# Raumfahrtforschung im DLR

DLR

***"I don't want to believe. I want to know."***

*„Ich will nicht glauben. Ich will wissen."*

***Carl Sagan***
*Amerikanischer Astronom*

# Inhalt


Vom Raketenantrieb bis zur Raumstation ..... **2**

Die Welt im Wandel ..... **4**

Der Mensch im All .... **10**

Auf Mission zu Himmelskörpern .... **16**

Innovationen für das digitale Leben .... **22**

Der Weg ins All .... **28**

Die Roboter der Zukunft .... **34**

Das Potenzial der Quanten .... **40**

# Vom Raketenantri eb bis zur Raumstation

Die Raumfahrtforschung fasziniert und begeistert seit jeher: Als das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) am 12. November 2014 den Lander Philae auf der Oberfläche des Kometen Churyumov-Gerasimenko absetzte und in 500 Millionen Kilometer Entfernung von der Erde forschte, verfolgten Hunderttausende weltweit die Mission. Selbst die Suchmaschine Google änderte ihr Icon und präsentierte auf ihrer Startseite den dreibeinigen Lander. Zum Start des Mars-Landers InSight am 5. Mai 2018 versammelten sich nachts Tausende um den Startplatz an der amerikanischen Westküste, um live zu sehen, wie dessen Reise mit dem DLR-Maulwurf HP$^3$ zum Roten Planeten startete. Als der Asteroidenlander MASCOT am 3. Oktober 2018 auf dem Asteroiden Ryugu landete, hatte er auf zwei kleinen Folien in seinem Inneren die Namen und guten Wünsche von mehr als 3.500 „Mitreisenden“ an Bord.

### Breites Spektrum an Forschungsbereichen

Die Raumfahrtforschung leistet aber vor allem bedeutende Beiträge für die heutigen gesellschaftlichen Herausforderungen wie den Globalen Wandel oder auch für die derzeitigen Anforderungen der Gesellschaft nach sicherer und globaler Verfügbarkeit von Kommunikationsnetzen. Auch der Umgang mit stetig steigenden und zunehmend heterogenen Datenmengen oder die Entwicklung und Erprobung neuer innovativer Technologien und deren Transfer in die Anwendung auf der Erde gehören zu den aktuellen Aufgabenstellungen, auf die die Raumfahrtforschung reagiert und für die sie Lösungen erarbeitet.

Im DLR forschen 37 Institute im Bereich Raumfahrt daran, Technologien zu entwickeln und zu erproben sowie Erkenntnisse zu gewinnen, die einen hohen gesellschaftlichen Nutzen haben. Dabei deckt der Bereich Raumfahrtforschung und -technologie ein breites Spektrum an Themen ab und kann so Projekte, Missionen und Anwendungen nicht nur entwerfen und initiieren, sondern auch vorbereiten, durchführen und die gewonnenen Daten effektiv auswerten und beurteilen. Im Bereich der Satelliten ist das DLR systemfähig. Damit ist das DLR ein gefragter Kooperationspartner für Raumfahrtagenturen wie die europäische Weltraumorganisation ESA, die amerikanische Weltraumbehörde NASA, die japanische Raumfahrtagentur JAXA oder die russische Raumfahrtagentur ROSKOSMOS. Auch nationale und internationale Forschungseinrichtungen und die Industrie gehören zu den Partnern des DLR.

### Maximierung des gesellschaftlichen Nutzens

Das DLR hat sich mit seinen Kompetenzen und Erfahrungen für das kommende Jahrzehnt zum Ziel gesetzt, den Nutzen der Raumfahrtforschung für die Gesellschaft zu maximieren. Eine der gesellschaftlichen Herausforderungen ist das Monitoring des Globalen Wandels – hier kommt der Raumfahrtforschung des DLR und ihrer Fernerkundung aus dem All eine sehr wichtige Rolle zu. Nur die satellitengestützte Erdbeobachtung ermöglicht es, Veränderungsprozesse in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung und Genauigkeit global zu erfassen und auf dieser Basis Handlungsempfehlungen geben zu können. Die Entwicklung von neuen Technologien, die Europa einen unabhängigen und kostengünstigen Zugang ins All gewährleisten oder die Wiederverwendbarkeit von Trägersystemen ermöglichen, gehört ebenso zu den Zielen des DLR wie der Technologietransfer aus der Raumfahrtrobotik, beispielsweise in die Medizin und Pflege. Für ein neues, besseres Verständnis unserer Welt und unseres Sonnensystems schickt das DLR wissenschaftliche Instrumente zu fernen Himmelskörpern und führt Experimente unter Weltraumbedingungen durch. Mit neuen Instituten im Forschungsbereich Quantentechnologie schafft das DLR die Grundlagen für die Anwendung von Quantentechnologie der zweiten Generation im Weltraum und auf der Erde, unter anderem zum Beispiel für Anwendungen im Bereich Kommunikation und für die Erdbeobachtung. Die vorliegende Broschüre gibt einen Einblick in die aktuelle Raumfahrtforschung und die Themen des DLR.

# Die Welt im Wandel

Die Erde befindet sich in einem kontinuierlichen Wandel – und der Mensch löst diese Veränderungen häufig aus oder trägt in einem bedeutenden Maße dazu bei. Dazu gehören beispielsweise die zunehmende Urbanisierung und die Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung von Flächen ebenso wie der Plastikmüll in den Gewässern oder auch der Verlust der Biodiversität und die Veränderungen der Luftqualität. Deutlich spürbar ist der Wandel auch durch das Abschmelzen von Gletschern und den damit verbundenen Anstieg des Meeresspiegels.

Das Monitoring des Globalen Wandels und die Suche nach Maßnahmen, die die Auswirkungen verringern, erhalten daher eine immer größere Relevanz: 2015 wurde auf der UN-Klimakonferenz COP 21 in Paris ein Abkommen beschlossen, das die Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius, möglichst 1,5 Grad Celsius, im Vergleich zum vorindustriellen Niveau vorsieht. Der am 8. Oktober 2018 veröffentlichte Sonderbericht des Weltklimarats thematisiert die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 Grad Celsius und beschäftigt sich mit Maßnahmen zum Kampf gegen den Klimawandel.

**Erfassen, auswerten, modellieren**

Diese notwendigen Maßnahmen können jedoch nur effektiv durchgeführt werden, wenn Ist-Zustände und Veränderungsprozesse wissenschaftlich erfasst und ausgewertet werden. Auch die Effektivität der Maßnahmen kann nur objektiv beurteilt werden, wenn Veränderungen von Parametern erfasst und ausgewertet werden. Wichtig ist der Blick in die Zukunft, für den aus Messdaten Modellierungen entstehen, um Prognosen auf der Basis von wissenschaftlichen Fakten zu erstellen. Die objektive Erfassung der Veränderungsprozesse hilft auch dabei, einen nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen zu ermöglichen, bei dem Ökosysteme und Biodiversität beobachtet und geschützt werden. Nicht zuletzt erfordern Katastrophenfälle wie beispielsweise Waldbrände, Tsunamis oder Hochwasser eine exakte Beobachtung des Globalen Wandels, um rechtzeitig warnen oder angemessen reagieren zu können. Die Erdbeobachtung aus dem All ist dabei die einzige Technologie, die dieses Monitoring global, flächendeckend und in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung und Genauigkeit leisten kann – unabhängig von politischen Zwängen.

Die Raumfahrtforschung und -technologie des DLR verfügt dabei über ein entscheidendes Alleinstellungsmerkmal: Alle notwendigen Infrastrukturen und Forschungsbereiche sind abgedeckt. In den Kontrollräumen des DLR werden Satellitenmissionen wie TanDEM-X gesteuert. Die Daten aus dem All werden mit einem eigenen Antennennetzwerk unter anderem in Kanada, der Antarktis oder auch in Neustrelitz empfangen. Die Verarbeitung und wissenschaftliche Auswertung der Daten erfolgt in den DLR-Instituten. Als nationales Empfangszentrum für die Daten von Erdbeobachtungssatelliten verwaltet das DLR auch das deutsche Satellitendatenarchiv (D-SDA). Das Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation (ZKI) des DLR erstellt aus Satelliten-, Luftbildern und anderen Geodaten Informationsprodukte, die Hilfsorganisationen im Krisen- und Katastrophenfall als Basis für ihre Einsatzplanungen dienen.

**Methoden für die Zukunft**

Mit der Konzeption von Erdbeobachtungsmissionen wie der Radarmission TanDEM-L treibt das DLR die Forschung für den Globalen Wandel weiter voran und reagiert auf eine große Bandbreite wissenschaftlicher, kommerzieller, behördlicher, gesellschaftlicher und politischer Anforderungen und Bedarfe. Dabei kann das DLR auf eine langjährige Expertise in der Radartechnologie zurückgreifen, die von den Space-Shuttle-Missionen SIR-C/X-SAR (1994) und SRTM (2000) bis hin zu den Missionen mit den deutschen Radarsatelliten TerraSAR-X und TanDEM-X reicht.

Eine Herausforderung in der Erdbeobachtung sind die riesigen Datenmengen, die die Satelliten in hoher Auflösung täglich über den Zustand unseres Planeten erfassen. Konventionelle Verfahren sind kaum noch in der Lage, die vorhandenen Daten effektiv auszuwerten. Längst arbeiten die Wissenschaftler*innen auch nicht nur mit Daten der Satelliten, sondern verwenden beispielsweise zusätzlich Daten aus den sozialen Netzwerken. Zu der stetig ansteigenden Menge an Daten kommt somit auch eine Heterogenität der Daten hinzu. Die Raumfahrtforschung im DLR erforscht daher auch die Anwendung von Methoden der Künstlichen Intelligenz bei der Auswertung der Daten. Dazu werden innovative Recheninfrastrukturen im DLR betrieben und ausgebaut.

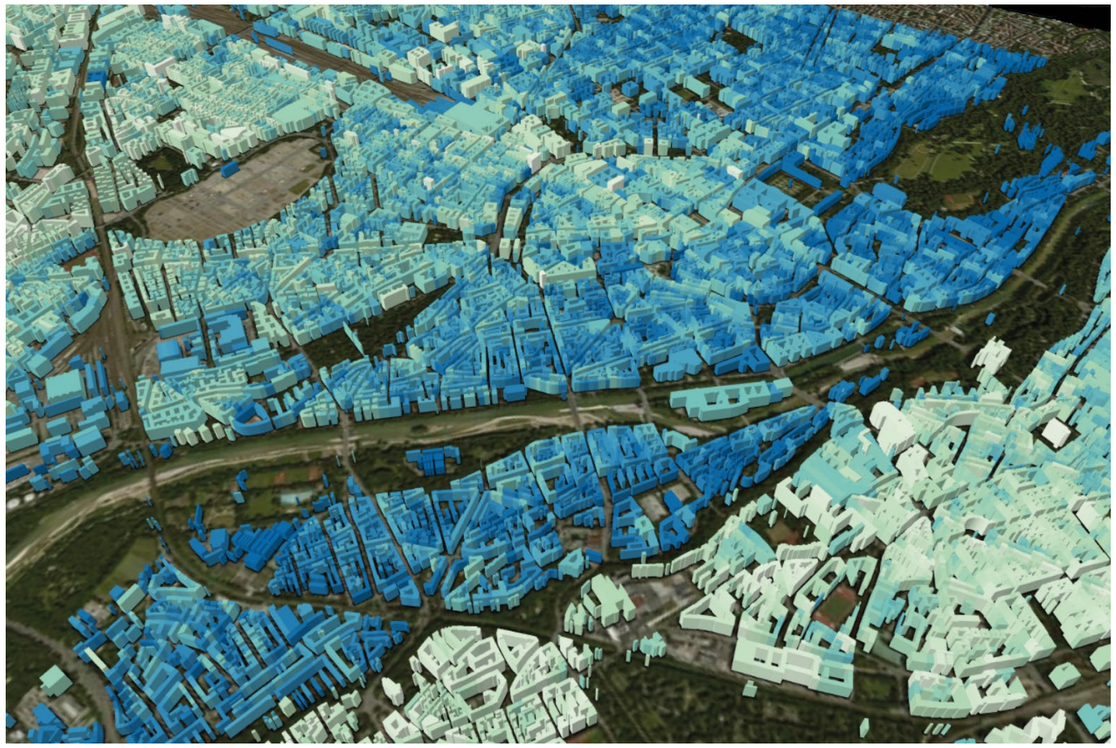
© Vit Kovalcik – stock.adobe.com

# Mit Datenbergen die Urbanisierung erforschen

Fotos von Gebäuden, Innenräumen und Essen. Bemerkungen über Politik und Wetter. Häufig auch Mitteilungen ganz ohne tieferen Inhalt. Rund 6.000 Tweets werden pro Sekunde versendet, mit Inhalten, wie sie unterschiedlicher kaum sein könnten. Jeder dieser Tweets könnte wichtig sein, weil Inhalt, Standort und Zeitpunkt zum Beispiel auch Informationen zur Nutzung eines Gebäudes geben. Nimmt man dann noch 20 Petabyte Daten der Erdbeobachtungssatelliten pro Jahr hinzu, zeigt sich die ganze Kunst, in der sich die DLR-Wissenschaftler*innen derzeit üben: Aus diesen riesigen Mengen an heterogenen Daten – optischen Satellitenbildern, Radaraufnahmen, Informationen aus den Sozialen Medien – müssen genau die Informationen herausgefiltert und miteinander verknüpft werden, die beispielsweise dabei helfen, Gebäude nach ihrer Nutzung zu unterscheiden, Rückschlüsse auf die Bevölkerungsdichte zu ziehen oder auch die Organisation der Wasserverteilung in Entwicklungsregionen zu verbessern. Denn längst sind Städte zu unübersichtlichen Gebilden geworden, in denen mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung lebt. Eine Erkundung und Analyse vor Ort, für alle urbanen Gebiete der Erde – das ist schlichtweg unmöglich.

### Maschinelles Lernen

Das Team des DLR forscht daher daran, aus den Datenbergen die richtigen Informationen zu schürfen: Wie viele Gebäude gibt es? Wie viele Menschen leben in dem Gebiet? Mit solchen Basisinformationen können Wasserverteilung, Ausbildung oder auch das Gesundheitswesen gerade in Entwicklungsregionen besser organisiert werden. Das Maschinelle Lernen, das heißt, das automatisierte Erkennen von Mustern und Gesetzmäßigkeiten über Algorithmen, wird seit Jahrzehnten in der Erdbeobachtung eingesetzt. Nun sind seit einigen Jahren aber nicht nur die Datenmengen und die Rechenleistungen exponentiell gestiegen, sondern auch neue Formen wie die Daten aus den Sozialen Medien oder den Bürgerwissenschaften für die Forschung hinzugekommen. Mit der Entwicklung neuer Algorithmen machen die Wissenschaftler*innen die Künstliche Intelligenz dafür fit, ein effektives Werkzeug für die Erdbeobachtung zu werden.



3D-Modell von München aus Radar- und optischen Daten

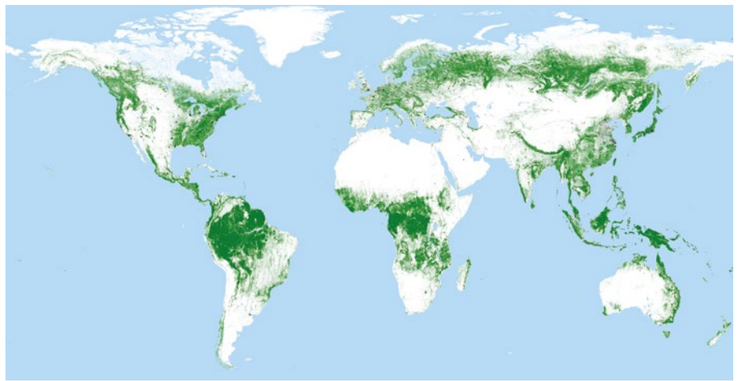


**Zwei Satelliten, die im Wochenrhythmus die Landmasse der Erde erfassen und mit dem L-Band über eine Wellenlänge verfügen, die neue und notwendige Anwendungen für die Nutzer*innen ermöglicht – die vom DLR geplante zukünftige Radarmission TanDEM-L baut auf der langjährigen Expertise des DLR in der Radartechnologie auf und liefert detaillierte Informationen zum Globalen Wandel und den damit verbundenen dynamischen Prozessen. Die Ziele sind vielfältig: Die Veränderungen der Waldbiomasse werden global und regelmäßig erfasst. Die Erdbebenforschung profitiert von der systematischen Erfassung der Deformationen der Erdoberfläche im Millimeterbereich. Der Wasserkreislauf kann durch die feinskalige Messung der oberflächennahen Bodenfeuchte besser verstanden werden. Auch Prognosen zum Anstieg des Meeresspiegels sollen sich durch die präzise Quantifizierung von Gletscherbewegungen und Schmelzprozessen in den Polarregionen verbessern.**

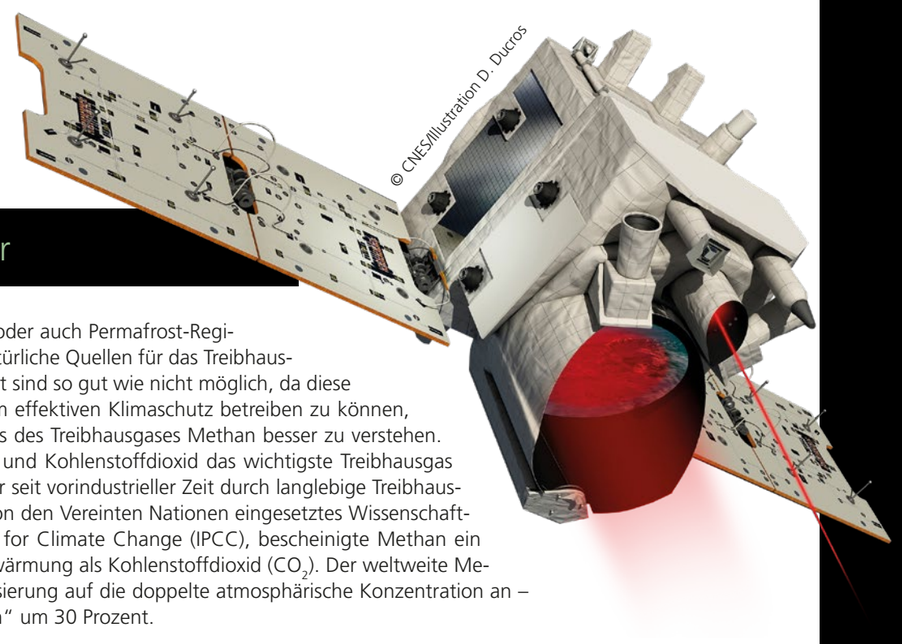
# Radaraufnahmen der „Grünen Lunge“

Satelliten blicken mit unterschiedlichen Sensoren auf die Erde: Dazu gehören passive optische Sensorsysteme, beispielsweise im sichtbaren und nahen Infrarotbereich, aktive optische Systeme wie das LIDAR (Light Detection and Ranging) sowie SAR-Sensoren (Synthetic Aperture Radar). Vor allem in der Radartechnologie hat sich das DLR eine große Expertise aufgebaut, seitdem es mit den beiden Space-Shuttle-Missionen SIR-C/X-SAR (1994) und SRTM (2000) Radaraufnahmen von der Erde erstellte. Unabhängig von Bewölkung und Tages- oder Nachtzeit erfassen derzeit die Satelliten der Missionen TerraSAR-X und TanDEM-X die Erde, sodass aus den Daten beispielsweise ein digitales und hochpräzises Höhenmodell der gesamten Erde entstand. Auch das Abbild der „Grünen Lunge“, der Waldflächen der Erde, deren Ausdehnung in einer globalen Karte mit einer Auflösung von 50 Metern dargestellt wird, ist ein Produkt der TanDEM-X-Mission. Über 400.000 Datensätze verarbeiteten die DLR-Wissenschaftler*innen, um so eine Bestandsaufnahme zu erhalten. Dafür entwickelten die Radarexperten spezielle Algorithmen, die zuerst jede einzelne Aufnahme individuell auswerten und anschließend zu einer globalen Karte zusammenfügen. Diese Algorithmen basieren auf Maschinellem Lernen aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz. Erstmals entstand so ein einheitlicher Überblick über die Regenwälder in Südamerika, Südostasien und Afrika.

