beteiligt sich an der NASA-Marsmission InSight mit dem Instrument HP3, dessen nagelförmiger Thermalsensor „Mole“ sich selbst bis zu fünf Meter in den Marsboden einschlagen soll, um dort den Wärmefluss zu messen. Am Institut SR wurde ein Mehrkörperdynamikmodell des „Mole“ mit komplexen Partikelmodellen des Marsbodens in einer Co-Simulation gekoppelt, um die Einschlagleistung mit hoher Präzision vorherzusagen. Optimierungen des „Mole“ auf Basis dieser Modelle veranlassten Anpassungen an den internen Feder-Masse-Systemen des Schlagmechanismus, wodurch bei gleicher Leistungsaufnahme die Anzahl der Schläge zum Erreichen der geforderten Eindringtiefe auf 25 % gegenüber dem ursprünglichen Entwurf gesenkt werden konnte.



## MASCOT – Springend auf Asteroiden

Seit Dezember 2014 ist der DLR-Lander MASCOT an Bord der japanischen Hayabusa2 auf seinem Weg zum Asteroiden Ryugu. Nach der Landung in 2018 soll ein interner Mobilitätsmechanismus den schuhkartongroßen MASCOT zu Messungen auf die erforderliche Quaderseite drehen und an neue Messpositionen auf dem Asteroiden springen lassen. Das Institut SR legt dazu die optimalen Beschleunigungsprofile für den vom Schwesterinstitut RM entwickelten Mobilitätsmechanismus auf Basis von Mehrkörpersimulationen mit hochgenauen Bodenkontaktmodellen aus. Da die Bedingungen hinsichtlich Mikrogravitationsfeld und Oberflächenbeschaffenheit stark variieren, werden mit Hilfe modellbasierter Optimierungen möglichst robuste Lösungen entworfen.



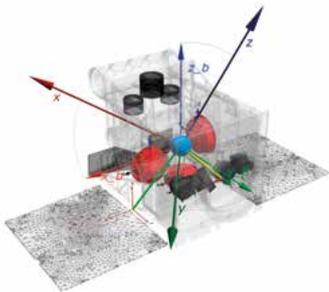
## Satellitensysteme

Für zukünftige Missionen, zum Beispiel für On-Orbit-Servicing oder Fernerkundung, werden multidisziplinäre Modellierungsumgebungen entwickelt, um die Spezifikation, Entwicklung und Analyse von Satellitensystemen und deren Dynamik, einschließlich ihrer Steuerung und deren Interaktion mit der Weltraumumgebung, zu unterstützen.

Die Satellitenplattform BIROS ist ein Technologiedemonstrator für die DLR-Weltraummission FIREBIRD. Für ein neues Lageregelungssystem zur Demonstration schneller Drehmanöver ist der Satellit mit „High Torque Wheels (HTW)“ ausgerüstet. Ein Dynamikmodell des Satellits, einschließlich struktureller Flexibilität, sowie ein Regelungsmodul wurden am Institut SR auf Basis von Modelica innerhalb der „DLR Space Systems Library“ entwickelt.

Die Bibliothek beinhaltet auch Module, die eine realistische Raumfahrtumgebung darstellen können. Hierzu existieren umfangreiche Gravitationsmodelle und Module, die typische Störeffekte modellieren, die auf Raumfahrzeuge wirken. Auch umfangreiche grafische Möglichkeiten stehen zur Verfügung, um Missionen visualisieren zu können.

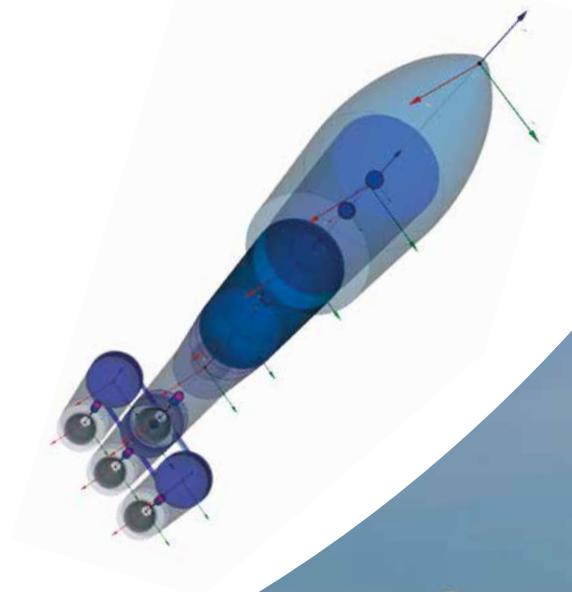
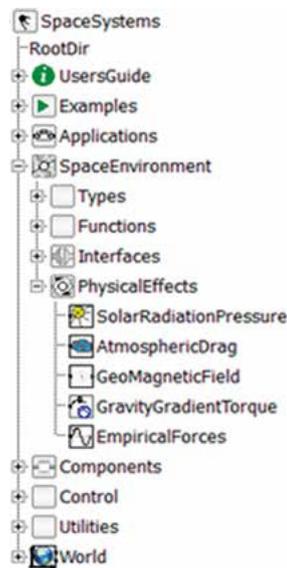
Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Modellierung elastischer Komponenten, wie Satelliten-Solarmodule, sowie im Einbezug dieser Modelle zur Auslegung von Reglern.