Die Waldkarte ist damit auch eine wichtige Grundlage für die Aufzeichnung des Globalen Wandels und die Empfehlung notwendiger Gegenmaßnahmen: Für Behörden und Wissenschaftler*innen sind die Erkenntnisse bedeutsam, da Waldgebiete vor illegaler Abholzung geschützt und als mächtige Kohlenstoff-Speicher erhalten werden müssen. Weitere potenzielle Nutzer*innen kommen aus der Landwirtschaft, der Forstwirtschaft, der Regionalentwicklung sowie der Raumplanung.



TanDEM-X-Waldkarte der Welt (l.), Abholzung des Regenwalds in Brasilien (r.)


© CNES/Illustration D. Ducros

## Dem Methan auf der Spur

Regenwälder, tropische Feuchtgebiete oder auch Permafrost-Regionen haben etwas gemeinsam: Sie sind natürliche Quellen für das Treibhausgas Methan ($CH_4$) – und Messungen vor Ort sind so gut wie nicht möglich, da diese Gebiete oftmals kaum zugänglich sind. Um effektiven Klimaschutz betreiben zu können, ist es aber dringend notwendig, den Zyklus des Treibhausgases Methan besser zu verstehen. Schließlich ist Methan nach Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid das wichtigste Treibhausgas und verantwortlich für etwa 20 Prozent der seit vorindustrieller Zeit durch langlebige Treibhausgase verursachten Klimaerwärmung. Ein von den Vereinten Nationen eingesetztes Wissenschaftlergremium, das Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC), bescheinigte Methan ein 25-fach höheres Potenzial zur globalen Erwärmung als Kohlenstoffdioxid ($CO_2$). Der weltweite Methangehalt stieg seit Beginn der Industrialisierung auf die doppelte atmosphärische Konzentration an – der Gehalt von Kohlenstoffdioxid „lediglich“ um 30 Prozent.

### Hochpräzise Messungen

Der deutsch-französische Kleinsatellit MERLIN (Methane Remote Sensing LIDAR Mission) wird aus rund 500 Kilometer Höhe einen freien Blick auf die Erde haben: Drei Jahre soll MERLIN ab 2024 mit Hilfe eines LIDAR-Instruments (Light Detecting and Ranging) den Methangehalt in der Erdatmosphäre global und hochpräzise messen und so unter anderem die Daten für eine Weltkarte der natürlichen und anthropogenen Methankonzentration liefern. So kann auch unterschieden werden, was die Freisetzung von Methan verursacht. Das Treibhausgas entsteht bei der Zersetzung von biologischem Material durch Mikroorganismen in einer sauerstofffreien Umgebung. In Zukunft könnte der Klimawandel dafür sorgen, dass Permafrostböden auftauen und die Ozeane sich erwärmen – und somit die Methangaskonzentration in der Atmosphäre stark ansteigt. Die wesentlichen vom Menschen verursachten Methan-Quellen sind Reisanbau, Viehhaltung, Erdöl- sowie Erdgas-Förderung, Bergbau und Mülldeponien.

Am Bau des LIDAR-Instruments ist ein Konsortium aus Firmen und Forschungsinstituten aus Deutschland, Frankreich und den Niederlanden beteiligt. Das aktive LIDAR kann auch bei Nacht und durch dünne Wolken hindurch messen. Die wissenschaftliche Verantwortung für das Instrument liegt bei den Atmosphärenforscher*innen der DLR-Raumfahrtforschung.

## Friedensnobelpreis für den Klimaschutz

**Als 2007 der Friedensnobelpreis zu gleichen Teilen an Al Gore und an den Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) ging, wurden indirekt auch Wissenschaftler*innen des DLR ausgezeichnet: Als Autor*innen und Gutachter*innen arbeiten die DLR-Klimaforscher*innen an der Erstellung der regelmäßigen Klima-Reports des IPCC mit, die politischen Entscheidungsträgern als neutrale, objektive Grundlage zur Verfügung gestellt werden. Ihre anspruchsvolle Aufgabe: den weltweiten Forschungsstand über die Auswirkungen des Klimawandels und seine Risiken sowie Minderungs- und Anpassungsstrategien zu erfassen und aus wissenschaftlicher Sicht zu bewerten. Auch die World Meteorological Organization (WMO) der Vereinten Nationen nutzt die Expertise der DLR-Klimaforscher*innen: Sie arbeiten an der Erstellung des alle vier Jahre publizierten Ozonberichts mit.**

ipcc
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON climate change
WMO UNEP

**24/7**
und somit rund um die Uhr kann das ZKI des DLR aktiviert werden

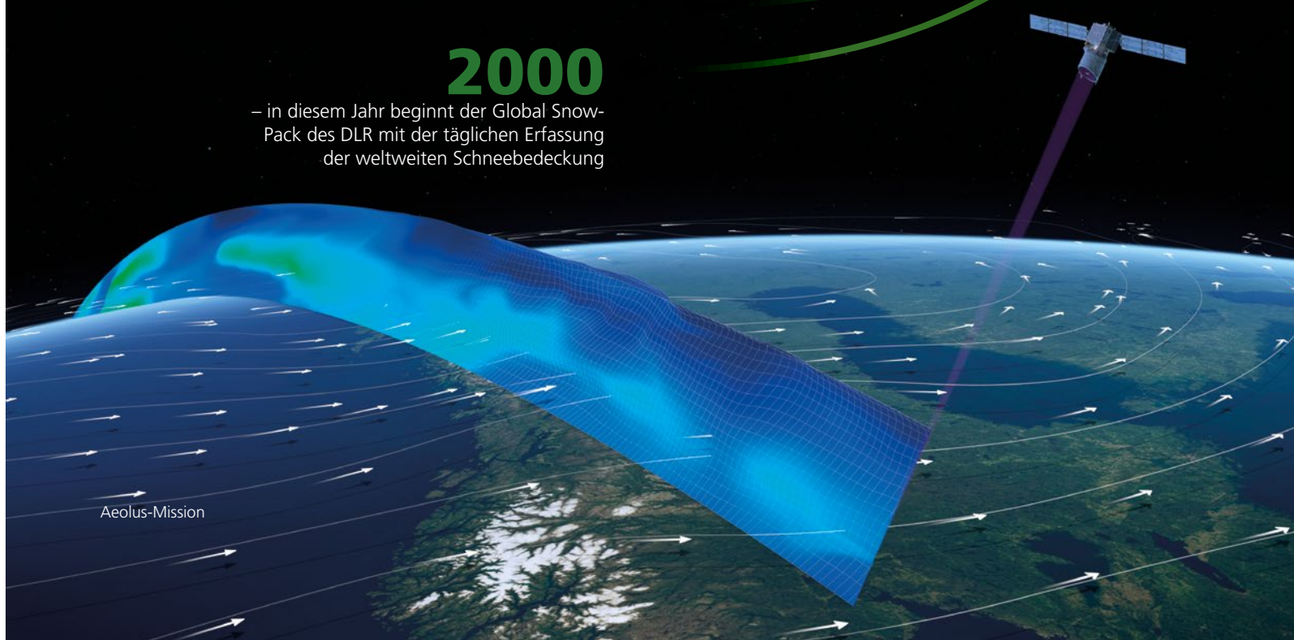
**2.403**
Wissenschaftler*innen aus 70 Ländern arbeiten mit den Daten der TanDEM-X-Mission

**150 Mio.**
Quadratkilometer Landfläche hat die TanDEM-X-Mission mehrfach abgedeckt

**500**
Institutionen nutzen den Global Urban Footprint des DLR

**30**
Petabyte – die Datenmenge von 6.690.000 DVDs – sind im Satellitendatenarchiv im DLR gespeichert

**2000**
– in diesem Jahr beginnt der Global Snow-Pack des DLR mit der täglichen Erfassung der weltweiten Schneebedeckung


Aeolus-Mission

# Der Mensch im All

Der Weltraum beginnt in einer Höhe von 100 Kilometern über dem Meeresspiegel – zumindest, wenn man der Festlegung der Fédération Aéronautique Internationale (FAI) folgt. Dort endet die Luftfahrt und die Raumfahrt beginnt. Nur wer diese Höhe überschritten hat, zählt somit als Astronaut*in. Die International Association of Space Explorers (ASE) hingegen stellt noch eine weitere Bedingung: Ein(e) Raumfahrer*in muss mindestens eine Erdumkreisung absolviert haben. Der Erste, der beide Bedingungen erfüllte, ist der Kosmonaut Juri Gagarin, der am 12. April 1961 im Raumschiff Wostok 1 die Erde umrundete. Seitdem sind Astronaut*innen in der Raumfahrtforschung unersetzlich, denn sie tragen wesentlich dazu bei, dass eine Vielzahl an Experimenten in der Schwerelosigkeit durchgeführt werden kann. Mittlerweile können Roboter oder robotische Assistenten zwar Aufgaben übernehmen oder unterstützen – den Menschen in der Forschung komplett ersetzen können sie hingegen nicht.

© ESA/NASA

Das fliegende Zuhause der heutigen Astronaut*innen reist in einer Höhe von rund 400 Kilometern um die Erde: Die Internationale Raumstation ISS, das größte Kooperationsprojekt der Menschheit im All, nahm ihren Anfang am 20. November 1998, als das russische Sarja-Modul als erstes Element in die Erdumlaufbahn gebracht wurde. 16 Tage später wurde es mit dem amerikanischen Unity-Modul verbunden. Am 2. November 2000 war es dann so weit: Die erste „Astronauten-WG“ – die erste Langzeit-Crew – zog in ihr Domizil. Seitdem ist der Außenposten im All ein wichtiger Bestandteil der Raumfahrtforschung: Über 2.500 Experimente wurden seitdem von mehr als 3.600 Wissenschaftler*innen aus 106 Ländern in der Schwerelosigkeit durchgeführt.

© NASA

### Von Materialphysik bis Erdbeobachtung

Zu den Experimenten, die das DLR an Bord der Internationalen Raumstation durchführt, gehört beispielsweise die Untersuchung der Strahlenbelastung, die innerhalb und außerhalb der Labormodule sowie direkt am Körper der Astronauten entsteht. Mit materialphysikalischen Experimenten, zum Beispiel im Elektromagnetischen Levitator (EML), erforscht das DLR Erstarrungsvorgänge, um metallurgische Produktionsprozesse auf der Erde effizienter zu gestalten. Damit könnten unter anderem industrielle Gießprozesse von Turbinenschaufeln oder Motorgehäusen optimiert werden. Auch die Erdbeobachtung profitiert von dem fliegenden Labor im All: Das Hyperspektralinstrument DESIS (DLR Earth Sensing Spectrometer) wurde 2018 zum Monitoring von Umwelt und Ressourcen der Erde auf der Forschungsplattform MUSES an der Außenseite der ISS installiert. Die gewonnenen Daten zeigen Veränderungen im Ökosystem der Erdoberfläche und ermöglichen es, den Gesundheitszustand von Wäldern, Seen und Flüssen sowie landwirtschaftlichen Flächen zu beurteilen. Diese Daten tragen zur Dokumentation des Globalen Wandels bei.

### Konzepte für die Zeit nach der ISS

Mit dem „Orbital Hub“ – einer Studie zu einer zukünftigen bemannten Raumstation – bereitet das DLR sich auf eine Zeit nach dem Ende der derzeitigen ISS vor. Bisher haben sich die internationalen Partner auf eine Betriebszeit bis mindestens 2024 geeinigt. Will man rechtzeitig eine Nachfolge-Raumstation realisieren, müssen die Vorbereitungen jetzt beginnen: Die über Jahrzehnte gewonnene Expertise muss gesichert werden und ist auch zwingend erforderlich, um in Zukunft Missionen zu Mond oder Mars zu senden. Eine astronautische Präsenz im erdnahen Orbit ist als Plattform für die notwendige Technologieerprobung und für weiterführende Langzeitmissionen unerlässlich, bevor eine nachhaltige, kontinuierliche und interdisziplinäre Forschung umgesetzt werden kann.

Ein weiterer wichtiger Schwerpunkt der Raumfahrtforschung ist es daher auch, die Gesundheit der Astronaut*innen zu erhalten: Knochen- und Muskelabbau, die Beeinträchtigung des Sehvermögens, die Beeinflussung von Immunsystem und Kognition, die Erhöhung des Hirndrucks oder auch die erhöhte Strahlenbelastung gehören zu den negativen Auswirkungen, die ein längerer Aufenthalt in der Schwerelosigkeit mit sich bringt. Die Raumfahrtmedizin forscht daher an einem besseren Verständnis von Stoffwechsel und Herz-Kreislauf-System und sucht nach effektiven Gegenmaßnahmen.

# Astronautinnen für die Reise zum Mond

Über 5.600 passive Strahlungsdetektoren, 16 aktive Detektoren und eine Strahlungsschutzweste – das ist die Ausstattung, die die DLR-Raumfahrtmediziner den beiden nächsten Passagieren zum Mond mitgeben. Dieses Mal werden zwei Frauen die Reise unternehmen: Helga und Zohar. Ihr Raumschiff: die Orion-Kapsel der amerikanischen Weltraumbehörde NASA. Ihre Bestimmung: die Strahlenbelastung auf dem 42 Tage dauernden Flug zu vermessen. Die beiden „Astronautinnen“, die 2020 während des ersten Orion-Flugs um den Mond an Bord sein werden, sind zwei weibliche Phantome, 95 Zentimeter hoch und aus 38 Scheiben aufgebaut, in denen kleine Kristalle die Strahlung auf dem Flug durchs All aufzeichnen werden.

Für den Menschen im Weltraum stellt die Weltraumstrahlung ein großes gesundheitliches Risiko dar. Deren Auswirkungen auf den menschlichen Körper sind ein entscheidender und möglicherweise limitierender Faktor für geplante zukünftige Langzeitaufenthalte des Menschen im freien Weltraum. Um dieses Strahlenrisiko genauer bestimmen und mögliche Maßnahmen zum Schutz entwickeln zu können, wird das DLR mehr als 50 Jahre nach der ersten Mondlandung das Experiment MARE (Matroshka AstroRad Radiation Experiment) mit der ARTEMIS-1-Mission der NASA zum Mond schicken. Die beiden „Zwillinge“ werden sich auf ihrem Flug lediglich in einem unterscheiden: Die israelische Zohar trägt eine Strahlenschutzweste (AstroRad) des Industriepartners StemRad, die deutsche Helga nicht.

### Mehrere Tausend Detektoren

Am DLR werden die beiden „Passagiere“ nun für das MARE-Experiment vorbereitet. Zum einen werden 1.400 Sensorplätze mit mehreren Tausend aus Kristallen bestehenden Strahlungsdetektoren bestückt, zum anderen werden die Sensoren der aktiven Detektoren an den strahlenempfindlichsten Organen des Körpers – Lunge, Magen, Gebärmutter und Knochenmark – integriert. Während die passiven Detektoren vom Start bis zur Rückkehr zur Erde kontinuierlich messen und die Gesamtbelastung erfassen sollen, werden die aktiven, batteriebetriebenen Detektoren während des Starts eingeschaltet und speichern dann zeitlich aufgelöst die Strahlenbelastung. Erstmals wird so mit einer hohen Genauigkeit gemessen, welche Strahlenbelastung bei einem bemannten Flug zum Mond für die Astronaut*innen entsteht.

Das Experiment gründet auf der Erfahrung bisheriger Messungen auf der Internationalen Raumstation: Von 2004 bis 2011 forschten die DLR-Strahlenmediziner*innen mit der Matroshka, einem männlichen Phantom, das sowohl im Inneren als auch an der Außenseite der Internationalen Raumstation ISS der Strahlung ausgesetzt wurde. Auch innerhalb des europäischen Forschungslabors Columbus misst das DLR derzeit mit dem Experiment DOSIS 3D, welche Strahlungsbelastung dort herrscht. MARE stellt in seiner Komplexität und in seiner internationalen Zusammenarbeit mit zahlreichen Universitäten und Forschungseinrichtungen in Österreich, Belgien, Polen, Ungarn, der Tschechischen Republik, Griechenland, der Schweiz, Japan und den USA das größte Experiment zur Bestimmung der Strahlenbelastung für Astronaut*innen dar, das jemals den erdnahen Orbit verlassen hat.

© NASA

Die Orion-Kapsel für die Reise zum Mond



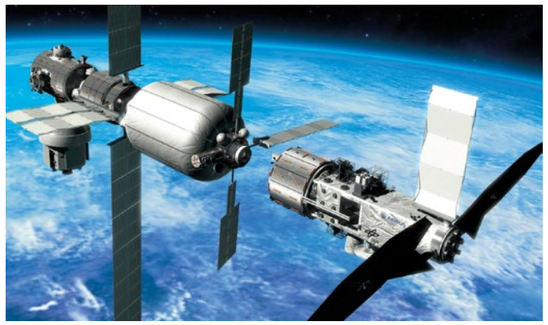
## Forschung für die Gesundheit

**Wie ein gelandetes Raumschiff liegt die Großforschungsanlage :envihab auf dem Gelände des DLR – auf 3.500 Quadratmetern können hier unter kontrollierten Bedingungen die negativen Auswirkungen der Schwerkraft erzeugt und Gegenmaßnahmen erprobt werden. Im Inneren des Gebäudes: eine Kurzarmzentrifuge, ein PET-MRT, eine Druckkammer, Physiologie- und Biologie-Labore sowie ein Wohnbereich, in dem Proband*innen während der Studie leben. Geforscht wird für die Gesundheit der Astronaut*innen, aber auch für das bessere Verständnis von Alterung, Bettlägerigkeit, Immobilisation und Isolation bei irdischen Patienten.**

# Orbital Hub – die Forschungsplattform im All

Die Internationale Raumstation ISS nahm 1998 ihren Anfang mit dem russischen Frachtmodul Sarja – bereits zwei Jahre später zogen die ersten astronautischen Bewohner ein. Seitdem ist die Plattform in 400 Kilometer Höhe ein fliegendes Labor in der Schwerelosigkeit. Technisch wäre der Betrieb – so schätzt die amerikanische Weltraumbehörde NASA – allerdings nur noch bis 2028 möglich. Das DLR hat daher bereits jetzt ein Konzept entworfen, wie eine zukünftige Forschungsplattform im niedrigen Erdorbit für die Zeit ab 2028 aussehen könnte.