## Trägersysteme

Die europäischen Trägersysteme, wie Ariane oder Vega, werden in internationaler Zusammenarbeit kontinuierlich weiterentwickelt. Das Institut SR beteiligt sich in diesem Rahmen, basierend auf den Erkenntnissen aus der Systemsimulation, an der Vorauslegung, Bewertung und Optimierung von aktuellen sowie zukünftigen wiederverwendbaren Trägersystemen.

Zu diesem Zweck werden am Institut SR detaillierte Studien durchgeführt, um die Steuer- und Regelbarkeit von Trägersystemen hinsichtlich aller relevanten Flugphasen bewerten zu können. Die Studien konzentrieren sich dabei auf optimale Flugbahnen, die physikalische Modellierung und „Guidance, Navigation and Control“ (GNC). Optimale Flugbahnen haben insbesondere bei wiederverwendbaren Trägersystemen sehr großen Einfluss auf den Entwurf. Eine auf der Modellierungssprache Modelica basierende und in die „DLR Space Systems Library“ integrierte Bibliothek stellt Methoden und Werkzeuge zur Verfügung, um starre und flexible Trägersysteme unter Berücksichtigung strukturelastischer Effekte zu modellieren, welche sich erheblich auf die Leistung des Trägersystems auswirken können.



# Luftfahrt

Der Entwurf neuartiger Flugregelungs- und Flugzeugbordsysteme steht im Fokus der Luftfahrtforschung im Institut SR. Ziel ist die Gewichtsreduktion durch aktive Abminderung der Flugzeugstrukturlasten sowie die Verbesserung des (teil-)autonomen Betriebs bemannter und unbemannter Flugzeuge. Zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs werden auch die Flugzeugenergiesysteme weiterentwickelt, bewertet und optimiert.

## Flugregelung

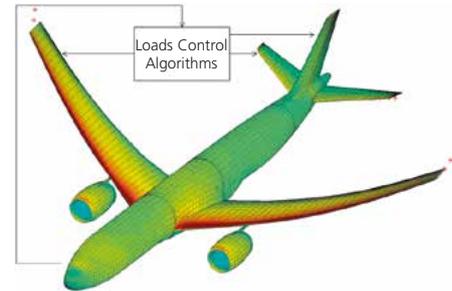
Die Auslegung und die Optimierung der Steuerungssysteme spielen eine Schlüsselrolle bei der Verbesserung der Umweltfreundlichkeit, Wirtschaftlichkeit und Sicherheit künftiger Flugzeuggenerationen. Automatische Flugregelungssysteme ermöglichen eine aktive Stabilisierung und Reduktion der Strukturlast des gesamten Flugzeugs und erlauben es, aerodynamisch effizientere Flugzeugkonfigurationen mit erheblich leichteren Strukturen zu entwerfen. Moderne fehler-tolerante und adaptive Regelungsmethoden garantieren zudem die volle Funktionsfähigkeit des Regelungssystems auch in gravierenden Fehlerfällen und erhöhen somit die Sicherheit.

Das Institut SR entwickelt hierzu neuartige Flugregelungssysteme und unterstützt den Entwicklungsprozess mittels einer durchgängigen Palette rechnergestützter Entwurfs- und Analysewerkzeuge.

In Flugversuchen mit den Forschungsflugzeugen des DLR werden beispielsweise effizientere Regler erprobt und Flughafenanflüge mit verringerten Emissionen entwickelt. Für die automatisierte Durchführung kompletter Flugmissionen, zum Beispiel auch für solare Höhenplattformen, entwickelt das Institut neuartige Planungs- und Trajektorienoptimierungsmethoden.

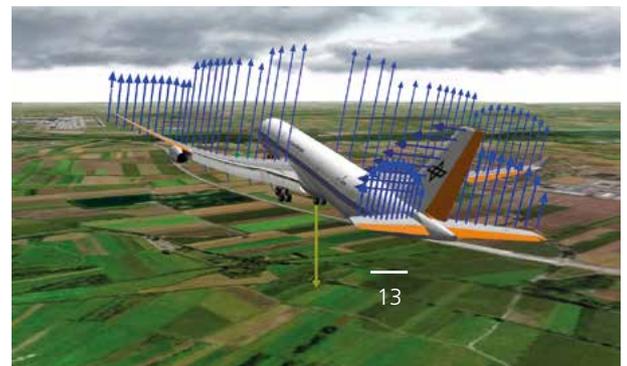


ATTAS Test 1134  
Reglerversuch SR, 2011



## Flugdynamik und Lasten

Die Analyse der Flugdynamik und Strukturlasten bildet die Grundlage der Entwurfsoptimierung neuer umweltfreundlicher und hocheffizienter Flugzeugkonfigurationen sowie deren Flugregelungssystemen. Das Institut entwickelt automatisierte Prozesse und Werkzeuge für die multidisziplinäre Modellbildung, Simulation und effiziente Analyse von geregelten, flexiblen Flugzeugen. Methodische Entwicklungen fokussieren auf neuartige Analysemethoden sowie erhöhte Genauigkeit und numerische Effizienz der Simulationsmodelle, um den gesamten Flugbereich mit hoher Aussagequalität abzudecken und kurze Entwurfszyklen gewährleisten zu können. Weitere Schwerpunkte bilden die Modellierung und Analyse aufwändiger Szenarien mit komplexen Manövern und atmosphärischen Störungen, wie Böen und Turbulenzen. Der Einflug in Wirbelschleppen anderer Flugzeuge ist dabei ein prominentes Beispiel. Ein automatisierter Modellierungs- und Analyseprozess für das geregelte Flugzeug erlaubt eine direkte Integration in die höchst-multidisziplinäre Optimierung des Gesamtsystems Flugzeug.



## Flugzeugenergiesysteme

In aktuellen Verkehrsflugzeugen werden sämtliche Systeme mit hydraulischer, pneumatischer oder elektrischer Energie versorgt. Seit Jahrzehnten gibt es jedoch einen Entwicklungstrend zum sogenannten „More Electric Aircraft“, also einem elektrifizierten Flugzeug, bei dem immer mehr Systeme mit elektrischer Energie versorgt werden. Das Institut SR entwickelt Methoden und Werkzeuge, um solch hochintegrierte Systeme modellbasiert zu entwickeln, zu optimieren, zu bewerten und zu regeln.

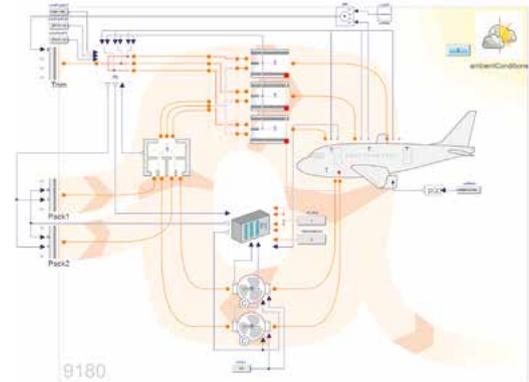
### Aktuatoren

Insbesondere der Einsatz elektromechanischer und elektrohydrostatischer Aktuatoren für die Flugsteuerung verlangt eine zuverlässige Fehlererkennung. Dazu werden Fehlererkennungsalgorithmen entwickelt, welche auf vielseitig einsetzbare Modelle von fehlerbehafteten Komponenten zurückgreifen. Diese Modelle und Algorithmen werden am Prüfstand validiert.



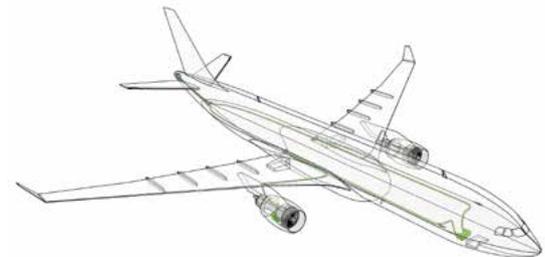
### Thermisches System

Das thermische System im Flugzeug umfasst die Klimaanlage, die Zapfluftentnahme, die Stauluftkanäle, die Kabine sowie die Verteilung der aufbereiteten Luft. Bei einer höheren Elektrifizierung ist auch die Kühlung der Bordelektronik von Bedeutung. Hierzu wurden verschiedene Vorentwicklungswerkzeuge in Zusammenarbeit mit Airbus entwickelt, die stetig erweitert werden.



### Elektrisches System

Durch die steigende Elektrifizierung ist die Masse der elektrischen Komponenten sowie deren Zuverlässigkeit ein zentrales Thema. Hierzu wurden Werkzeuge zur Modellierung und Optimierung auf Architekturebene sowie zur Ausführung von Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalysen geschaffen. Zudem entstehen Modellbibliotheken für die detaillierte Entwicklung, den Test und die Integration elektrischer Komponenten.