Der sogenannte „Orbital Hub“ würde dabei aus einem unbemannten Free Flyer sowie einem Wohn- und einem Servicemodul bestehen. Dieser Free Flyer kann über längere Zeit vom bemannten Teil der Plattform abdocken und die bemannte Basis im Formationsflug begleiten – so wird gewährleistet, dass Experimente ungestört von astronautischen Aktivitäten durchgeführt werden können. Im Inneren des Free Flyers befinden sich vor allem sensible Experimente, die eine besonders hohe Qualität der Mikrogravitation benötigen. Extern lässt sich der Free Flyer mit Instrumenten bestücken, die hohe Anforderungen an Ausrichtung und Vibrationsumgebung haben, wie beispielsweise die Erdbeobachtung oder Technologiedemonstrationen.



Der modular aufgebaute Orbital Hub mit Basis und Free Flyer

### Architektur nach Nutzeranforderungen

Das Habitat der 3-Personen-Crew mit Laborbereich bildet das Kernstück der Basisplattform. Ein Andock-Knoten ermöglicht sowohl den Austausch von Crewmitgliedern als auch die Anlieferung von Material. Auch weitere Module können an diesem Knoten andocken und die Basisstation auf diese Weise vergrößern. Entstanden ist diese modulare Architektur auf der Basis von Nutzerbefragungen, die die Anforderungen an ein Nachfolgemodell der ISS definierten. Wichtig war den Wissenschaftler*innen aus den verschiedensten Forschungsbereichen vor allem, dass Experimente in Echtzeit beobachtet und Auswertungen von Daten vor Ort – ohne die Rückkehr von Proben zur Erde – durchgeführt werden können.

### Kostengünstig und nachhaltig

Die zukünftige Plattform im niedrigen Erdorbit, die in Zusammenarbeit mit internationalen Partnern und der Industrie innerhalb der nächsten zehn Jahre umgesetzt werden könnte, soll Europa einen kontinuierlichen und deutlich kostengünstigeren Zugang zum niedrigen Erdorbit zwischen 350 und 500 Kilometern garantieren und so Forschungsmöglichkeiten, Technologiedemonstrationen sowie die Vorbereitung von zukünftigen Explorationen ermöglichen. Abgestimmt auf die jeweiligen Anforderungen einer Mission kann die Station nach dem Konzept des DLR sowohl bemannt als auch unbemannt genutzt werden. Von großer Bedeutung wird die hohe Funktionalität der ISS-Nachfolgestation sein – mit der zunehmenden Notwendigkeit, den Globalen Wandel zu erfassen und zu untersuchen, könnte ein „Orbital Hub“ zum Beispiel der Klimaforschung als nachhaltiges Instrument dienen. In einer Übergangszeit wäre es möglich, mit dem Free Flyer an bereits bestehende Module der Internationalen Raumstation ISS anzudocken. So würde auch die Außerbetriebnahme der Internationalen Raumstation nicht das Ende bedeuten: Einzelne Module könnten weiterhin im Einsatz bleiben.

# Irdische Astronaut*innen in Schräglage

Wer jemals die vor der Kamera schwebenden Astronaut*innen auf der Internationalen Raumstation ISS genauer angesehen hat, merkt schon am Äußeren, welche Wirkung die Schwerelosigkeit auf den menschlichen Körper hat: „Puffy face“ – ein aufgedunsenes, leicht rötliches Gesicht – und „chicken legs“ – dünne Beine – stellen sich am schnellsten ein, wenn der Körper ohne Schwerkraft kein Unten und Oben mehr spürt. Auch der Hirndruck und die Sehfähigkeit können beeinträchtigt sein. In der Forschungsanlage :envihab des DLR kann man diesen Nebenwirkungen so nahe kommen, wie es auf der Erde nur möglich ist: Meist über mehrere Wochen liegen in den Bettruhestudien des DLR gesunde Proband*innen in ihren Betten – die zum Kopf hin um sechs Grad nach unten geneigt sind. Die Schieflage löst im Körper aus, was Astronaut*innen auf ihren Missionen im All erleben: Die Körperflüssigkeiten verschieben sich in Richtung Oberkörper, Knochen und Muskeln der unteren Körperhälfte bauen sich durch die Bewegungslosigkeit ab. Auch die Atmosphäre kann innerhalb des :envihab verändert und beispielsweise der $CO_2$-Gehalt erhöht werden. Nur so kann erforscht und verstanden werden, wie man die Gesundheit der Astronaut*innen erhalten kann.

Für die Proband*innen als irdische Astronaut*innen ist die Zeit während der Studie nicht weniger eine Herausforderung als eine Mission für die Berufsastronaut*innen im All. Die Regeln sind strikt: Essen, trinken, duschen – alles muss im Liegen erfolgen. Täglich stehen eng getaktet medizinische und ärztliche Untersuchungen auf dem Plan. Eine Studie umfasst hunderte Stunden Experimentzeit und oftmals weit über hundert einzelne Experimente. Während bei einigen Proband*innen gezielte Gegenmaßnahmen wie Zentrifugenfahrten oder Training auf einem Sprungschlitten zum Tagesablauf gehören, erhält jeweils eine Kontrollgruppe keine Gegenmaßnahmen. Das Ergebnis: Wertvolle Datensätze, die im Vergleich zeigen, welche Maßnahmen die Astronaut*innen möglichst effektiv vor den negativen Auswirkungen der Schwerelosigkeit schützen können.

Liegen für die Wissenschaft

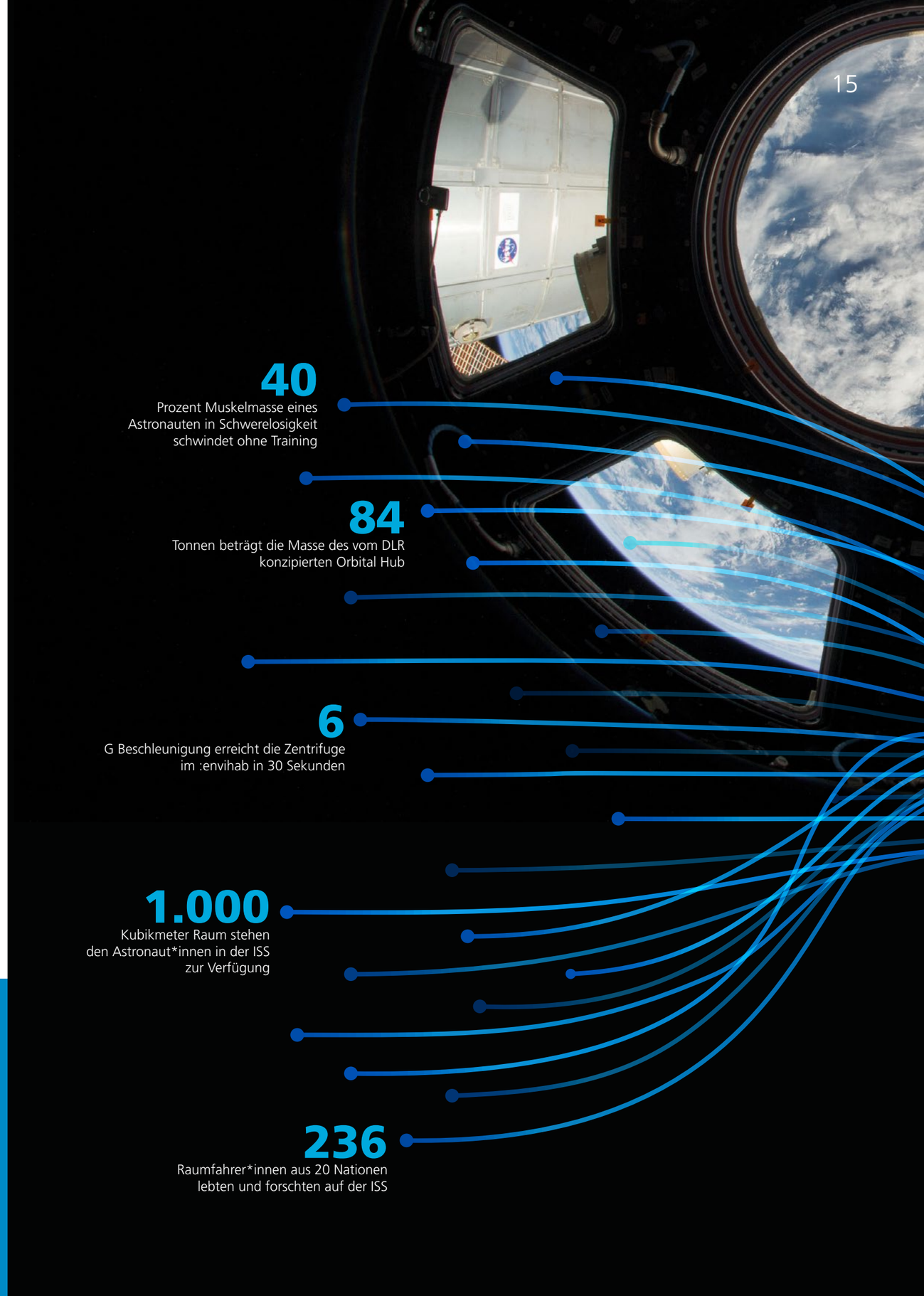
### Effektives Training für die Gesundheit

In Zusammenarbeit mit Partnern wie der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA, aber auch der Europäischen Raumfahrtagentur ESA sowie Forschungseinrichtungen hat das DLR zahlreiche Bettruhestudien durchgeführt: Die erste Bettruhestudie mit der ESA fand 2001 statt. 2015 wurde mit der Bettruhestudie RSL getestet, ob ein Training auf einem Sprungschlitten den Knochen- und Muskelschwund reduzieren kann. 2017 untersuchte das DLR-Team gemeinsam mit der NASA in der Langzeit-Bettruhestudie VAPER Sehstörungen, Hirndruck sowie physiologische und psychologische Auswirkungen unter Einfluss erhöhter $CO_2$-Atmosphäre. 2019 erfolgte mit AGBRESA dann erstmals eine Kooperation von DLR, ESA und NASA bei einer Bettruhestudie: Mit Zentrifugenfahrten setzten die Wissenschaftler die Proband*innen einer künstlichen Gravitation von 1 G aus.

Noch müssen Astronaut*innen auf der Internationalen Raumstation ISS täglich ein zweistündiges Sportprogramm absolvieren, um ihre Gesundheit zu erhalten. In Zukunft könnten vielleicht eine Zentrifuge oder ein Sprungschlitten während einer Langzeitmission das zeitaufwändige Sportprogramm im All etwas verkürzen. Nicht zuletzt helfen die Forschungsergebnisse der Raumfahrtmediziner*innen auch irdischen Patient*innen: Langzeitige Bettlägerigkeit oder schwere Unfälle haben oftmals ähnliche Auswirkungen – Muskel- und Knochenschwund, ein beeinträchtigtes Immunsystem oder einen geschwächten Kreislauf – wie die in Bettruhestudien künstlich herbeigeführten körperlichen Auswirkungen.

## Vom All ins :envihab

**Die erste Nacht auf irdischem Boden – mit Schwerkraft, frischer Luft und Stille – verbringen die europäischen Astronaut*innen seit 2014 im :envihab des DLR. Nach dem mehrstündigen Flug mit der Sojus-Kapsel, einer Landung in der kasachischen Steppe und einem Flug über Moskau nach Köln wurden Astronauten wie Alexander Gerst, Andreas Mogensen, Tim Peak und Thomas Pesquet zu „Versuchskaninchen“ für eine Vielzahl von Experimenten: Die Mediziner*innen des DLR untersuchten beispielsweise den zirkadianen Rhythmus (Schlaf-Wach-Rhythmus), den Nährstoffverbrauch, die Muskeln sowie Herz, Arterien und Knochen.**



**40**
Prozent Muskelmasse eines Astronauten in Schwerelosigkeit schwindet ohne Training

**84**
Tonnen beträgt die Masse des vom DLR konzipierten Orbital Hub

**6**
G Beschleunigung erreicht die Zentrifuge im :envihab in 30 Sekunden

**1.000**
Kubikmeter Raum stehen den Astronaut*innen in der ISS zur Verfügung

**236**
Raumfahrer*innen aus 20 Nationen lebten und forschten auf der ISS

# Auf Mission zu Himmels körpern

Unser Sonnensystem entstand vor rund 4,5 Milliarden Jahren – die Erkenntnis, dass sich die Erde um die Sonne dreht, setzte sich aber erst im 16. Jahrhundert mit Nikolaus Kopernikus durch. Der anfängliche Gedanke, die Strukturen auf dem Mars seien künstliche, von Marsianern angelegte Kanäle ist mittlerweile auch widerlegt. Viele Fragen sind aber auch bis heute noch nicht eindeutig geklärt: Wie entstehen und entwickeln sich Planeten und Planetensysteme? Welche Bedingungen sind notwendig, damit Planeten und Monde habitabel, also möglicherweise Orte für Leben sind? Und wie können wir dieses Leben feststellen? Um Antworten auf diese Fragen zu finden, sendet die Planetenforschung des DLR unter anderem Kameras, Spektrometer und Radiometer auf Orbitern und Landegeräten zu den Himmelskörpern des Sonnensystems und sucht mit Teleskopen nach Exoplaneten - Planeten, die sich außerhalb unseres Sonnensystems befinden und einem anderen Planetensystem zugeordnet sind.

In irdischen Observatorien und Laboren findet die Forschung statt, die diese Missionen vorbereitet oder die gewonnenen Daten verifiziert. Die gesamten Datenschätze werden wiederum für Modellierungen an Rechnern verwendet, um unter anderem weitere Erkenntnisse über Zusammensetzung, Struktur und Alter planetarer Krusten oder den inneren Aufbau planetarer Körper zu gewinnen. Auch die Konzeption, Entwicklung und Qualifizierung von Instrumenten sowie deren Betrieb und die Auswertung der anfallenden Daten werden am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt durchgeführt.

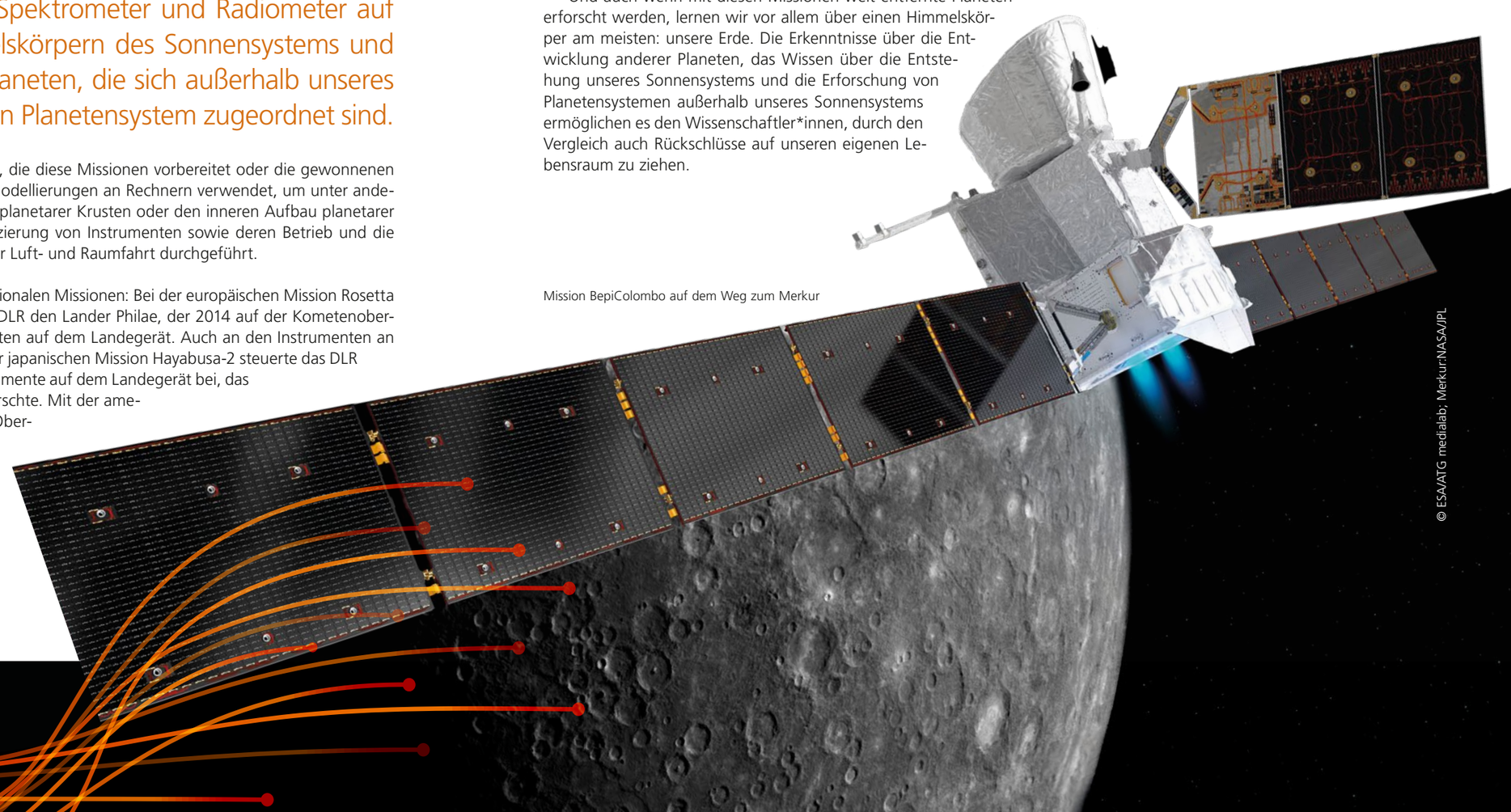
Daher ist das DLR seit Jahrzehnten ein wichtiger Partner bei internationalen Missionen: Bei der europäischen Mission Rosetta zum Kometen Churyumov-Gerasimenko entwickelte und betrieb das DLR den Lander Philae, der 2014 auf der Kometenoberfläche aufsetzte. Zudem stellte es drei von insgesamt zehn Experimenten auf dem Landegerät. Auch an den Instrumenten an Bord von Orbiter Rosetta war das DLR wissenschaftlich beteiligt. Bei der japanischen Mission Hayabusa-2 steuerte das DLR den Lander MASCOT (Mobile Asteroid Surface Scout) sowie zwei Instrumente auf dem Landegerät bei, das 2018 über 17 Stunden lang die Oberfläche des Asteroiden Ryugu erforschte. Mit der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA untersucht das DLR derzeit die Oberfläche des Mars: Der NASA-Lander InSight landete 2018 auf dem Roten Planeten – mit an Bord: der Marsmaulwurf des DLR.