A graphic for 'Energy Management' featuring five horizontal arrows of increasing length and color (green, light green, yellow, orange, red) pointing right, with a white airplane silhouette flying in the background against a blue sky with clouds.

## Energy Management

### Energiemanagement

Für die Energieeffizienz und Auslegung der Flugzeugsysteme haben die Betriebsstrategien eine immer stärkere Bedeutung. So erhöht ein Energiemanagement-Algorithmus die Energieeffizienz eines Systems, indem in jedem Betriebspunkt die optimale Aufteilung auf Quellen elektrischer Leistung oder Kälteleistung gewählt wird. Zudem wird durch die Dimensionierung mit realistischen Lastprofilen eine deutlich reduzierte Systemmasse erzielt.

### Bewertung von Technologien aus flugdynamischer Sicht

Die ganzheitliche Bewertung von neuen Technologien und insbesondere die Quantifizierung ökonomischer und ökologischer Vorteile gewinnen zunehmend an Bedeutung. Das Institut SR integriert multidisziplinäre Modelle mit Hilfe selbst entwickelter Modelica-Bibliotheken und stellt Werkzeuge für Missionssimulationen von Gate zu Gate bereit. Hiermit können neue Technologien, wie ein elektrifiziertes Fahrwerk oder neuartige hybridelektrische Antriebe, unter realistischen Bedingungen und Missionen frühzeitig modellbasiert bewertet und optimiert werden.

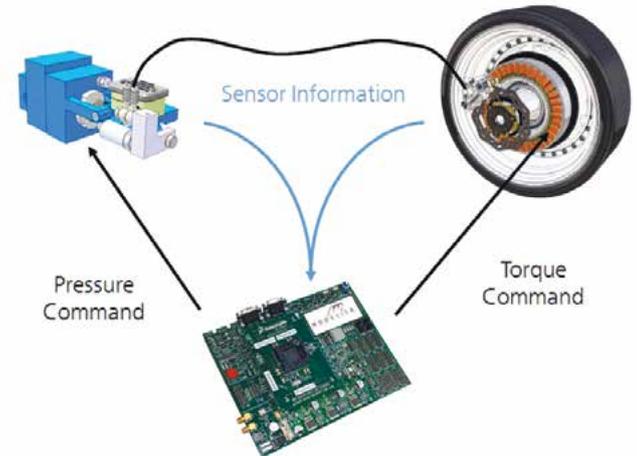
# Verkehr

Sicherheit, Komfort und verantwortlicher Umgang mit natürlichen Ressourcen stehen im Fokus der Arbeiten im Bezug auf Straßen- und Schienenfahrzeuge, bei denen die Forschungsfelder Energiemanagement, Fahrndynamik und Fahrzeugintelligenz adressiert werden. Speziell in diesen Feldern sollen die Chancen der Elektromobilität genutzt und deren Etablierung durch die Forschung unterstützt werden. Die Entwicklung modularer, mechatronisch hochintegrierter Fahrwerke und Antriebe profitiert dabei von einer ganzheitlichen Sichtweise auf Basis von Fahrzeugkonzepten. Diese dienen in den Projekten Next Generation Car und Next Generation Train als DLR-übergreifender Rahmen für abgestimmte Konzept-, Methoden- und Technologieentwicklung.

## Straßenfahrzeuge

Im Bereich Straßenfahrzeuge werden innovative Ansätze für mechatronische Fahrwerke entwickelt. Das primäre Ziel bildet die gleichzeitige Verbesserung von Energieeffizienz, Fahrsicherheit und Fahrkomfort.

Die heute noch üblichen, starren mechanischen Verbindungen, insbesondere für die Lenkung, werden zunehmend durch „X-by-Wire“-Technologie aufgehoben. Daher kommt der Entwicklung von Methoden und Werkzeugen zur Sicherstellung der funktionalen Sicherheit eine große Bedeutung zu. Hierbei, sowie für die Verfahren zur integrierten Fahr-



werksregelung und Fahrzustandsschätzung, spielen modellbasierte Entwicklungsprozesse und Toolketten eine wichtige Rolle. Eine wesentliche Grundlage, die am Institut SR weiter vorangetrieben wird, bilden deshalb neuartige Technologien zur multidisziplinären Modellbildung, Simulation und Bewertung. Sie ermöglichen Untersuchungen der komplexen Wechselwirkung des Fahrwerks mit der Straße und dem Gesamtfahrzeug auf den Ebenen der elastischen Mehrkörperdynamik, den elektrischen Energieflüssen und diskreten Regelalgorithmen.

Ein Forschungsschwerpunkt ist die Bremsregelung von Elektromotoren in Kombination mit Reibbremsen für Elektrofahrzeuge, sodass trotz eines minimalen Bremswegs möglichst viel Energie in den Batteriespeicher rekuperiert wird. Einen weiteren Schwerpunkt bilden Strategien zur Vertikaldynamikregelung mittels hochdynamischer semiaktiver Stoßdämpfer, die auf die erhöhte, ungedeferte Masse bei Radnabenmotoren abgestimmt sind. Neuartige, am Institut entwickelte, Toolketten zielen darüber hinaus auf die automatisierte Erzeugung vom seriennahen Steuergerätee-code der entwickelten Regelungen mittels Modelica ab.





## Schienenfahrzeuge

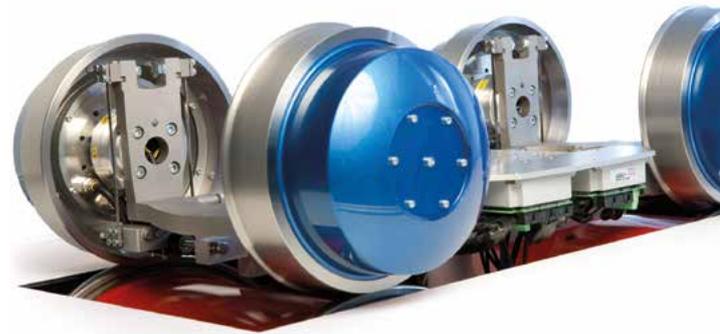
Mechatronische Fahrzeugregelsysteme in Schienenfahrzeugen bieten ein enormes, bisher ungenutztes Potenzial zur Verbesserung der Sicherheit und des Komforts sowie zur Reduktion des Energieverbrauchs, der Lärmemissionen und des Verschleißes beziehungsweise der Lebenszykluskosten.

Zur Erschließung dieses Potenzials wird am Institut SR an einem Einzelradfahrwerk mit aktiver Spurführung in Niederflerbauweise gearbeitet. Die grundsätzliche Eignung dieses Konzepts wird auf einem Rollprüfstand im Maßstab 1:5 experimentell überprüft und nachgewiesen.

Diese Aktivitäten sind Bestandteil des DLR-Projekts Next Generation Train, das Konzepte, Methoden und Technologien für einen doppelstöckigen Höchstgeschwindigkeitszug in

Leichtbauweise zum Inhalt hat. Dieses auf Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung ausgerichtete Fahrzeugkonzept stellt besondere Herausforderungen an die fahrdynamische Auslegung mittels Simulation und Optimierung und ist auf den Einsatz mechatronischer Fahrzeugsysteme angewiesen.

Ziel der Arbeiten ist es, alle Funktionen eines Fahrwerks, wie Spurführung, Primär- und Sekundärfederung, Antriebe und Bremsen, auf Basis einer integrierten Strategie zu regeln. Darüber hinaus sind die Teilsysteme im Zugverband zu vernetzen, um zusätzliche Synergieeffekte zu erschließen. Hierzu werden Werkzeuge entwickelt, die die Analyse, den Entwurf und die Implementierung solcher Systeme unterstützen.



# Synergiethemen

Im Rahmen der multidisziplinären Arbeiten entstehen am Institut SR vielfältige Forschungsthemen und Systeme, die gezielt Synergien der verschiedenen Forschungsbeiriche des DLR nutzen. So werden Erkenntnisse aus Luftfahrt, Raumfahrt, Verkehr und Energie in optimaler Weise zu neuartigen Produkten verknüpft.

## ROboMObil – Raumfahrt und Verkehr

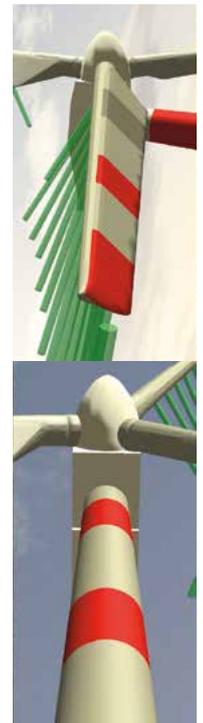
Das ROboMObil ist die von der Raumfahrtrobotik inspirierte elektromobile „X-by-Wire“-Forschungsplattform am RMC für mechatronische Aktuatoren, Fahrdynamikregelung, Mensch-Maschine-Schnittstellen sowie autonomes und vernetztes Fahren (Car2X). Seine vier hochintegrierten, baugleichen Radroboter verleihen dem ROboMObil eine außerordentliche Manövrierbarkeit, die selbst das Fahren seitwärts und das Drehen auf der Stelle ermöglicht. Als Forschungsplattform und Demonstrator bildet es ein Querschnittsthema am RMC. Projektleitung, Konzeption und Betrieb des Forschungsträgers erfolgt durch das Institut SR; die Forschungsthemen Autonomie und Mensch-Maschine-Schnittstelle werden vom Institut RM unterstützt.