**Zu eisigen Monden und Exoplaneten**

Die nächsten Missionen in Kooperation mit internationalen Partnern sind bereits auf dem Weg zu ihren Zielen oder werden derzeit vorbereitet. So fliegt die japanisch-europäische Sonde BepiColombo gerade durch das Weltall in Richtung Merkur – mit zwei Instrumenten des DLR. Die europäische Mission CHEOPS zur Erkundung von Exoplaneten ist startbereit, Missionen wie PLATO, ExoMars oder Mars2020 sind mit Beteiligungen des DLR in der Umsetzung. Gemeinsam mit Japan und Frankreich soll Marsmond Phobos mit einem Rover erforscht werden, in Kooperation mit der europäischen Raumfahrtagentur ESA wird das DLR die eisigen Monde des Jupiter mit der Mission JUICE erkunden.

Ziel des DLR ist es, möglichst komplette Erkundungen der jeweiligen Himmelskörper umzusetzen. Dies geschieht zum einen aus dem Orbit mit Instrumenten der Fernerkundung – die Planetenforschung des DLR hat beispielsweise eine umfassende und langjährige Expertise in der Kartierung von Planeten und Asteroiden sowie in der Erstellung von 3D-Geländemodellen. Die Forschung mit Instrumenten unmittelbar auf der Oberfläche der Himmelskörper soll mit Hilfe der Robotik zukünftig auf größere Areale ausgeweitet werden: Entwicklungen wie Rover, die weite Strecken autonom und schnell zurücklegen können, sind dafür ein notwendiger Schritt. Sie ermöglichen Erkundungen und In-situ-Untersuchungen an vielen verschiedenen Stellen.

Und auch wenn mit diesen Missionen weit entfernte Planeten erforscht werden, lernen wir vor allem über einen Himmelskörper am meisten: unsere Erde. Die Erkenntnisse über die Entwicklung anderer Planeten, das Wissen über die Entstehung unseres Sonnensystems und die Erforschung von Planetensystemen außerhalb unseres Sonnensystems ermöglichen es den Wissenschaftler*innen, durch den Vergleich auch Rückschlüsse auf unseren eigenen Lebensraum zu ziehen.



Mission BepiColombo auf dem Weg zum Merkur

© ESA/ATG medialab; Merkur:NASA/JPL

# PLATO und CHEOPS – die Suche nach der zweiten Erde

In einer genau ausbalancierten, günstigen Entfernung von seinem Stern, mit Wasser auf der Oberfläche – so sollte der Planet sein, den die Wissenschaftler*innen der PLATO-Mission außerhalb unseres Sonnensystems entdecken wollen. 2026 soll das Weltraumteleskop PLATO (PLAnetary Transits and Oscillations of Stars) starten und anschließend in 1,5 Millionen Kilometer Entfernung von der Erde – von einem der Lagrange-Punkte aus – für mindestens vier Jahre den Himmel beobachten. Dabei, so schätzen die DLR-Planetenforscher*innen, wird das Teleskop Tausende neuer Planeten an sonnenähnlichen Sternen entdecken und charakterisieren. Das DLR leitet dabei das internationale Konsortium, das sich auf die Suche nach einer zweiten Erde macht, aber auch neue Erkenntnisse über die Entwicklung von Planetensystemen gewinnen will.

Das erste Ziel: ein Planetensystem zu finden, das unserem Sonnensystem ähnlich ist. 26 einzelne Teleskope auf einer Beobachtungsplattform werden dafür zusammengeschaltet und somit gebündelt. So sollen Planeten gefunden werden, die ihren sonnenähnlichen Stern in der lebensfreundlichen, der habitablen Zone umkreisen.

### Eine Million Sterne im Blick

Um die weit entfernten Planeten zu entdecken, die um ihre hellen Sterne wie die Erde um die Sonne kreisen, greifen die Wissenschaftler*innen auf eine „indirekte" Methode zurück: Sie beobachten die hellen Sterne – zieht ein Planet dann bei seiner Umlaufbahn vor dieser „Sonne" vorbei, schwächt er bei diesem „Transit" deren Licht leicht ab. Die Mission wird ungefähr die Hälfte des Himmels beobachten und dabei etwa eine Million Sterne untersuchen.

Von den Arbeiten der bisherigen Exoplaneten-Missionen wie Kepler oder CoRot wird wiederum die Mission CHEOPS (CHaracterising ExOPlanet Satellite) profitieren – das Weltraumteleskop, das Ende 2019 starten soll, wird nicht suchen, sondern untersuchen: 700 Kilometer über der Erde wird es seinen Blick auf einige der über 4.000 bereits bekannten Exoplaneten richten. CHEOPS' Ziele liegen in der Größenordnung zwischen Erde und Neptun. Das DLR steuert dafür unter anderem das Fokalebenenmodul für den Aufnahmesensor bei und ist an der Auswertung der Daten beteiligt. Mit der Vermessung von Größe, Masse und Dichte können dann diese Welten außerhalb unseres Sonnensystems charakterisiert werden. Ist der Planet überwiegend felsig oder besteht er aus Gasen? Befindet sich ein Ozean auf seiner Oberfläche? Und vor allem: Wie wahrscheinlich ist es, dass dieser Exoplanet habitabel ist – also über Voraussetzungen für erdähnliches Leben verfügt?

Weltraumteleskop PLATO auf der Suche nach Exoplaneten

**Sieben Jahre wird die Reise dauern, die die Raumsonde BepiColombo am 20. Oktober 2018 angetreten hat: Die japanisch-europäische Mission zum Merkur erreicht ihr Ziel 2025 und trägt zwei Instrumente des DLR mit an Bord. Das Laseraltimeter BELA (BepiColombo Laser Altimeter) wird dann aus der Laufzeit von Millionen von Laserpulsen die Daten für ein 3D-Modell der gesamten Oberfläche des Merkur liefern. Das Infrarot-Spektrometer und Radiometer MERTIS (Mercury Radiometer and Thermal Infrared Spectrometer) untersucht die Zusammensetzung und Temperatur der Merkur-Oberfläche. Bisher wurde der sonnennächste Planet nur wenig erforscht.**

# Ein Maulwurf auf dem Roten Planeten

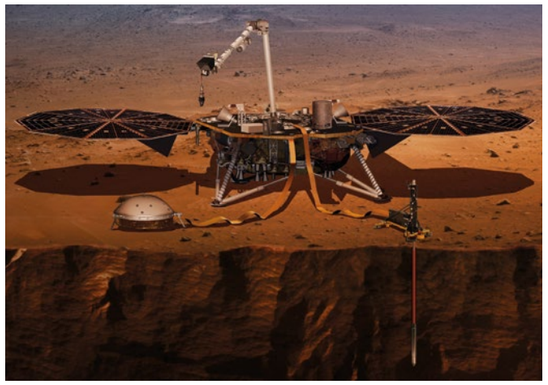
Orbiter haben den Mars umkreist und mit wissenschaftlichen Instrumenten untersucht, Lander haben auf seiner Oberfläche aufgesetzt, und Rover haben die Umgebung erkundet – und dennoch ist der Rote Planet weiterhin kein alltägliches Terrain für Missionen. Als Forschungsobjekt bleibt er daher spannend und zugleich eine Herausforderung. Am 26. November 2018 landete der Maulwurf des DLR an Bord der NASA-Mission InSight sicher in der Marsebene Elysium Planitia. Die Umgebung: relativ flach und mit wenigen Steinen auf der Planetenoberfläche. Eigentlich ideale Bedingungen für das Experiment HP$^3$ (Heat Flow and Physical Properties Package), das sich bis zu fünf Meter in den Boden hämmern und ein mit 14 Temperatursensoren ausgestattetes Flachbandkabel in den Marsboden hineinziehen soll. Über ein Marsjahr – oder zwei Erdjahre – hinweg sollen dann Temperatur und Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds gemessen werden. Ein Radiometer des DLR unterhalb des Lander-Decks misst währenddessen die Temperatur der Oberfläche. So wollen die Forscher die thermische Aktivität des Planeten untersuchen und Rückschlüsse auf die „Wärmekraftmaschine" Mars und ihre innere Dynamik ziehen.

Die 40 Zentimeter lange Rammsonde – auch „Maulwurf" genannt – nahm ihre Arbeit am 28. Februar 2019 auf: Allerdings erreichte der Maulwurf mit seinen ersten 9.000 Hammerschlägen nur eine Tiefe von 35 Zentimetern. In den Testlaboren des DLR wurde daraufhin mit verschiedenen Sandsorten, unterschiedlichen Steingrößen und einem HP$^3$-Modell simuliert und analysiert, was den „Mole" in über 228 Millionen Kilometer Entfernung auf dem Mars aus dem Rhythmus gebracht hatte. Ein kurzes „diagnostisches" Hämmern auf dem Mars gab dem HP$^3$-Team durch zur Erde gesandte Fotoaufnahmen weitere Hinweise.

### Ein Krater an der falschen Stelle

Mittlerweile gehen die Ingenieur*innen und Wissenschaftler*innen davon aus, dass beim Hämmern die Reibung auf der Außenwand des Maulwurfs nicht ausreicht, um den Rückstoß des Mechanismus abzufangen – wodurch der Maulwurf dann auf der Stelle hüpft, ohne weiter in den Boden einzudringen. Nachdem die Haltestruktur mit dem Roboterarm des InSight-Landers abgehoben wurde, bestätigte sich die Hypothese des Teams: Der Boden um den Maulwurf hatte sich durch das erste Hämmern so verdichtet, dass sich um die Rammsonde ein kleiner Krater gebildet hatte. Derzeit wird daran gearbeitet, ein Verfahren zu entwickeln, um der Rammsonde mit dem Roboterarm wieder die benötigte Reibung zu verschaffen. Dann könnte der Maulwurf sich weiterhin in den Boden des Roten Planeten vorarbeiten.

Der Marsmaulwurf des DLR leistet dabei Pionierarbeit und hat in der Geschichte der Raumfahrt keine Vorläufer. Lediglich die Apollo 15- und Apollo 17-Missionen zum Mond hatten ein ähnliches Experiment mit an Bord: Allerdings wurde der Bohrer hierbei in Handarbeit von den Astronauten bis zu drei Meter in den Boden vorgetrieben.




Die NASA-Sonde InSight auf der Marsoberfläche

## Irdische Labore für Missionen ins All

Die Größe des Raums ist überschaubar und dennoch finden hier die heiße Oberfläche von Venus und Merkur ebenso Platz wie die eisigen Welten der Eismonde des Jupiter. Das Planetary Spectroscopy Laboratory (PSL) am DLR in Berlin ist weltweit einzigartig: Hier können planetare Analogmaterialien – Materialien, die auch von den Oberflächen der verschiedenen Himmelskörper stammen könnten – im gesamten Spektralbereich von UV bis fernes Infrarot vermessen werden, unter Vakuum sowie bei Temperaturen von minus 200 Grad Celsius bis 700 Grad Celsius. So werden die Oberflächen von Planeten, Monden und kleineren Himmelskörpern simuliert, um die Eigenschaften von außerirdischem Material zu definieren.

Das Labor ist eines von insgesamt acht Laboren, in denen die DLR-Planetenforscher die Bedingungen des Weltalls auf der Erde reproduzieren oder Instrumente für Missionen vorbereiten und für die Reise ins All testen. Das Laseraltimeter BELA, das auf der Raumsonde BepiColombo zum Merkur fliegt, wurde im AIV/Laser Laboratory auf die Probe gestellt. Im Calibration and Thermal Vacuum Laboratory wurde die Exoplaneten-Mission CHEOPS getestet und kalibriert. In der Mars Simulation Facility müssen Organismen unter anderem beweisen, dass sie Strahlung und Atmosphäre überleben, wie sie auf der Oberfläche des Roten Planeten herrschen.

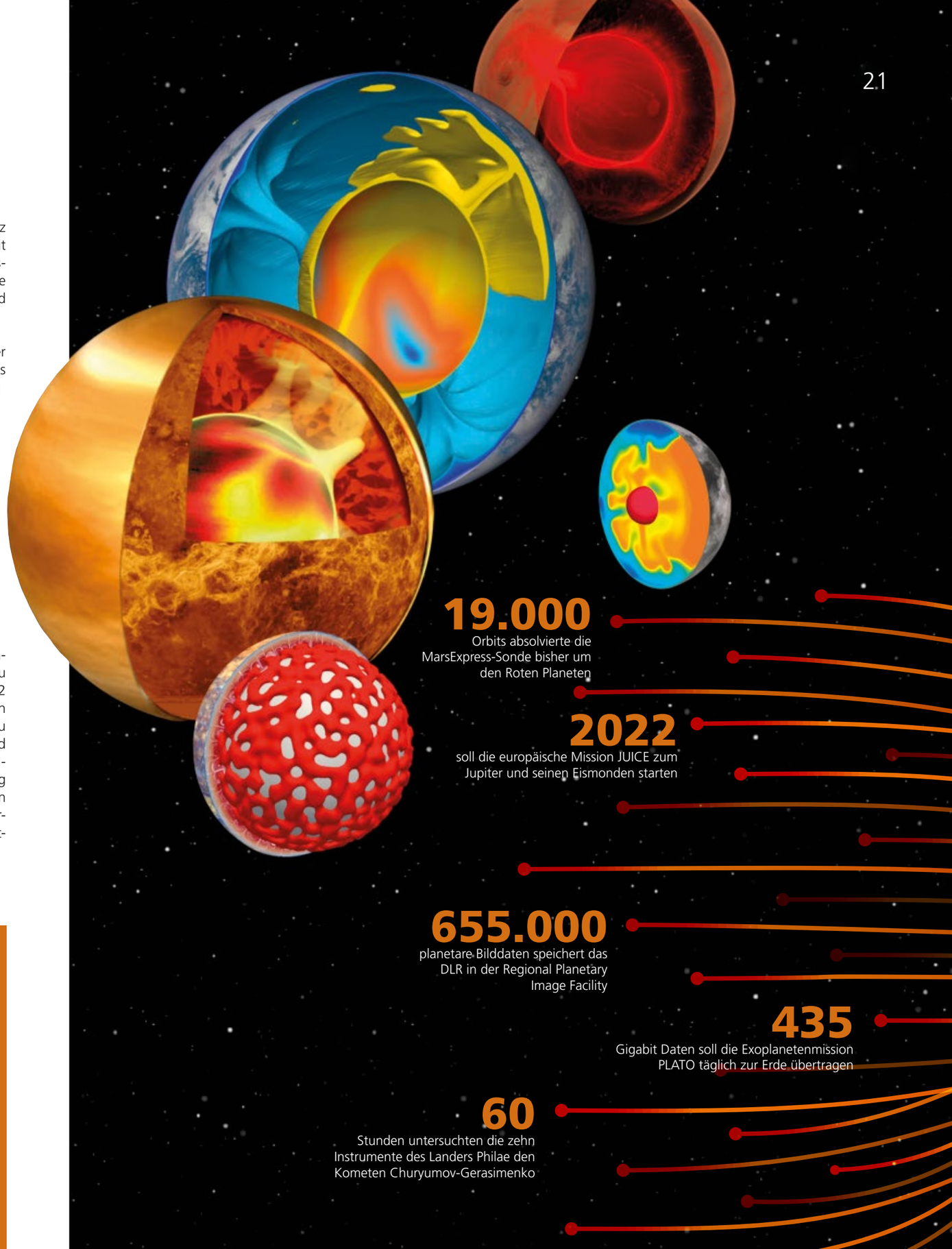
### Proben von Mond, Mars und Asteroiden

Bis 2021 wird ein weiteres Labor einsatzbereit sein: das Sample Analysis Laboratory (SAL). Derzeit werden für Untersuchungen vor allem Proben aus dem Archiv des Probe Preparation Laboratory verwendet. Dort lagern mehrere Hundert Analogmaterialien, die in der Größe aufbereitet werden, wie man sie auf den außerirdischen Himmelskörpern finden würde: Als feiner Staub auf der Merkur-Oberfläche oder als eher steinige Oberfläche des Asteroiden Ryugu. Zur Sammlung gehören auch Proben der Mondmissionen Apollo 16 und Luna 24, ebenso wie einige Meteoriten oder Materialien wie Nano-Diamanten. Doch zunehmend werden Missionen konzipiert, deren erklärtes Ziel es ist, Bodenproben aus unserem Sonnensystem zur Erde zu bringen („Sample Return"). 2023 soll zum Beispiel die amerikanische Mission OSIRIS-REX vom Material des Asteroiden Bennu Proben zur Erde bringen. Die japanische Mission Hayabusa-2 wird sich im Winter 2019 mit Bodenproben des Asteroiden Ryugu auf den Weg zur Erde machen. Weitere Missionen zu den Mars-Monden (MMX; Moon-Mars Explorer), zum Mond (Chang-E 5 und 6) oder auch zum Mars sehen vor, Material aufzunehmen und in die irdischen Labore zu bringen. Mit der Einrichtung eines Sample Analysis Laboratory am DLR können Proben aus dem All in Zukunft in einem Reinraum zerstörungsfrei analysiert und erforscht werden. Die Erkenntnisse werden einen wichtigen Beitrag dazu liefern, die Entstehung unseres Sonnensystems besser zu verstehen.

Staubpartikel vom Asteroiden Itokawa

## Durch die Atmosphäre des Titan

**Die NASA-Mission Dragonfly soll 2026 starten und einen Hubschrauber zum Saturnmond Titan bringen. Bevor dieser über die Titan-Oberfläche fliegen kann, steht seiner Landekapsel ein heißes Manöver beim Eintritt in die Atmosphäre bevor. Mit COMARS+ (Combined Aerothermal and Radiometer Sensors Instrument Package) wird das DLR über Sensoren Druck sowie Strahlungs- und Wärmelasten während des Flugs durch die Atmosphäre messen. Bereits bei der europäischen ExoMars-Mission 2016 erfasste die am DLR entwickelte und am Hitzeschutzschild installierte Nutzlast diese Daten, die für zukünftige Missionen wertvolle Erkenntnisse liefern.**



**19.000**
Orbits absolvierte die MarsExpress-Sonde bisher um den Roten Planeten

**2022**
soll die europäische Mission JUICE zum Jupiter und seinen Eismonden starten

**655.000**
planetare Bilddaten speichert das DLR in der Regional Planetary Image Facility

**435**
Gigabit Daten soll die Exoplanetenmission PLATO täglich zur Erde übertragen

**60**
Stunden untersuchten die zehn Instrumente des Landers Philae den Kometen Churyumov-Gerasimenko

# Innovationen für das digitale Leben

Das erste Handy in Deutschland erhielt im September 1983 seine offizielle Zulassung – es war 800 Gramm schwer, hatte eine Akkulaufzeit von weniger als einer Stunde und kostete 4.000 Dollar. Die erste SMS wurde 1992 von einem Computer an ein Handy verschickt. Das im Fahrzeug eingebaute GPS-gestützte Navigationssystem hatte 1990 seine Premiere. Das World Wide Web wurde 1989 an der Großforschungseinrichtung CERN entwickelt, um den Wissenschaftler*innen einen einfacheren Austausch von Forschungsergebnissen zu ermöglichen. Die Zeiten von Festnetztelefonen, Telefonzellen oder auch Straßenkarten zum Ausfalten liegen also gar nicht so lange zurück – heute hingegen ist die Digitalisierung und die damit entstandenen Anforderungen der Nutzer*innen ein zentraler Bestandteil unserer Gesellschaft. Themen wie Kommunikation, Navigation, Autonomie und Datensicherheit sind wichtige Bereiche der DLR-Raumfahrtforschung.