## Windenergie – Luftfahrt und Energie

Windfeldmodellierung, Rotor aerodynamik, Strukturelastik, Getriebemodelle und Leistungselektronik – all diese verschiedenen Domänen finden sich in der Modellierung von Windkraftanlagen wieder. Die Modelica-Technologie entspricht diesen multiphysikalischen Anforderungen perfekt. Daher wird eine neue, vom Institut entwickelte, Modellierungsbibliothek dabei helfen, systemdynamische Forschungs- und Entwicklungsthemen zu untersuchen.

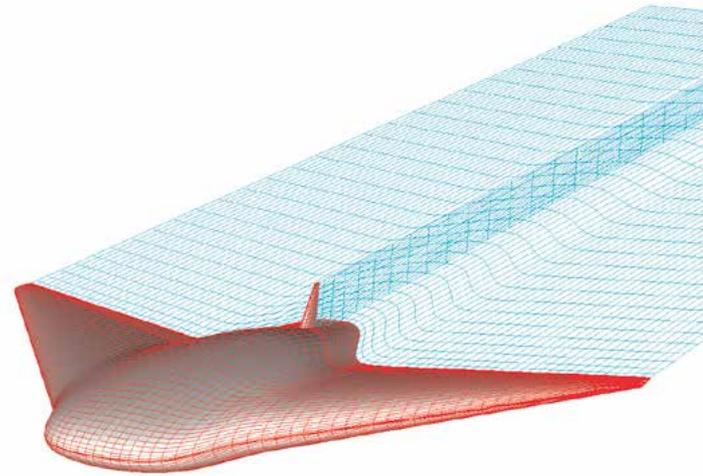
Anwendungsbeispiele sind die optimale nicht lineare Regelung und die sichere Integration ins europäische Energienetz. Im Rahmen dieser Anwendungen bilden sich wertvolle Synergien zu verwandten Problemstellungen aus der Luftfahrt. Eine gemeinsame Forschungsaufgabe ist beispielsweise der Einsatz von LIDAR-basierten Systemen zur Böenerfassung und die aktiv geregelte Böenlastreduktion.





## ROBEX – Tiefsee trifft Raumfahrt

In der Helmholtz-Allianz „ROBEX – ROBOTische EXploration unter EXtrembedingungen“ entwickelt ein Konsortium aus Raumfahrt- und Tiefseeforschern gemeinsam Technologien für die Erforschung besonders schwer zugänglicher Gebiete, wie Planetenoberflächen und die Tiefsee. Naturgemäß sind in beiden Fällen experimentelle Tests extrem aufwändig. Das Institut SR beteiligt sich mit Simulationen der jeweiligen Mobilitätssysteme, beispielsweise der beim Institut RM entwickelten „Lightweight Rover Unit (LRU)“ für die lunare Anwendung. Detaillierte Modelle der Radaufhängung und der Rad-Boden-Interaktion erlauben die simulative Erprobung solcher neuen Mobilitätskonzepte für Rover.



Für die maritime Anwendung eines Tiefseegleiters tragen Hydrodynamikberechnungen entscheidend zum Gesamtentwurf des Systems bei. Zudem erlauben es die Simulationsmodelle, Navigations- und Steuerungskonzepte identisch wie auf den realen Systemen zu implementieren und somit das Systemverhalten virtuell, aber unter realitätsnahen Bedingungen zu testen.

# Technologietransfer

Die am Institut entwickelten Technologien und Methoden gehen über enge Kooperationen mit der Industrie in die Entwicklung und Verbesserung von neuen, innovativen Produkten ein. Insbesondere die jahrelange Zusammenarbeit mit Deutschlands führendem Robotikunternehmen KUKA erlaubt es, Technologien des Instituts in marktreife Industrieprodukte zu integrieren.

## Industrierobotik

Neue Anwendungsgebiete und der hohe Konkurrenzdruck in der Industrierobotik verlangen nach stetiger Verbesserung der Industrieroboter hinsichtlich ihrer Schnelligkeit und Genauigkeit. Das Institut SR trägt hierzu mit der Entwicklung modernster modellbasierter Regelungsmethoden bei. Ziel ist eine deutliche Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Maschinen rein auf Basis neuer Softwarealgorithmen. Die im Rahmen einer langjährigen Kooperation mit dem Industriepartner KUKA entstandenen Algorithmen sind fester Bestandteil heutiger auf dem Markt befindlicher KUKA-Robotersteuerungen. Die Erfolgsgeschichte dieses Technologietransfers wird bis heute fortgeführt.

Aktuelle Forschungsschwerpunkte sind die optimale Trajektorienplanung, die Kompensation elastischer Effekte durch die Berechnung der inversen Dynamik, robuste und adaptive Regelungsverfahren zur Positions- und Kraftregelung sowie die modellbasierte Störgrößenkompensation.

## Leichtbauproduktionstechnologie

Die Fertigung von CFK-Bauteilen erfordert eine hohe Genauigkeit. Allerdings treten bei vollautomatisierten Fertigungsprozessen mit Multiroboterzellen strukturelastische Verformungen der Anlage auf, die unter anderem zu Ungenauigkeiten in der Positionierung führen. Das Institut SR entwickelt Methoden zur Kompensation dieser elastischen Effekte. Hierzu werden detaillierte Simulationsmodelle eingesetzt, hochpräzise Messtechnik zur Modellkalibration verwendet und echtzeitfähige Kompensationsalgorithmen entwickelt, welche am Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) des DLR erprobt werden.



# Methoden- und Toolentwicklung

## DLR Robotic Motion Simulator

Der DLR Robotic Motion Simulator des RMC ist eine neuartige Bewegungssimulatorplattform, die auf einem Standardindustrieroboter basiert. Sie ermöglicht es, durch einfaches Austauschen der Steuerinstrumente hochrealistische Fahr- oder Flugsimulationen zu verwirklichen. Voraussetzungen hierfür sind eine Simulation der Fahr- oder Flugdynamik sowie ein auf den Roboter angepasster „Washout“-Filter, der die Echtzeitbahnplanung und Robotersteuerung übernimmt. Durch zwei endlos drehbare Achsen sind Rückenflüge, Rollen und Schleudermanöver darstellbar.

Zusätzlich steht dem RMC ein zweiter roboterbasierter Flugsimulator mit einem originalen DA42-Cockpit und 220°-Visualisierungsdom zur Verfügung. Die Systeme werden zur Untersuchung von Mensch-Maschine-Schnittstellen, für die Entwicklung und den Test neuer Fahr- und Flugregelungsalgorithmen sowie für psychologische Studien eingesetzt.



Die vielfältigen Forschungsarbeiten des Instituts basieren auf den Schlüsseltechnologien Modellierung, Optimierung und Regelung. Das Institut SR entwickelt in diesen Bereichen neue Methoden und Technologien und setzt diese mit spezialisierten Softwarewerkzeugen um. Viele dieser Werkzeuge werden der Forschungsgemeinschaft in Form von Open-Source- oder kommerzieller Software zur Verfügung gestellt.

## Modellierung

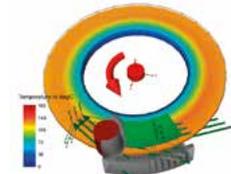
### Modelica

Das Institut SR entwickelt zusammen mit anderen Partnern seit 1996 die Modellierungssprache Modelica. Diese wird von vielen Simulationsumgebungen unterstützt, wie Dymola, Maplesim, SimulationX und OpenModelica. Modelica wird in den Forschungsarbeiten des Instituts zur Erstellung von multi-disziplinären Modellen der Regelungsstrecken eingesetzt – von Architekturmodellen bis zu detaillierten Systemmodellen. Diese Modelle werden auch, in der Regel vereinfacht und invertiert, direkt in nicht linearen Regelungssystemen verwendet.

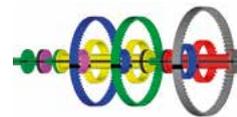
Zu diesem Zweck entsteht am Institut eine Vielzahl von Modellierungsbibliotheken, die auch außerhalb des Instituts verwendet werden.



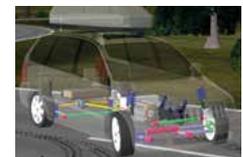
Flight dynamics



Flexible bodies



Power train



Visualisation

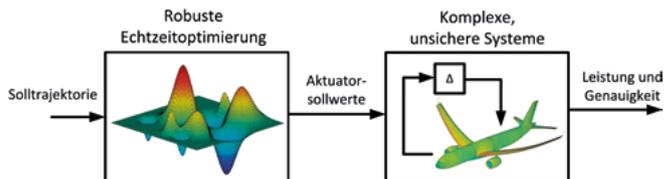


## Regelung

Ein Schwerpunkt des Instituts SR liegt in der Entwicklung und Implementierung modernster modellbasierter Regelungsverfahren. Bei diesen Verfahren wird ein mathematisches Modell des Systems verwendet, um das Systemverhalten gezielt vorherzusagen und zu verbessern.