Die moderne Gesellschaft ist abhängig von Kommunikation und Navigation, die digitalen Anwendungen sind dabei vielfältig: Privatpersonen nutzen immer leistungsfähigere Smartphones für komplexe Anwendungen. In der industriellen Produktion wird mit der Industrie 4.0 und dem „Internet der Dinge“ eine zunehmende Vernetzung von Mensch, Geräten und elektronischen Systemen entwickelt und erprobt. Auch Fahrzeuge, die mit größtmöglicher Autonomie und Sicherheit am Verkehr teilnehmen können, erfordern die Weiterentwicklung neuer Informations- und Kommunikationstechnologien. Sollen neue intelligente Anwendungen und innovative Dienste der Zukunft Wirklichkeit werden, sind sichere und global verfügbare Kommunikationsnetze erforderlich.

### Flächendeckend und leistungsstark

Eine wichtige Aufgabe und zugleich eine große Herausforderung ist daher die flächendeckende Breitbandversorgung: Während in städtischen Gebieten diese wichtige Voraussetzung gegeben ist, ist dies in ländlichen Regionen nicht der Fall – das Verlegen von Glasfaserkabeln bis zu einzelnen entlegenen Haushalten ist zu aufwändig und zu kostenintensiv. Satelliten bieten für dieses Problem verschiedene Lösungsansätze und können so die bestehenden terrestrischen Systeme ergänzen. Mögliche Konzepte, an denen das DLR forscht, sind extrem leistungsfähige optische Kommunikationssysteme für geostationäre Satelliten sowie Stratosphärenplattformen.

Der Einsatz optischer Technologien wird dabei eine zunehmend wichtige Rolle spielen. Ihr Vorteil: Sie ermöglichen - sei es über Relaissatelliten oder per direkter Verbindung zum Boden – hohe Datendurchsätze. Von Nachteil sind die atmosphärischen Verzerrungen, die die optische Übertragung von Daten stören. Das DLR forscht daher intensiv daran, sowohl die Datenrate als auch deren Stabilität während der Übertragung zu verstehen und zu beherrschen.

### Präzisionsarbeit für Zeit und Ort

Im Bereich der Navigation ist die kontinuierliche Entwicklung neuer und die Weiterentwicklung bestehender Technologien entscheidend: Satellitennavigation wird nicht nur im Transport, sondern auch in der Logistik, der Landwirtschaft, bei Bauarbeiten sowie bei der Synchronisation von Telekommunikationsnetzwerken, Stromnetzen oder auch Finanztransaktionen eingesetzt. Nur mit immer präziseren Signalen zu Ort und Zeit können neue Anwendungen und Dienste entstehen. Die Modernisierung der Satellitennavigation sieht das DLR als eine der großen Herausforderungen der Zukunft – schließlich befinden sich einige der Galileo-Satelliten bereits mehr als die Hälfte ihrer Lebenszeit von rund zwölf Jahren im All. Mit der Bündelung verschiedener Kompetenzen unterschiedlicher DLR-Institute sowie weiterer Forschungseinrichtungen und Industriepartner in dem neu gegründeten Galileo-Kompetenzzentrum werden im DLR die Weichenstellungen für zukünftige Dienste, Anwendungen und Technologien vorgenommen. Dazu gehören auch neuartige Konzepte für zukünftige Navigationssysteme wie zum Beispiel Kepler.

Mit der zunehmenden Präsenz autonomer Systeme im alltäglichen Leben nimmt zugleich aber auch eine Gefahr kontinuierlich zu: Solche Systeme sind sehr anfällig für Manipulationen und Störungen, die daraus resultierenden Konsequenzen sind enorm. Die Herausforderung wird es sein, Technologien und Verfahren zu entwickeln, die Daten und Signale effektiv vor gezielten Störungen und Verfälschungen schützen.

© iStock/Maxiphoto

# Satellitenflotte für Navigation und Kommunikation

Am 21. Oktober 2011 um 12:30 Uhr mitteleuropäischer Zeit begann mit dem Start einer Sojus-Rakete vom Weltraumbahnhof Kourou eine neue Ära: Sie transportierte die ersten beiden Galileo-Satelliten ins All; der Aufbau eines unabhängigen Satellitennavigationssystems für Europa nahm seinen Anfang. Mittlerweile befinden sich insgesamt 26 Satelliten im All. Damit reicht derzeit zwar die globale Abdeckung noch nicht aus, um überall ausschließlich mit Galileo zu navigieren. Dies geschieht noch in Kombination mit einem der anderen Navigationssysteme – dem US-System GPS oder dem russischen Glonass. Doch bereits heute nutzen zahlreiche Handynutzer*innen oftmals die Signale der Galileo-Konstellation – ohne es zu wissen. Voraussichtlich von Ende 2020 bis Ende 2022 werden weitere zwölf Satelliten gestartet und das System somit vervollständigt.

Die ersten Galileo-Dienste hatte die Europäische Kommission bereits am 15. Dezember 2016 freigegeben: Dazu gehören der offene Dienst, das heißt ein kostenfreier offener Massenmarkt-Dienst für Ortung, Navigation und Zeitgebung sowie der Such- und Rettungsdienst (Search and Rescue). Ebenfalls angeboten wird der verschlüsselte Dienst PRS (Public Regulated Service) für Nutzer mit hoheitlichen Aufgaben wie etwa die Polizei, die Feuerwehr oder der Katastrophenschutz. Der Hochpräzisionsdienst (High Accuracy Service, HAS) ist ein hochgenauer Zeitdienst, der im Nanosekunden-Bereich arbeitet und mit einer Genauigkeit von bis zu 20 Zentimetern ortet. Er ist für geschäftliche Anwendungen gedacht, wie etwa die vernetzte Landwirtschaft, die Logistikbranche oder autonomes Fahren. Momentan befinden sich die Dienste noch in der Initialphase, das heißt, sie arbeiten hochgenau, sind aber noch nicht durchgängig erreichbar.

### Gebündelte Kompetenz

Um Kompetenzen aus der Anwendung, der Forschung und dem Betrieb unter einem Dach zu vereinen, gründete das DLR das Galileo-Kompetenzzentrum in Oberpfaffenhofen. Ziel des entstehenden Kompetenzzentrums ist es, neue Konzepte und Technologien – insbesondere solche auf Basis von Quantentechnologien – für die nächste Generation solcher Systeme zu entwickeln, um die überlegene Leistungsfähigkeit des Galileo-Systems und damit die technologische und geopolitische Souveränität Europas langfristig zu sichern. Die neuen Technologien sollen zudem demonstriert, getestet, validiert und zügig in die Anwendung gebracht werden. Die Entwicklung, Implementierung und der Betrieb prototypischer präoperationeller neuer Dienste soll dabei dazu beitragen, den Weg von Galileo in neue Anwendungen zu ebnen. Dies reicht von global kurzfristig verfügbaren hochpräzisen Ortsbestimmungen bis hin zu Anwendungen in der Steuerung autonomer oder automatischer Systeme, die hohe Anforderungen an Robustheit, Zuverlässigkeit und Genauigkeit stellen.

Durch neue quantentechnologische Ansätze sollen zukünftige Generationen von Navigationssystemen die Zentimetergenauigkeit erreichen. Die Signale sollen noch verlässlicher sein, um sie für sicherheitskritische Systeme einsetzen zu können. Außerdem soll die Infrastruktur robuster werden gegen Angriffe mit Störsignalen („jamming") und die Einspeisung von gefälschten Signalen („spoofing"). Letztlich soll auch der Betrieb der Infrastruktur günstiger werden und eine noch größerere Unabhängigkeit von Drittstaaten mit sich bringen. Daher wird bereits heute die Entwicklung der nächsten Generation von Navigationssatelliten von der DLR- Raumfahrtforschung vorangetrieben.

© ESA



**Auch wenn das europäische Satellitennavigationssystem Galileo noch nicht den Routinebetrieb aufgenommen hat – die Weichen für eine Weiterentwicklung und Nachfolge müssen bereits jetzt gestellt werden. Ein am DLR konzipierter Vorschlag für ein Satellitennavigationssystem der dritten Generation ist Kepler: Das System sieht 24 Satelliten im „Medium Earth Orbit" in einer Höhe von rund 20.000 Kilometern sowie vier weitere Satelliten im „Low Earth Orbit" in einer Höhe von etwa 1.200 Kilometern vor. Unter anderem mit Technologien wie jodhaltigen optischen Uhren sowie optischen Terminals zur Inter-Satelliten-Verbindung sollen eine erhöhte Genauigkeit und Integrität erreicht werden. Durch Empfänger auf den LEO-Satelliten, die außerhalb der Erdatmosphäre fliegen, können die Navigationssignale zudem ohne atmosphärische Einflüsse gemessen werden. Im Gegensatz zu heutigen Satellitennavigationssystemen erfordert Kepler auch keine umfangreiche Bodeninfrastruktur – so werden keine irdischen Referenzstationen benötigt, um die Bahnen vermessen und die Uhren synchronisieren zu können.**

# Schutz der digitalen Gesellschaft

Informationstechnologien, Kommunikations- und Navigationssysteme, Energieversorgung – kaum ein Bereich im heutigen Alltag funktioniert noch ohne die Digitalisierung. Sie bietet der Gesellschaft viele neue Möglichkeiten und erfüllt Anforderungen beispielsweise nach jederzeit verfügbaren Kommunikationskanälen oder auch nach optimierten Prozessen in der industriellen Produktion. Die zunehmende Vernetzung und Automatisierung in fast allen Lebensbereichen, die Möglichkeit der hochratigen Datenübertragung und auch die Nutzung von Satellitensignalen und -daten für die unterschiedlichsten Anwendungen sorgen für technischen Fortschritt und wirtschaftliche Entwicklung. Doch der Grad der Vernetzung technischer Systeme und die Abhängigkeit von digitalen Infrastrukturen machen die Gesellschaft auch empfindlich und angreifbar, denn gestörte oder verfälschte Daten und Signale haben unmittelbare Auswirkungen in zentralen Bereichen – von der Stromversorgung über die Sicherheit im Flug-, Schiffs- und Autoverkehr bis hin zu Finanztransaktionen – zur Folge.

### Anti-Jamming und Anti-Spoofing

Der Absicherung von Daten und Signalen gegen bewusste Störung und Verfälschung kommt daher eine erhebliche Bedeutung zu: Die zu schützenden Systeme könnten in ihrer Positions- oder Zeitbestimmung und bei der Erkennung ihres Umfeldes getäuscht werden. Dieses Einspielen gefälschter Navigations- und Radarsignale (spoofing) birgt große Gefahren und kann zum Beispiel dafür genutzt werden, durch eine manipulierte Positionsbestimmung Kollisionen zu verursachen oder durch die Verfälschung der Zeitsignale bei Finanztransaktionen zu betrügen. Mit der Störung von Navigationssignalen (jamming) entstehen Risiken beispielsweise in der Mobilität oder der Energieversorgung. Um dies zu verhindern, hat sich das DLR als Ziel gesetzt, geeignete Maßnahmen für das Anti-Spoofing und Anti-Jamming zu entwickeln und zu optimieren. Zudem analysieren die DLR-Wissenschaftler*innen Kommunikations- und Navigationsinfrastrukturen und vernetzte Systeme in Bezug auf Angriffsmöglichkeiten und entwerfen zukünftige Architekturen und Schutzkonzepte, die diese verhindern (security by design).

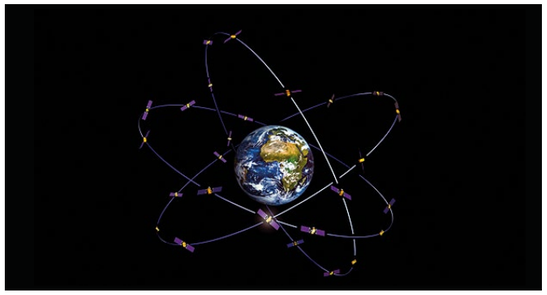
### Potenzial der Quanten

Zukünftige Technologieentwicklungen wie leistungsfähige Quantencomputer müssen ebenfalls beim Schutz sensibler Systeme berücksichtigt werden: Da die heutigen üblichen Kryptoverfahren potenziell mit Quantencomputern gebrochen werden könnten, forscht das DLR an Verfahren , die auch zukünftig sicher sind. Darüber hinaus arbeitet das DLR beispielsweise an einem Verfahren zur Verteilung von Quantenschlüsseln. Dieser quantenbasierte Ansatz ist eine Möglichkeit, Daten und Zugriff auf Systeme auch bei fortschreitenden Technologieentwicklungen weiterhin durch die Erzeugung und Verteilung sicherer Quantenschlüssel zu sichern.

## Weltweit verbunden

Auf den ersten Blick sieht der Breitband-Atlas des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) ganz gut aus: Fast alles im grünen Bereich auf der Deutschlandkarte[1] – und somit scheint nirgendwo eine Breitbandverfügbarkeit von unter 50 Prozent der Haushalte vorzuliegen. Nur: Sobald man auf der interaktiven Karte hineinzoomt, zeigt sich ein anderes Bild. Während Großstädte wie Berlin, Hamburg, die Region um Köln, Bonn und Düsseldorf, München oder auch Frankfurt für über 95 Prozent der Haushalte eine Breitbandversorgung anbieten, sieht es in den ländlicheren Regionen anders aus. Statt Grün- und Gelbtöne, die eine gute Verfügbarkeit markieren, finden sich hier Grau- und Blautöne. Die Werte für die Breitbandversorgung fallen also oftmals unter zehn Prozent. Wer beispielsweise in der Gemeinde Wustrow in Mecklenburg-Vorpommern lebt, dürfte neidisch auf Berlin blicken, wenn es um Datenübertragungsraten geht.

Die globale Versorgung mit Breitband-Internet ist immer noch eine große Herausforderung, obwohl in der heutigen Welt die Kommunikationsbedürfnisse auf eine Versorgung auch außerhalb der Ballungszentren ausgerichtet sind. Die Nutzer*innen haben hohe Ansprüche, wenn es beispielsweise um Datenraten oder Verfügbarkeit geht. Der weitere Ausbau terrestrischer Netze ist jedoch zunehmend unwirtschaftlich. Außerhalb der Ballungszentren bietet sich daher eine breitbandige Versorgung über geostationäre Satelliten an. Eine wichtige Rolle spielen dabei optische Freiraumverbindungen, um hohe Datenmengen übertragen zu können.



© ESA

### Übertragung mit Laser-Technologie

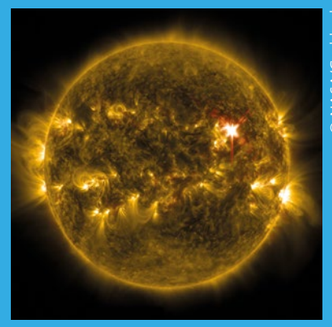
Im Projekt THRUST (Terabit-throughput optical satellite system technology) zum Beispiel entwickeln die Wissenschaftler*innen des DLR daher eine neuartige Übertragungstechnologie für Kommunikationssatelliten der nächsten Generation. Die Idee von THRUST: Die Satelliten sollen über eine Laserverbindung an das terrestrische Internet angebunden werden. Dabei werden Datendurchsätze jenseits von einem Terabit pro Sekunde angestrebt. Die Kommunikation mit den Nutzer*innen erfolgt dann im Ka-Band, einer üblichen Funkfrequenz der Satellitenkommunikation.

Aber nicht nur die Machbarkeit einer optischen drahtlosen Datenübertragung im Terabit-Bereich muss erforscht und entwickelt werden. Auch die Stabilität der optischen Verbindung ist unerlässlich, um beispielsweise Anwendungen aus der Industrie 4.0, der intelligenten Mobilität oder der zivilen Sicherheit zuverlässig und ausfallsicher zu betreiben. Bereits kurze Unterbrechungen von wenigen Millisekunden würden schließlich dazu führen, dass bei der Übertragung mehrere Gigabit an Daten verloren gehen würden. Zu den Forschungsarbeiten der DLR-Wissenschaftler*innen gehört daher, die Wirkung der Atmosphäre besser zu verstehen und eine stabile Laserkommunikation zum Satelliten zu ermöglichen.

[1] https://www.bmvi.de/DE/Themen/Digitales/Breitbandausbau/Breitbandatlas-Karte/start.html

## Schutz gegen Sonnenstürme

**Sonnenstürme oder Strahlungseruptionen können Störungen hervorrufen, die die zuverlässige Nutzung von Kommunikations-, Navigations- und Erdbeobachtungssystemen beschädigen und beispielsweise zu Ausfällen im Funkverkehr der zivilen Luftfahrt führen können. Auch Stromausfälle sind bei sehr starken geomagnetischen Stürmen möglich. Das 2019 gegründete DLR-Institut für Solar-Terrestrische Physik erfasst und verarbeitet Daten zum Zustand der Ionosphäre und legt damit die wissenschaftliche Grundlage für die Vorhersage und das Monitoring des Weltraumwetters. Dazu werden Beobachtungsdaten verschiedener Sensornetzwerke und Satellitenmissionen herangezogen, verarbeitet und entsprechende Produkte zur Charakterisierung und Vorhersage des Weltraumwetters errechnet. Ziel ist es, auf dieser Basis einen besseren Schutz der technischen Infrastrukturen vor den Auswirkungen von Weltraumwetter zu ermöglichen.**



© NASA/Goddard

**156**
Smartphones und Tablets können mit Galileo-Satelliten ihre Position bestimmen

**12**
Jahre beträgt die durchschnittliche Lebensdauer eines Galileo-Satelliten

**-589**
nT betrug 1989 der geomagnetische Sturm, der in Montreal einen neunstündigen Stromausfall verursachte

**13,16**
Terabits pro Sekunde in der optischen Freistrahl-Datenübertragung erreichten DLR-Wissenschaftler*innen 2018

# Der Weg ins All

Die kommenden Jahre entscheiden über die Zukunft des Raumtransports: Mit aktuellen neuen Trägerentwicklungen, auch durch private Anbieter, verstärkt sich die Konkurrenz und der Preisdruck auf dem kommerziellen Markt erhöht sich. Wiederverwendbare Trägersysteme, neue Antriebssysteme mit Flüssigsauerstoff (LOX) und Flüssigmethan ($LCH_4$) und weltweite Pläne zum Aufbau großer Satellitenkonstellationen werden den bisherigen Zugang ins All verändern. Will Europa sich einen unabhängigen und kostengünstigen Zugang zum All sichern, müssen neue Technologien entwickelt und getestet werden.

Ariane 6 in ihren beiden Versionen Ariane 62 und Ariane 64 ist der erste Schritt hin zu einem flexibel einsetzbaren Träger. Aber schon jetzt zeichnet sich ab, dass das auf lange Sicht nicht genügen wird, da die Konkurrenz in der Zwischenzeit den Druck auf die Preise durch die Einführung der Wiederverwendbarkeit in den USA vermutlich weiter erhöhen wird.

Darüber hinaus ist das Potenzial der Ariane 6, Leistungszuwächse zu erzielen, bereits bei Inbetriebnahme weitestgehend ausgeschöpft, da der Träger überwiegend aus gut bekannten, ausgereiften Komponenten besteht und vorhandene Leistungsmargen so bereits im Ansatz ausgereizt sind.

Die DLR-Raumfahrtforschung setzt daher einen ihrer Schwerpunkte auf die Wiederverwendbarkeit, um so auch eine deutliche Kostensenkung zu ermöglichen. Insbesondere die Wiederverwendung der Erststufe, die den wesentlichen Anteil an den Kosten ausmacht, verspricht hier ein nicht unerhebliches Einsparpotenzial in Höhe zweistelliger Prozentzahlen. Mit den Projekten CALLISTO (Cooperative Action Leading to Launcher Innovation in Stage Toss back Operations) und ReFex (Reusability Flight Experiment) untersucht das DLR nicht nur verschiedene Konzepte der Wiederverwendbarkeit, sondern wird sie auch im kleinskaligen Maßstab mit Demonstrationsflügen erproben.

**Neue Treibstoffe, neue Produktionstechnologien**

Mit der Erforschung von Methan als Brennstoff trägt das DLR zudem zu aktuellen Neuentwicklungen wie dem europäischen Technologiedemonstrator „Prometheus“ – einem schubstarken und wiederverwendbaren Raketentriebwerk, das mit Flüssigsauerstoff (LOX) und Flüssigmethan ($LCH_4$) angetrieben werden soll – bei. Wenngleich Methan nicht die gleiche Leistungsfähigkeit wie flüssiger Wasserstoff aufweist, gibt es gute Argumente für die Verwendung von Methan als Raketentreibstoff. Dieser weist beispielsweise im flüssigen Zustand eine wesentlich höhere Dichte auf, was kompaktere Stufen ermöglicht.

Auch an weiteren umweltfreundlicheren Treibstoffen, den „green propellants“, forscht das DLR. Seit den 1960er-Jahren kommt in Raumfahrtantrieben Hydrazin ($N_2H_4$) zum Einsatz: Es lässt sich lange lagern, ist leistungsfähig und wird mittels eines Katalysators in einfachen Antriebssystemen zersetzt. Hydrazin ist kaltstartfähig; das bedeutet, sobald das Hydrazin auf den Katalysator trifft, wird chemische Energie zur Zündung des Triebwerks freigesetzt. Der Nachteil von Hydrazin: Es ist sehr giftig für Mensch und Umwelt. Daher erfordert der Umgang mit diesem Stoff einen hohen Sicherheitsaufwand, der wiederum sehr aufwändig und teuer ist. Die Forschung sucht deshalb nach Alternativen, die weniger gefährlich, aber genauso leistungsfähig sind. Die DLR-Wissenschaftler*innen entwickeln, verbessern und qualifizieren daher beispielsweise Ammoniumdinitramid (ADN)-haltige Treibstoffe oder auch gelförmige Treibstoffe.

Mit der Entwicklung von Technologien wie beispielsweise batteriegetriebenen Pumpen, neuen Faserverbundwerkstoffen oder auch durch Additive Layer Manufacturing (ALM) gefertigten Motorkomponenten liefert das DLR ebenfalls Beiträge zum Wandel im Raumtransport. Der 3D-Druck zum Beispiel bietet verschiedene Vorteile für den Triebwerksbau. So lassen sich die Produktionszeiten signifikant verringern: Vollständige Triebwerke könnten bereits innerhalb weniger Wochen geliefert werden.

© CNES

## Horizontal oder vertikal – auf jeden Fall zurück zur Erde

Die Kostensenkung im Raumtransport ist ein entscheidender Faktor, mit dem Europa auf dem Markt konkurrenzfähig sein kann. In Zukunft wird es zudem immer wichtiger werden, für Satelliten einen unabhängigen Zugang zum Weltraum zu gewährleisten. Erreichbar ist dies jedoch nur durch eine grundlegende Änderung der Trägerarchitektur, bei der die Wiederverwendbarkeit die größte Rolle spielt. Insbesondere die Wiederverwendung der Erststufe, die den wesentlichen Anteil an den Kosten ausmacht, verspricht hier ein nicht unerhebliches Einsparpotenzial in Höhe zweistelliger Prozentzahlen. Das DLR untersucht und erprobt dafür zwei Konzepte: „CALLISTO“ (Cooperative Action Leading to Launcher Innovation in Stage Toss back Operations) und ReFex (Reusability Flight Experiment).

© CNES

Demonstrator CALLISTO

Mit „CALLISTO“ entwerfen die DLR-Ingenieur*innen in Zusammenarbeit mit der französischen Raumfahrtagentur CNES und der japanischen Raumfahrtagentur JAXA einen Demonstrator, der senkrecht starten und anschließend auch wieder senkrecht landen kann (VTVL; Vertical Take-Off Vertical Landing). Mit aerodynamischen Steuerflächen wird CALLISTO in einer antriebslosen Phase von Überschall- bis zu Unterschall-Flugbedingungen gesteuert. Danach wird der Antrieb wieder gezündet, um das CALLISTO-Raumfahrzeug zu bremsen. Das Landesystem absorbiert auf diese Weise die verbleibende kinetische Energie, um eine sichere, stabile Landung zu ermöglichen.

### Flug für Flug zum optimalen Design

Mit dem Projekt CALLISTO sollen die Kenntnisse über VTVL-Raketenstufen verbessert sowie Fähigkeiten und Technologien demonstriert werden, die notwendig sind, um eine wiederverwendbare vertikal startende und landende Raketenstufe zu entwickeln und zu vermarkten. Voraussichtlich 2022 wird die 3,5-Tonnen-Rakete vom Weltraumbahnhof in Französisch-Guayana starten und wieder senkrecht landen. Weitere Erprobungsflüge sollen folgen. Die Ergebnisse der verschiedenen Flugtests werden dafür genutzt, das Design eines zukünftigen wiederverwendbaren Raumtransportsystems zu optimieren.

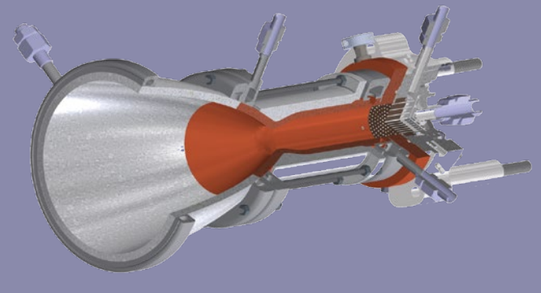
Gleichzeitig verfolgt das DLR das Projekt ReFex, mit dem ein anderer Ansatz für wiederverwendbare Trägerraketen und Wiedereintrittstechnologie erforscht wird: Anstelle einer vertikalen Landung wird die horizontale Landung einer Erststufenrakete mit autonomer Navigation und Flugführung des Fahrzeugs in jeder Phase seiner Mission erprobt. Die Stabilisierung des Flugkörpers erfolgt durch ein aktives aerodynamisches Regelungssystem, das die Eingaben aus dem Navigationssystem und der Flugführung in Steuerkommandos für die einzelnen Aktuatoren umsetzt. Der Demonstrationsflug ist für 2022 vom australischen Woomera aus geplant.

Beide Demonstratoren sind im Vergleich zu den eigentlichen operationellen Systemen zwar klein, bieten jedoch die Möglichkeit, wesentliche Daten und Erkenntnisse über notwendige Technologien zu gewinnen sowie eine Entscheidung zu treffen, welches System für Europa das beste ist. Die Entwicklung einer neuen Rakete dauert in der Regel 10 bis 15 Jahre – um für den wettbewerbsorientierten Raketenmarkt gerüstet zu sein, muss die Entwicklung der notwendigen Technologien gewährleistet sein.

Demonstrator ReFex

## Triebwerkentwicklung mit KI

**Mit jedem Versuch an einem der Prüfstände gewinnen die Ingenieur*innen am DLR in Lampoldshausen neue Daten, die wiederum in die Entwicklung und Erprobung neuer Triebwerke einfließen. Hinzu kommen Simulationsdaten, mit denen neue Technologien ebenfalls angepasst und optimiert werden. Die beiden großen Datenschätze effektiv zu kombinieren und Erkenntnisse zu gewinnen, gelingt zunehmend mit Hilfe künstlicher neuronaler Netze und Maschinellen Lernens. Künstliche Intelligenz kam beispielsweise für das DLR-Projekt „LUMEN“ zum Einsatz: Für einen Demonstrator eines Flüssigraketentriebwerks wurden so Dynamiken des Wärmeübergangs innerhalb der Kühlkanäle der Brennkammer berechnet. Die erzeugten Modelle liefern Vorhersagen, die um den Faktor 1.000 schneller sind als vergleichbare Rechnungen, die zum Beispiel mit numerischer Strömungsmechanik angefertigt wurden.**



## Die Suche nach dem alternativen Treibstoff

Die Anforderungen an die Treibstoffe der Zukunft sind hoch – und sind längst nicht mehr ausschließlich auf eine hohe Leistung ausgerichtet: Stattdessen wird zunehmend Wert darauf gelegt, dass sie in der Handhabung und der Lagerung einfacher als bisherige Treibstoffe sind. Sie sollen zudem umweltfreundlicher und weniger gesundheitsschädlich sein. Auch eine Kostenreduktion soll mit den zukünftigen Treibstoffen möglich sein. Zurzeit wird die Flüssigsauerstoff (LOX)/Methan-Technologie als vielversprechendste Treibstoffkombination erachtet, weil sie großes Potenzial in der Entwicklung kostengünstiger und wiederverwendbarer schubstarker Raketentriebwerke verspricht. Aktuelle Neuentwicklungen in Europa wie Prometheus, MIRA oder das Romeo-Triebwerk basieren ausschließlich auf Methan als Brennstoff.

Im Unterschied zu kryogenem Wasserstoff kann Methan als „im Weltall lagerfähig“ bezeichnet werden – seine Siedetemperatur liegt bei circa 90 bis 130 Kelvin und erfordert daher nur eine passive thermische Isolierung des Tanks. Die Methanverdampfungsraten sind zudem im Vergleich zu Wasserstoff deutlich niedriger. Im Gegensatz zu flüssigem Wasserstoff ermöglicht Methan auch eine signifikante Reduktion der Herstellungskosten: Das kleinere Tanksystem, die einfachere Ausstattung mit lediglich einer Turbopumpe oder auch die kostengünstigere Bodeninfrastruktur tragen dazu bei. Auch in der Wiederverwendbarkeit von Triebwerken hat die Verwendung von Methan einen deutlichen Vorteil gegenüber dem Flüssigwasserstoff: Während der Wasserstoff das Material angreift und so der Wiederverwendbarkeit von Triebwerken ein Limit setzt, ist dies bei Methan nicht der Fall.

### Umrüstung für LOX/Methan-Forschung

Ziel des DLR ist es, die Kompetenz im Bereich Methan zu verstärken. Dies umfasst sowohl experimentelle Untersuchungen als auch die Entwicklung physikalischer Modelle sowie die numerische Modellierung der Verbrennungsprozesse und der Treibstoffaufbereitung unter realen Bedingungen. Im Rahmen des DLR-internen Projekts „LUMEN“ (Liquid Upper Stage Demonstrator Engine) wird dabei ein pumpengefördertes LOX/Methan-Triebwerk entwickelt und später am europäischen Forschungs- und Technologieprüfstand P8 auf dem DLR-Gelände getestet. Für Tests mit einem weiteren Technologiedemonstrator, der über 100 Tonnen Schub verfügen wird, wird zudem der bestehende Prüfstand P5 auf die Anforderungen der LOX/Methan-Forschung umgerüstet, um so ab 2020 eine entsprechende Infrastruktur für Versuche am DLR-Standort Lampoldshausen zu nutzen.

© ArianeGroup

Test einer Brennkammer am Komponentenprüfstand P3

## Der Himmel auf Erden

**Wenn in Prüfstand P4.1 am DLR Lampoldshausen Triebwerk und Düse im Test laufen, geschieht dies unter Bedingungen, wie sie beim Aufstieg einer Rakete tatsächlich auftreten. Im Inneren des Höhensimulationsprüfstands herrscht für die Testkandidaten dann ein Vakuum, als ob sie in 70 Kilometer Höhe im Einsatz wären – damit ist der Prüfstand ein Unikat in Europa. Die Anlagen des DLR decken das gesamte Portfolio der Testanforderungen ab: vom Komponententest über die Triebwerktests bis hin zur Erprobung ganzer Raketenstufen. Es werden sowohl Versuche für Forschung und Entwicklung durchgeführt als auch Qualifikations- und Charakterisierungstests. Mit dem Prüfstand P5.2 ist 2019 eine weitere Anlage hinzugekommen, die in Europa einzigartig ist: Erstmals können nicht nur Triebwerke und ihre Komponenten, sondern die gesamte kryogene Oberstufe der europäischen Trägerrakete Ariane 6 unter Bodenbedingungen getestet und für den Weg ins All qualifiziert werden.**

## Regelmäßig schwerelos forschen – auf Satelliten und Raketen

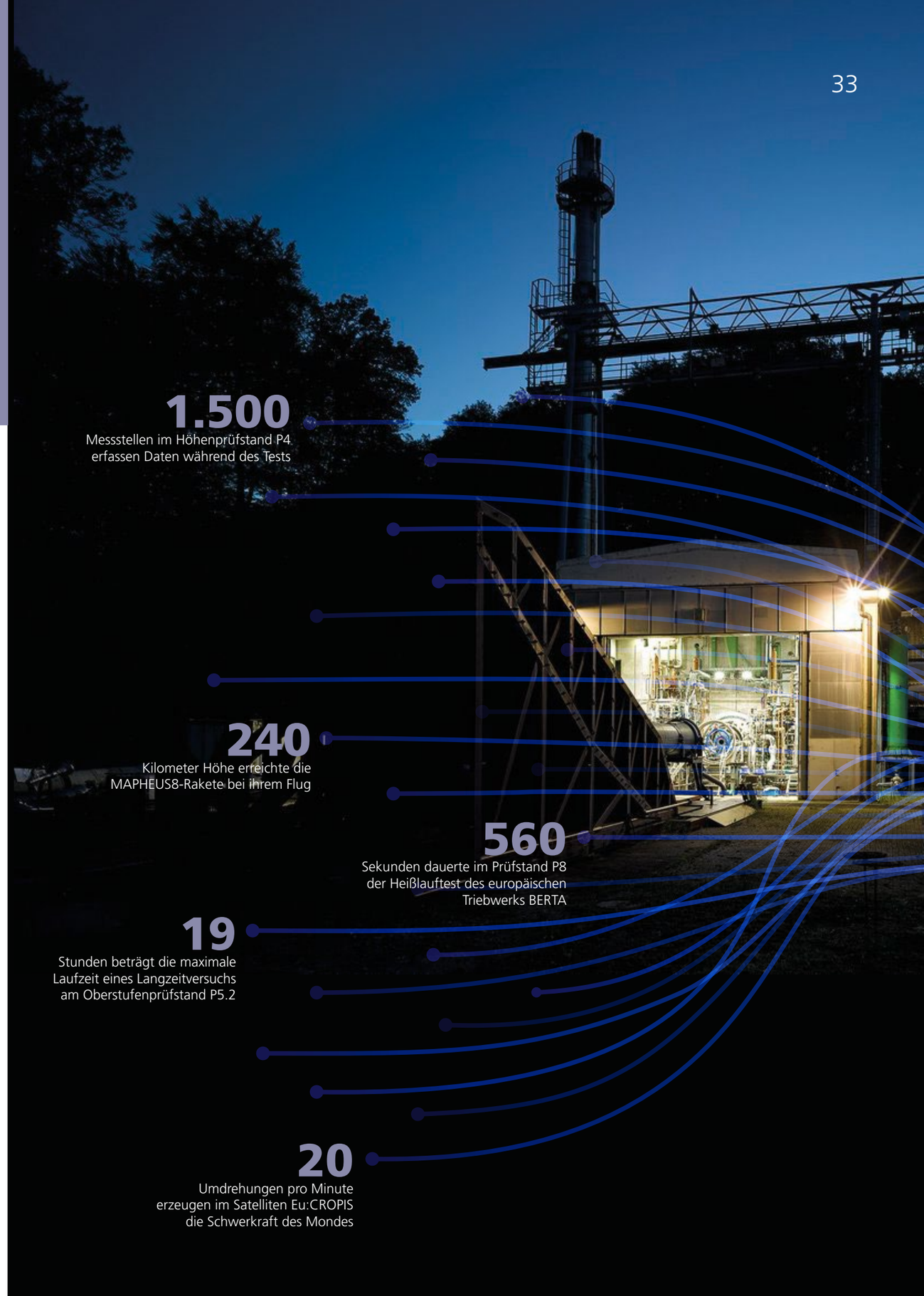
Atmosphäre, Temperatur, Vakuum: In den irdischen Laboren und Testanlagen des DLR können viele der Bedingungen simuliert werden, die im Weltraum herrschen. Nur für eine länger andauernde Schwerelosigkeit – da reichen die Labore auch bei bester Ausstattung nicht aus. Auch Experimente in Falltürmen erreichen nur für wenige Sekunden den Zustand der Schwerelosigkeit. Immerhin 22 Sekunden pro Parabel sind es im Parabelflieger des DLR, in dem regelmäßig Experimente nahezu unter Schwerelosigkeit durchgeführt werden. Für wissenschaftliche Fragestellungen, die einen längeren Zeitraum ohne die Schwerkraft erfordern, gibt es nur den Weg ins All: In den DLR-Höhenforschungsraketen werden die Experimente bis zu sieben Minuten der Schwerelosigkeit ausgesetzt, auf Satelliten ist die Dauer der Schwerelosigkeit unbegrenzt. Kleine Schmelzöfen, Biomembranen, ein elektrostatischer Levitator oder Biofilter können so ohne die störenden Einflüsse der irdischen Gravitation betrieben und erprobt werden. Bei beiden Transportmitteln ins All – sowohl der Rakete als auch dem Satelliten – sind Kosten und Aufwand geringer als bei einer Experimentreihe auf der Internationalen Raumstation ISS. Kleinere Experimente haben somit größere Chancen, in der Schwerelosigkeit betrieben zu werden. Experimente, die zukünftig auf der ISS betrieben werden sollen, können zudem vorbereitet und getestet werden.