Der Einsatz inverser Dynamikmodelle in Regelungsalgorithmen ermöglicht zum Beispiel die Kompensation unerwünschter, elastischer Effekte. Durch robuste Regelungsmethoden ist es zudem möglich, die nicht modellierte Unsicherheit der Systeme direkt zu berücksichtigen. Optimierungsbasierte Verfahren ermöglichen es, überaktuierte Systeme zu beherrschen und Trajektorien exakt zu folgen. Adaptive und fehlertolerante Regelungsmethoden reagieren flexibel auf den Systemzustand und rekonfigurieren das System im Fehlerfall.

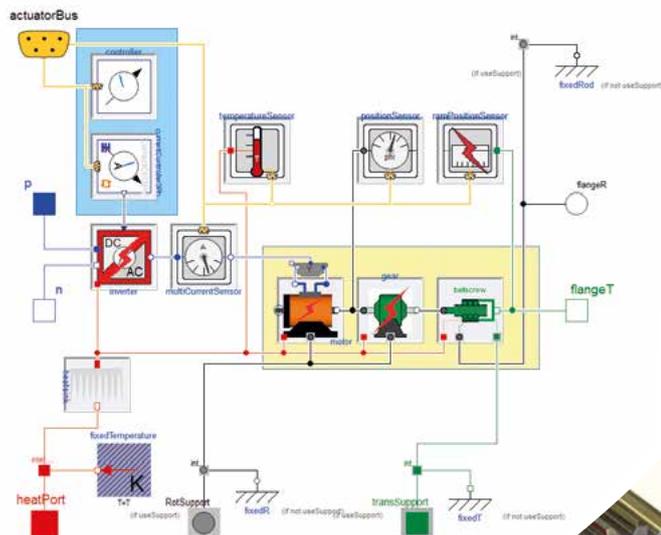
Die konsequente Anwendung moderner Regelungsmethoden erlaubt es, die Systeme leichter und effizienter zu konstruieren und ihre Leistungsfähigkeit deutlich zu erhöhen. Die enge Verbindung von Modellierung, Optimierung und Regelung ermöglicht auch die systemdynamisch ganzheitliche Auslegung des geregelten Systems im Rahmen einer multidisziplinären Entwurfsoptimierung.



## Fehlerdiagnose und fehlertolerante Regelung

Die Entwicklung von robusten Fehlerdiagnoseverfahren ist eine Voraussetzung für den Entwurf fortschrittlicher, fehlertoleranter Regelgesetze mit ereignisgesteuerter Rekonfiguration. Ein wichtiges Anwendungsgebiet ist zum Beispiel eine sichere, zuverlässige und leistungsfähige Automatisierung in der Fahrzeugtechnik und Luftfahrt.

Die Kompetenzen in der Entwicklung robuster Fehlerdiagnosesysteme sowie der robusten Regelung des Instituts SR wurden im Rahmen mehrerer EU-Projekte und in enger Zusammenarbeit mit der Industrie (unter anderem mit Airbus) erfolgreich eingesetzt. Grundlagen hierfür sind am Institut entwickelte Verfahren und Werkzeuge zur modell- und signalbasierten Fehlererkennung.



# Impressum

- Herausgeber** Deutsches Zentrum für  
Luft- und Raumfahrt e.V.
- Anschrift** Linder Höhe  
51147 Köln
- Redaktion** Daniel Schlabe  
Andreas Klöckner  
Institut für Systemdynamik  
und Regelungstechnik
- Gestaltung** CD Werbeagentur GmbH, Troisdorf  
www.cdonline.de
- Drucklegung** Köln, April 2016
- Abdruck (auch von Teilen) oder sonstige  
Verwendung nur nach vorheriger  
Absprache mit dem DLR gestattet.
- DLR.de
- Kontakt** Institut für Systemdynamik und  
Regelungstechnik  
Oberpfaffenhofen  
Direktor: Dr.-Ing. Dipl.-Math. Johann Bals  
Münchener Straße 20  
82234 Weßling  
sr@DLR.de  
Tel.: +49 8153 28-2461  
DLR.de/sr



## Das DLR im Überblick

Das DLR ist das nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Seine umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Verkehr und Sicherheit sind in nationale und internationale Kooperationen eingebunden. Über die eigene Forschung hinaus ist das DLR als Raumfahrt-Agentur im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zudem fungiert das DLR als Dachorganisation für den national größten Projektträger.

In den 16 Standorten Köln (Sitz des Vorstands), Augsburg, Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Göttingen, Hamburg, Jülich, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Stade, Stuttgart, Trauen und Weilheim beschäftigt das DLR circa 8.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Das DLR unterhält Büros in Brüssel, Paris, Tokio und Washington D.C.



DLR

**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt**

**Institut für Systemdynamik  
und Regelungstechnik**

Münchener Straße 20  
82234 Weßling  
Tel.: +49 8153 28-2461

[DLR.de/sr](http://DLR.de/sr)