### Raketentechnologie für Experimentflüge

Mit seinem MAPHEUS-Programm (Materialphysikalische Experimente unter Schwerelosigkeit) transportiert das DLR seit mittlerweile elf Jahren von einer Raketenstartbasis in Nord-Schweden aus gleich mehrere Experimente in die Schwerelosigkeit. Der Flug wird durch die Mobile Raketenbasis (MORABA) des DLR durchgeführt und ermöglicht den Wissenschaftler*innen einen unabhängigen und regelmäßigen Zugang zu Experimenten unter diesen Bedingungen. Der achte MAPHEUS-Start im Juni 2019 erfüllte zudem noch einen weiteren Zweck. Neben verschiedenen biologischen und materialwissenschaftlichen Experimenten war die zwölf Meter hohe und mehr als zweieinhalb Tonnen schwere Rakete selbst ebenfalls ein Forschungsobjekt: Die Mission ATEK (Antriebstechnologien und Komponenten für Trägersysteme) beförderte nämlich nicht nur die Experimente in eine Höhe von rund 240 Kilometern, sondern auch Health-Monitoring-Systeme für kritische Trägerkomponenten sowie eine mit einem neuen Verfahren hergestellte Hybridgehäusestruktur.

### Satelliten – kompakt und kostengünstig

Ein anderes Vehikel für den Transport und den Aufenthalt im All startete am 3. Dezember 2018 ins All: der Satellit Eu:CROPIS (Euglena Combined Regenerative Organic Food Production in Space). Bei Eu:CROPIS handelt es sich um den ersten am DLR entwickelten und gebauten Kompaktsatelliten einer Klasse zwischen kleinen Cubesats und den üblichen Großsatelliten. Ziel ist es, zum einen neue Satellitenbustechnologien zu erproben und zu qualifizieren, zum anderen eine Plattform für neue Instrumente und Experimente bereitzustellen. Mit dem rotierenden Satelliten, der in seinem Inneren unter anderem zwei Gewächshäuser mit Rieselfilter und Tomatensamen trägt, wurde erstmals die Machbarkeit von effektiven und günstigen Satelliten unter Beweis gestellt. Er ist somit der erste Satellit in einer geplanten Reihe von Kleinsatelliten. Mit dieser Strategie beweist das DLR seine Gesamtsystemkompetenz und setzt regelmäßig Satellitenmissionen zu Forschungszwecken um. Der nächste Satellit, COFROS, wird eine neuartige optische Uhr als Vorbereitung für zukünftige Navigationssatelliten testen.



# Die Roboter der Zukunft

Die Stellenbeschreibung für die Roboter der Zukunft hat es in sich: Möglichst selbstständiges Arbeiten wird verlangt – aber zugleich auch die Fähigkeit, reibungslos und effizient mit Kolleg*innen im Team zusammenzuarbeiten, die andere Fähigkeiten und Denkweisen mitbringen. Absolut geschickt und sensibel muss er sein, der Roboter, der zukünftig mit Gefühl und Verstand greifen, Werkzeuge verwenden und eine ihm unbekannte Umgebung erfassen und einschätzen soll. Natürlich soll er dabei möglichst über eine Beweglichkeit und Fingerfertigkeit verfügen, die die Natur eigentlich nur dem Menschen verliehen hat.

Er soll nicht nur Astronaut*innen bei ihren Missionen unterstützen, sondern auch älteren oder in ihrer Beweglichkeit eingeschränkten Personen auf der Erde helfen. In der Industrie soll er seine Kräfte einsetzen, darf aber niemals zu einer Gefahr für seine menschlichen Kolleg*innen werden. Sein „Verstand" muss dafür ausreichen, Aufträge autonom auszuführen – gleichzeitig muss er aber jederzeit seine Autonomie aufgeben und unverzüglich Kommandos seines Auftraggebers ausführen können. Alle diese Fähigkeiten muss der Roboter der Zukunft in den unterschiedlichsten Aufgaben und den herausforderndsten Umgebungen abrufen können. Sei es auf dem Mars, in der Schwerelosigkeit des Alls, im irdischen Labor, bei Katastropheneinsätzen oder in Pflegeheimen. Das DLR arbeitet mit seiner Raumfahrtforschung daran, dass die zukünftigen Roboter diese Fähigkeiten erhalten und diese Aufgaben ausführen können. Schließlich ist jeder Roboter nur so klug und nützlich, wie es ihm seine Ingenieur*innen mitgeben.

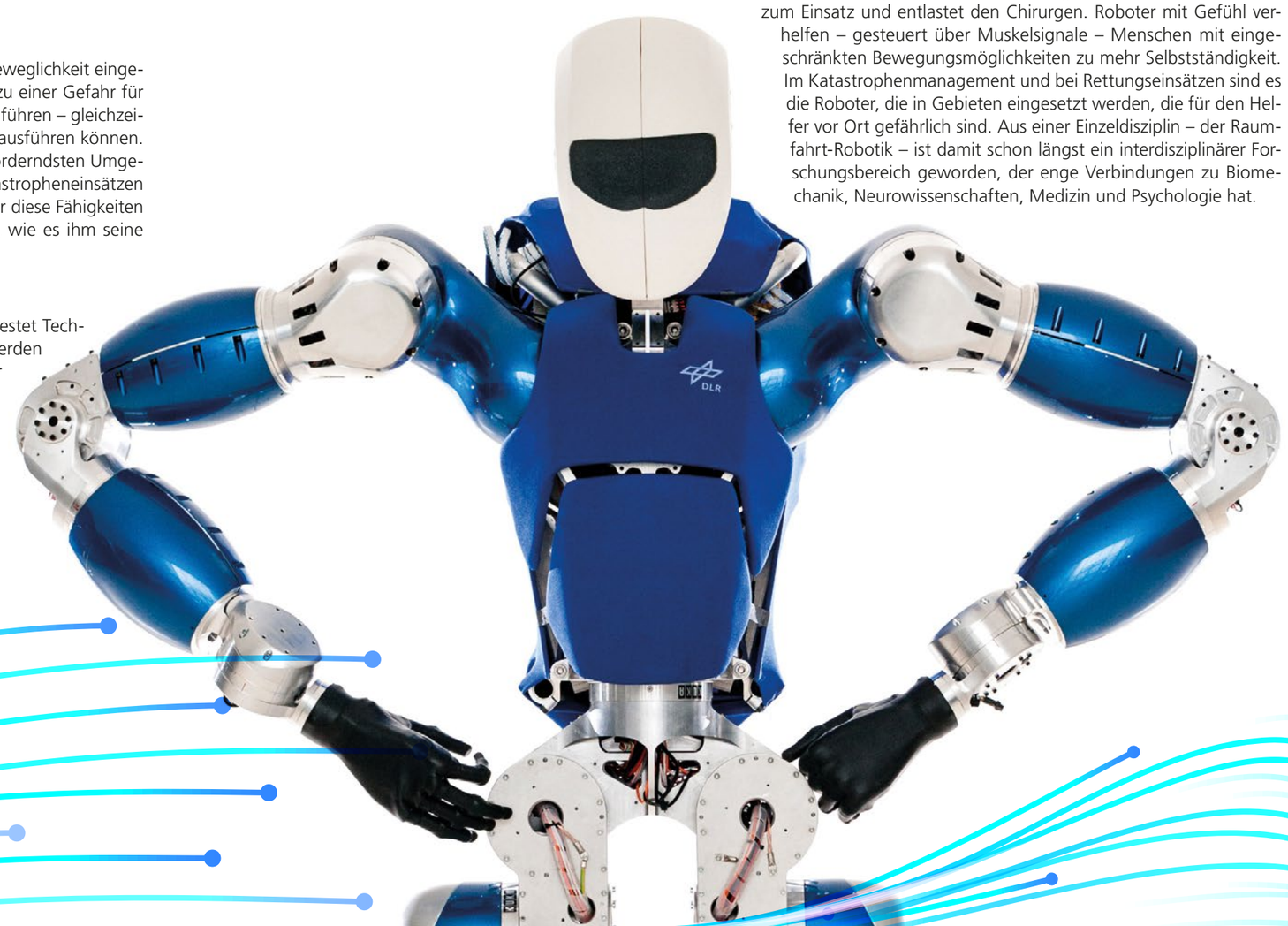
### Von der Exploration bis zum Wartungsdienst

Die Einsatzgebiete von robotischen Systemen in der Raumfahrt sind vielfältig. Das DLR entwickelt und testet Technologien vor allem in drei Bereichen. So sollen zum einen Roboter in der On-Orbit-Wartung eingesetzt werden und beispielsweise Satelliten inspizieren und warten, aber auch wissenschaftliche Nutzlasten reparieren oder austauschen. Hiermit wird eine Expertise aufgebaut, die im immer stärker werdenden internationalen Wettbewerb der Satellitenbetreiber zu einem unerlässlichen Bestandteil wird. Auch die Beseitigung von Weltraumschrott – zum Beispiel durch das Greifen eines taumelnden Satelliten – gehört zu den robotischen Aufgaben, die das DLR erprobt. Zum anderen entwickelt das DLR Roboter, die den Menschen im All bei dessen Tätigkeiten unterstützen oder für den Menschen gefährliche Aufgaben übernehmen. So wird die Sicherheit, aber auch die Effektivität von Astronauten erhöht. Als dritten Schwerpunkt entwerfen und erproben die DLR-Ingenieur*innen robotische Systeme, die bei der Exploration zum Einsatz kommen. Mit Rovern, die autonom, mit höherer Geschwindigkeit und großer Reichweite fremde Himmelskörper untersuchen sowie Bodenproben aufnehmen können, werden neue Erkenntnisse über die Entstehung unseres Sonnensystems ermöglicht.

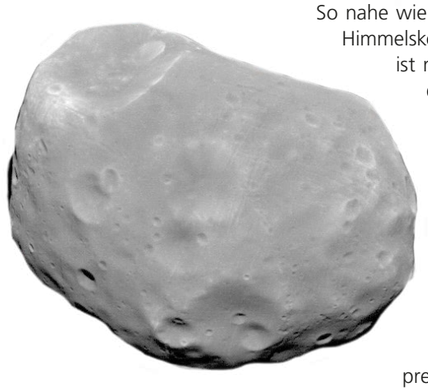
Entscheidend ist bei all diesen Aufgaben, die entwickelte Hardware mit Künstlicher Intelligenz auszustatten. Die Roboter sollen nicht nur zuverlässig autonom handeln können, sondern letztendlich auch „wissen" und erklären können, warum sie welche Handlung ausführen. Im Zusammenspiel mit dem Menschen oder auch einem kooperativen Team aus unterschiedlichen robotischen Systemen entstehen so neue Möglichkeiten für anspruchsvolle Missionen.

### Robotik für die Erde

Die Raumfahrt fungiert dabei als Testlabor für robotische Technologien, die für Herausforderungen auf der Erde wichtig sind. In der Industrie sind Roboter – beispielsweise Roboterarme in der Autoproduktion – mittlerweile alltäglich, mit dem Technologietransfer von der Raumfahrt in die Produktion erforscht das DLR derzeit die „Factory of the Future", in der intelligente Roboter in der digitalisierten Produktion arbeiten. Auch Pflegekräfte im Gesundheitsbereich profitieren zukünftig von der Raumfahrtforschung: Robotische Technologie kommt bei Operationen zum Einsatz und entlastet den Chirurgen. Roboter mit Gefühl verhelfen – gesteuert über Muskelsignale – Menschen mit eingeschränkten Bewegungsmöglichkeiten zu mehr Selbstständigkeit. Im Katastrophenmanagement und bei Rettungseinsätzen sind es die Roboter, die in Gebieten eingesetzt werden, die für den Helfer vor Ort gefährlich sind. Aus einer Einzeldisziplin – der Raumfahrt-Robotik – ist damit schon längst ein interdisziplinärer Forschungsbereich geworden, der enge Verbindungen zu Biomechanik, Neurowissenschaften, Medizin und Psychologie hat.



# Fahren auf dem Marsmond Phobos



© ESA/DLR/FU Berlin

Marsmond Phobos

So nahe wie der Marsmond Phobos seinem Planeten ist, befindet sich kein Mond an seinem Himmelskörper: Gerade einmal 6.000 Kilometer trennen Phobos vom Roten Planeten. Dabei ist noch nicht geklärt, wie dieser natürliche Satellit entstand – der Mond mit einem durchschnittlichen Durchmesser von 22 Kilometern könnte in der Frühgeschichte aus den Trümmern eines großen Einschlags auf dem Mars entstanden sein oder aber aus dem Asteroidengürtel stammen und von der Schwerkraft des Planeten erfasst worden sein. 2026 wird erstmals ein Rover, entwickelt vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt sowie der französischen Raumfahrtagentur CNES, seine Spur über den Marsmond ziehen und mit vier Instrumenten an Bord Phobos untersuchen. Er wird sein Ziel mit der japanischen Lande- und Probenrückkehrmission Martian Moons eXploration (MMX) erreichen, die voraussichtlich 2024 starten wird.

Was den Rover dort erwartet, zeigen beispielsweise Aufnahmen der MarsExpress-Sonde, die bereits mehrmals aus Entfernungen von weniger als 150 Kilometern mit der am DLR entwickelten hochauflösenden Stereokamera HRSC auf Phobos blickte. Der unregelmäßig geformte Mond ist vor allem durch seinen größten Einschlagkrater „Stickney“ unverwechselbar, dessen Durchmesser neun Kilometer beträgt. Bisher gelang es nicht, auf dem Trabanten aufzusetzen: Bereits 1988/89 sollten die sowjetischen Sonden Phobos 1 und 2 dort landen, doch zu beiden Sonden brach der Kontakt ab, bevor es zur Landung kam. Auch die im November 2011 gestartete russische Mission Phobos-Grunt scheiterte und erreichte Phobos nicht.

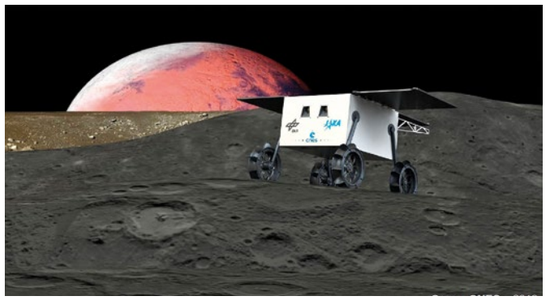
### Erster Besucher eines Marsmondes

Der knapp 30 Kilogramm leichte MMX-Rover wird also der erste Besucher auf dem Marsmond sein. Er wird auf Rädern mit einer sehr geringen Geschwindigkeit über Phobos rollen, dessen Gravitation lediglich ein Zehntausendstel der Erdgravitation beträgt. Ausgestattet mit Solarpanelen kann der MMX-Rover mindestens drei Monate auf der Oberfläche des Marsmondes betrieben werden.

Das DLR steuert dabei umfangreiche Beiträge zur Mission bei: So werden zwei der vier Rover-Instrumente – ein Raman-Spektrometer sowie ein Infrarot-Radiometer – am DLR-Institut für Optische Sensorsysteme sowie am DLR-Institut für Planetenforschung entwickelt und gebaut. Vor allem die Oberflächenzusammensetzung und -beschaffenheit sollen damit untersucht werden. An den beiden auf dem Rover installierten französischen Kameras ist das DLR wissenschaftlich beteiligt und wird mit den gewonnenen Daten forschen.

### Spurentiefe auf Phobos

Auch der Rover selbst hat neben dem Transport der Instrumente eine wichtige Aufgabe: Seine Spurentiefe in der Mondoberfläche wird der japanischen Raumfahrtagentur JAXA Aufschluss über die Beschaffenheit des Bodens geben und somit Informationen für die Probennahme mit dem Orbiter liefern. Voraussichtlich im August 2028 wird MMX zur Erde zurückkehren, eine Ankunft der Proben auf der Erde ist für Juli 2029 geplant.



© CNES

MMX-Rover auf dem Marsmond

Die Entwicklung des Rovers liegt ebenfalls zu großen Teilen in der Verantwortung des DLR: Das Institut für Robotik und Mechatronik ist unter anderem für das robotische Fortbewegungssystem zuständig, das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik entwickelt das Rover-Gehäuse. Die Integration des Rovers wird am Institut für Raumfahrtsysteme erfolgen. Nach der Landung wird der Rover dann vom Microgravity User Support Center (MUSC), dem Nutzerzentrum für Weltraumexperimente am DLR in Zusammenarbeit mit einem Kontrollzentrum in Frankreich betrieben. Die französische Raumfahrtagentur CNES ist unter anderem für die beiden Kamerasysteme auf dem Rover sowie das zentrale Service-Modul des Rovers zuständig.

## Ausgezeichnetes Laufen



**Laufroboter könnten für die planetare Erkundung in schwer zugänglichen Gebieten, beispielsweise in Canyons, Kratern oder Lava-Röhren auf dem Mars oder Mond, eingesetzt werden. Aber auch als Assistent im Gesundheitsbereich oder als Helfer in Katastrophengebieten könnten mobile Roboter wertvolle Unterstützung bieten. Zudem könnten die humanoiden Laufroboter der nächsten Generation über eine aktive Anpassung der dynamischen Antriebseigenschaften wie Steifigkeit und Dämpfung verfügen. Der vierbeinige Laufroboter Bert oder auch der humanoide Roboter TORO (TOrque-controlled humanoid RObot) gehören zu den Forschungsplattformen, mit denen die Entwicklung vorangetrieben wird. Zwei Projekte des DLR – die mit dem ERC Advanced Grant der Europäischen Kommission geförderten Projekte M-Runners und NatDyReL – forschen daran, die Laufroboter ihren biologischen Vorbildern ähnlich werden zu lassen. Dazu vereint das DLR Expertise unter anderem aus Robotik, Biomechanik, Künstlicher Intelligenz und Neurowissenschaft.**

# Weltraumtechnologie für die Medizin

Die Schnitte sind perfekt, und auch die durchtrennte Ader wird mit höchster Präzision vernäht. Konzentriert, risikominimierend und stressfrei – der Mitarbeiter im Operationssaal, der diese Fähigkeiten mitbringt, ist nicht menschlich, sondern robotisch: Der am DLR entwickelte Roboterarm MIRO unterstützt den Chirurgen, der von einer Konsole aus die Steuerung übernimmt. Dabei spürt der Arzt über seine Steuerung genau, was die Instrumentenspitzen am Roboter ausführen, so als würde er sie selbst in den Händen halten. MIRO wiederum filtert leichte Ungenauigkeiten der menschlichen Handbewegung heraus, führt die Bewegungen des Chirurgen hochpräzise aus und optimiert so die Operation. Roboter und Mensch arbeiten gemeinsam Hand in Hand.

Die Technik für den Einsatz in der Medizin stammt aus der Raumfahrt: Roboterarm MIRO verfügt wie DLR-Roboter „Space Justin“ über flexible Gelenke und Feingefühl. Zahlreiche Sensoren im Inneren sorgen dafür, dass alle Kontakte des Roboterarms mit der Umgebung in Echtzeit an das Eingabegerät des Operators zurückgemeldet werden. Auf einem Bildschirm sieht der Chirurg während des Eingriffs die Endoskop-Aufnahmen in 3D und steuert gefühlt die Spitzen seines Werkzeugs – und nicht die umständlichen, aber notwendigen Verlängerungen der Instrumente. Für den Chirurgen bedeutet dies ein intuitiveres und gefühlt direkteres Operieren.

### Robotischer Assistent in der Pflege

Technologien wie die sichere Mensch-Roboter-Interaktion oder auch die 3D-Verarbeitung in Echtzeit sind in der Raumfahrt-Robotik des DLR zentrale Forschungsgebiete. Von diesen Entwicklungen, die beispielsweise Astronaut*innen bei der Exploration fremder Himmelskörper unterstützen, kann der Gesundheitsbereich profitieren. Ein robotischer Assistent soll dabei nie den Menschen ersetzen – vielmehr kann er sowohl den Patienten als auch das medizinische Personal entlasten. So unterstützt die Rollstuhlassistenz EDAN (EMG-controlled daily assistant) mit einem Leichtbauroboterarm und einer Fünf-Finger-Hand Menschen mit starken motorischen Einschränkungen. Seine Kommandos erhält er über die Muskelsignale seines Nutzers. Dabei „denkt“ der Roboter auch mit: Erkennt er die Intention des Nutzers, passt er die erhaltenen Steuerungskommandos an die Aufgabe an und führt diese optimiert aus.

Wichtig ist dabei der Technologietransfer aus der Robotik in den Gesundheitsbereich: Als Partner im internationalen Konsortium des Digital Innovation Hub Healthcare Robotics (DIH-HERO) bietet das DLR zum Beispiel seine Expertise und Unterstützung kleinen und mittelständischen Unternehmen an und profitiert im Gegenzug davon, die Bedürfnisse der Unternehmen frühzeitig kennenzulernen und den Technologietransfer auf den Markt zu beschleunigen.

## Teamarbeit zwischen Himmel und Erde

Der Chef fliegt in 400 Kilometer Höhe um die Erde, der Helfer arbeitet am Boden - beim Experiment „SUPVIS Justin“ führen Befehlsempfänger und Befehlsgeber eine Fernbeziehung: Während der Astronaut in der Internationalen Raumstation ISS um die Erde kreist, führt DLR-Roboter Justin im irdischen Labor die Befehle aus. Oder vielmehr: Er entscheidet, mit welchen Aktivitäten er das von seinem Chef im All vorgegebene Ziel erreicht. Die Künstliche Intelligenz dafür haben ihm die Ingenieur*innen des DLR beigebracht, nun kann er die einzelnen Teilaufgaben selbstständig und ohne detaillierte Befehle ausführen. Allerdings: SUPVIS-Justin ist zwar schon ziemlich smart, die Kontrolle aber behält der Astronaut am Steuer-Tablet.

Assistent mit Köpfchen: Roboter Justin

2017 wurde die Teamarbeit im Rahmen des METERON-Projekts (Multi-Purpose End-to-End Robotic Operation Network) das erste Mal getestet. „Rollin‘ Justin“ arbeitete bisher erfolgreich mit dem amerikanischen Astronauten Scott Tingle sowie den europäischen Astronauten Paolo Nespoli und Alexander Gerst zusammen. Dabei wird Justin als Mitarbeiter zumindest optisch auf den Mars versetzt, um dort möglichst selbstständig - Aufgabe für Aufgabe - Solarpaneele zu inspizieren, zu warten und seinem Astronauten im Orbit immer wieder Rückmeldungen für die nächsten Arbeitsschritte zu geben.

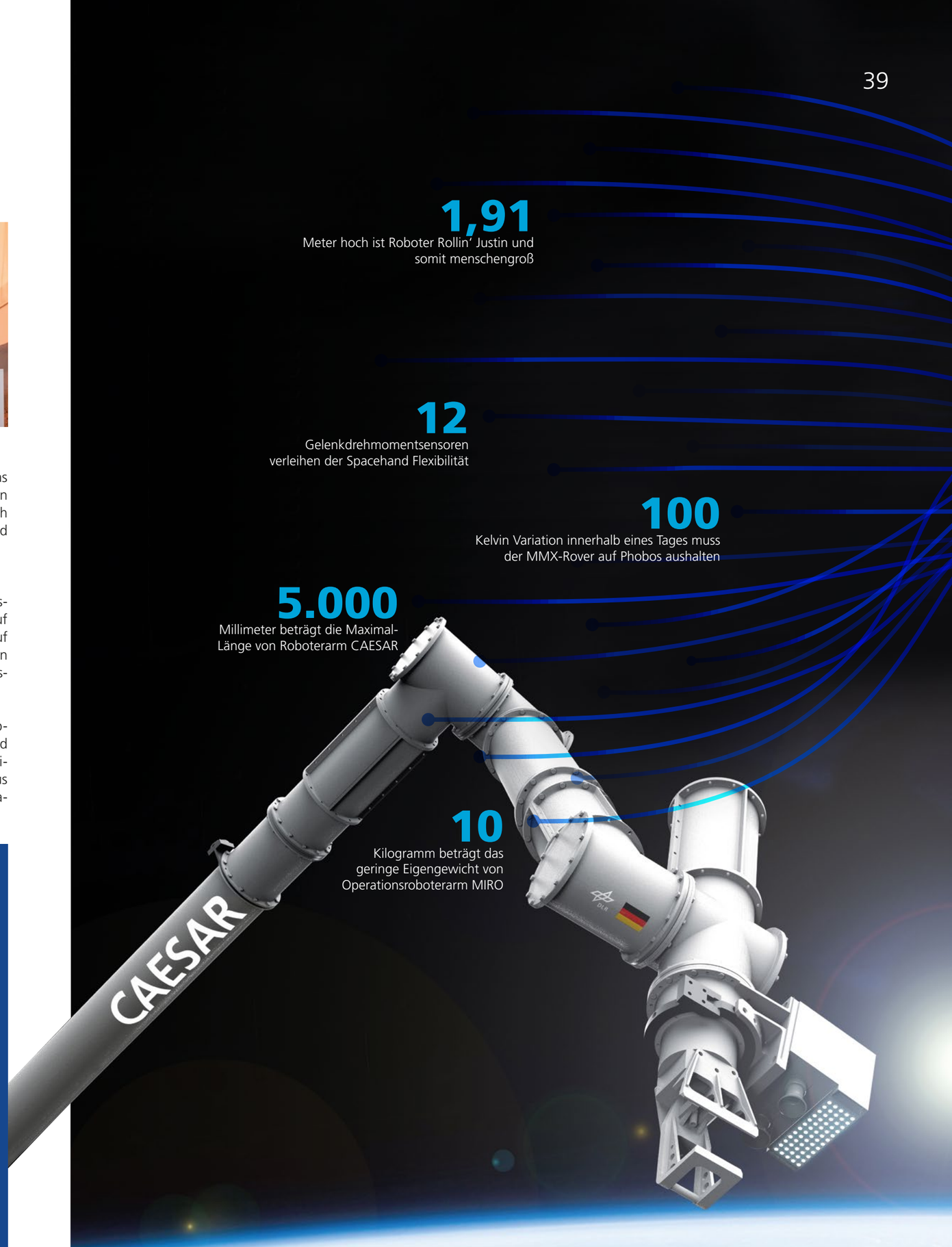
### Robotischer Partner des Astronauten

Allerdings wurden die Aufträge und Situationen, die Astronaut und Roboter gemeinsam meistern sollten, stetig anspruchsvoller. Im August 2018 absolvierten Alexander Gerst und Rollin‘ Justin zunächst gemeinsam die Wartung einer Solaranlage auf dem Roten Planeten. Allerdings stellten die Ingenieur*innen und Wissenschaftler*innen das Mensch-Maschine-Team noch auf eine weitere Probe: Sie ließen während des Live-Experiments überraschend eine Satellitenempfangsanlage auf dem Mars in Brand geraten. Über die intuitive Bedienung des Tablets und die intelligente Selbstständigkeit des Roboters gelang es dem Astronauten und seinem Helfer, das brennende Modul erfolgreich auszutauschen.

Der Einsatz eines intelligenten, relativ selbstständigen Roboters hat mehrere Vorteile: Das Mensch-Maschine-Team ist unabhängiger von Kommunikationsverzögerungen, da eine kontinuierliche Steuerung des Roboters nicht notwendig ist. Zudem wird die Arbeitsbelastung des Astronauten reduziert, indem Aufgaben an den Roboter übertragen werden. Auf zukünftigen Missionen könnte daher ein Astronaut im Orbit um einen außerirdischen Himmelskörper fliegen und von dort aus ein Team aus Robotern mit Künstlicher Intelligenz auf der Oberfläche dieses Himmelskörpers steuern. Der Roboter wäre in dieser Konstellation auch nicht mehr nur der verlängerte Arm des Astronauten – er wäre vielmehr sein Partner am Boden.

## Geschickt und flexibel

**Die menschliche Hand und der menschliche Arm haben viele Vorteile – doch für einige Aufgaben im Weltall wäre der Einsatz von Robotersystemen kostengünstiger und weniger riskant. Daher entwickelt das DLR mit dem Roboterarm CAESAR (Compliant Assistance and Exploration SpAce Robot) und der Spacehand eine robotische Alternative, die nahe an die menschlichen Fähigkeiten herankommt und im Langzeiteinsatz im geostationären Orbit den harschen Bedingungen im Weltraum standhält. Die Roboterhand nutzt dabei alle Werkzeuge, die Astronaut*innen bei ihren Außeneinsätzen verwenden, um Strukturen im All zusammenzubauen, zu warten oder zu reparieren. CAESAR ist ein Roboterarm mit hoher Flexibilität, der taumelnde und nicht kooperative Satelliten greifen und stabilisieren kann. Dies kann entweder semi-autonom, teleoperiert oder durch Telepräsenz mit Kraftrückkopplung durchgeführt werden. Beide Technologieentwicklungen profitieren dabei von ihren Vorläufern im DLR wie der Roboterhand DEXHAND oder dem Roboterarm ROKVISS (RObotik-Komponenten-Verifikation auf der ISS), der über fünf Jahre an der Außenseite der Internationalen Raumstation ISS betrieben wurde.**



# Das Potenzial der Quanten

Quanten umgeben uns auf mikroskopischen Skalen. Man kann sich Quanten als allerkleinste Pakete von physikalischen Größen vorstellen, die nicht weiter gestückelt werden können. Ein bedeutendes Beispiel ist das Licht. Oft scheint das Quantenverhalten auf kleinen Skalen unserer makroskopischen Intuition aus der Welt der großen Dinge zu widersprechen und faszinierende Quantenphänomene treten auf. Die Erkenntnis der Aufteilung physikalischer Größen wie Energie in Quanten, Quantisierung genannt, in der uns umgebenden mikroskopischen Welt, hat die Quantenmechanik als Teilgebiet der Physik begründet und unser Verständnis von Zuständen und von Messungen grundlegend auf den Kopf gestellt. Berühmtes Beispiel ist das Gedankenexperiment von Schrödingers Katze, in dem das Quant (hier eine Katze) bis zur Messung (dem Öffnen eines Kartons) zugleich in zwei Zuständen (lebendig und tot) vorliegt.

Inzwischen sind Bauteile und Instrumente, die sich Quantenverhalten zunutze machen, nicht mehr wegzudenken aus Industrie und täglichem Leben. Sie stecken als Transistoren in unseren Handys und elektrischen Geräten, werden für Displays wie LEDs (Light-emitting Diodes) eingesetzt oder sind die Grundlage von Lasern. Moderne Kommunikation, Datenübermittlung und generell Elektronik wären ohne die Ausnutzung des Quantenverhaltens von beispielsweise Licht nicht denkbar. Die erste Quantenrevolution hat uns alle längst erreicht.

**Die zweite Quantenrevolution**

Nun stehen wir am Anfang einer zweiten Quantenrevolution – Stichworte für das DLR sind hier insbesondere Quantensensorik und Quantenkommunikation. Grundlage ist die Manipulation und damit Nutzbarmachung einzelner Quanten von Atomen oder Photonen sowie die sogenannte Kohärenz von Materiewellen. Kohärenz bedeutet, dass sich alle Materieatome im selben Wellenzustand befinden und sich wie eine einzige große Welle verhalten. Dieses Verhalten wird in Bose-Einstein-Kondensaten (BECs) realisiert, wo sich eine große Materiewelle aus Atomen, gefangen und gekühlt in einer Falle, kohärent bewegt. Lässt man diese Welle aus ihrer Falle entkommen, kann sie als sogenannter Atomlaser genutzt werden. Mögliche Einsatzgebiete sind holografische Projektionen und mittels Überlagerung oder Interferometrie von Materiewellen zum Beispiel Atomuhren für sehr genaue Zeitmessungen.

Eine weitere bedeutende Anwendung der zweiten Quantenrevolution ist Quantencomputing. Es wird durch enorme Beschleunigung bei der Berechnung spezieller, zum Teil mit klassischen Computern nicht lösbarer Problemstellungen die Computerwelt revolutionieren. Aufgrund ihres hohen Potenzials, parallel laufende Berechnungen durchzuführen, können Quantencomputer allerdings auch eine Gefahr darstellen: Sie können auch bisher als sicher geltende kryptografische Verschlüsselungen aufbrechen.

**Quantentechnologie fürs All**

Mit der Schaffung zweier neuer Institute mit Schwerpunkt Quantentechnologien bereitet das DLR den Sprung ins All für die zweite Quantenrevolution vor. Forschungsgruppen arbeiten an der Produktion von größeren und langlebigeren Bose-Einstein-Kondensaten, um diese besser für praktische Anwendungen wie Quantensensorik und Quantenverschlüsselung nutzbar zu machen. Um das Verhalten der Quantenkondensate unter Schwerelosigkeit beziehungsweise geringer Mikrogravitation zu erforschen, wurde mit Höhenforschungsraketen in den QUANTUS/MAIUS-Forschungsprojekten das erste Bose-Einstein-Kondensat in Schwerelosigkeit erzeugt und getestet. Dies wird durch die vom DLR geplante Mission BECCAL auf der Internationalen Raumstation auf das nächste Level gebracht. Hierbei ermöglicht die Raumstation die Durchführung ausführlicher Tests in Schwerelosigkeit. Auch die Herausforderungen der Quantenkommunikation und einer wirksamen Verschlüsselung durch Quantenkryptografie stehen im Fokus des DLR. Neue, bahnbrechende Experimente sollen hierbei den Einfluss der Manipulation einer Quantenwelle auf eine Tausende Kilometer entfernte – jedoch verbundene – zweite Quantenwelle demonstrieren. Hiermit leistet die Raumfahrtforschung und -technologie des DLR einen bedeutenden Beitrag zur technologischen Weiterentwicklung und Sicherung unserer Infrastrukturen.

© NASA

## BECCAL – Experimente mit Bose-Einstein-Kondensaten auf der ISS

Um Quantentechnologien für den Einsatz im All und auf der Erde zur Reife zu bringen, sind Pionier-Experimente an verschiedenen Quantensystemen notwendig. Von besonderem Interesse ist die Möglichkeit, Bose-Einstein-Kondensate, die eine potenzielle Grundlage für genaueste Atomuhren sind, unter Schwerelosigkeit beziehungsweise geringer Mikrogravitation zu erzeugen und zu untersuchen. Die geringe Gravitation bietet den Vorteil, dass die Kondensate im freien Fall längere Zeit intakt gehalten werden können. Zudem ist eine Untersuchung des Verhaltens der Kondensate unter Weltraumbedingungen allein schon für den Erkenntnisgewinn an sich interessant.

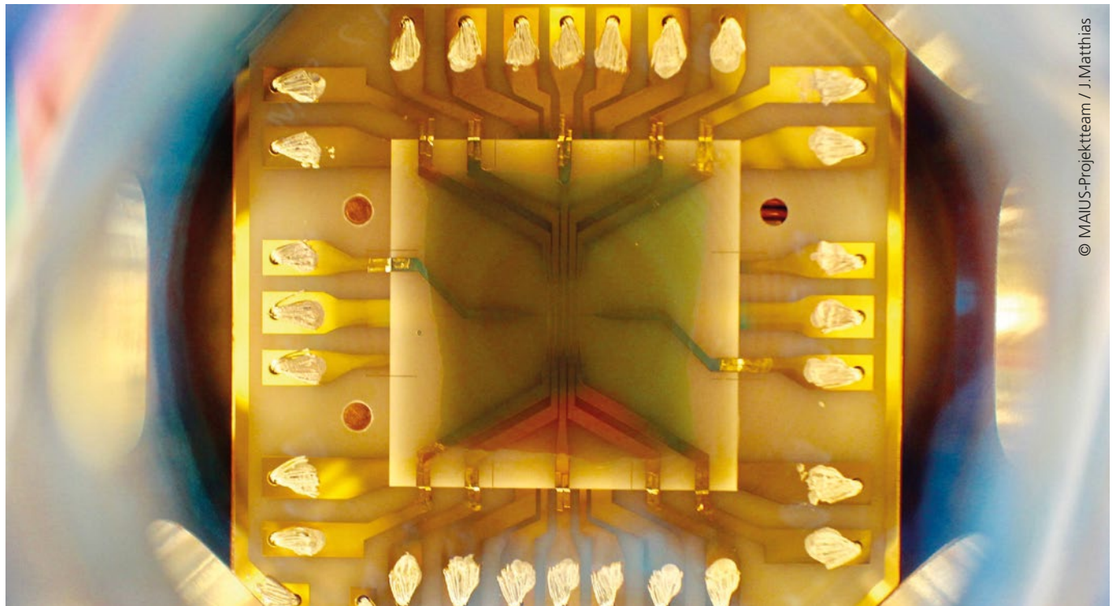
Nach der erfolgreichen Erzeugung von Bose-Einstein-Kondensaten in Schwerelosigkeit auf Flügen mit Höhenforschungsraketen in den QUANTUS/MAIUS-Projekten sind Experimente im All der nächste vielversprechende Schritt – unter Schwerelosigkeit auf der ISS haben BEC eine Lebenszeit von bis zu 20 Sekunden. Diesen Schritt wird die vom DLR geplante Mission BECCAL auf der Internationalen Raumstation gehen. Hierbei ermöglicht die Raumstation Tests von längerer Dauer in Schwerelosigkeit - so ist zum Beispiel die Durchführung von präzisen Experimenten zur Atominterferometrie, also der Überlagerung von Atomwellen, über längere Zeiträume als bisher möglich.

### Technologien der zweiten Generation

Neben den QUANTUS/MAIUS-Missionen kooperiert das DLR auch mit der amerikanischen Weltraumbehörde NASA beim Cold Atom Laboratory (CAL), der Vorgängermission von BECCAL. Mit diesem Experiment auf der Internationalen Raumstation wurden bereits erste Schritte unternommen, um Bose-Einstein-Kondensate sowie generell Atome bei niedrigen Temperaturen unter Weltraumbedingungen zu erforschen. BECCAL wird diese Experimente um eine neue Generation von quantenbasierten Instrumenten und Geräten entscheidend erweitern. Das DLR mit seinen beiden neuen quantentechnologischen Instituten wird bei der Entwicklung und Herstellung dieser Technologien der zweiten Generation federführend sein.

Mit Missionen wie BECCAL wird die Forschung und Entwicklung im DLR die Grundlage für die Anwendung neuer quantenbasierter Technologien im Weltraum legen. Überlagerung beziehungsweise Interferometrie mit beispielsweise Atomlasern aus Bose-Einstein-Kondensaten werden hierbei sowohl Navigationssysteme, die auf Messung von Beschleunigungen basieren als auch Gravimetrie zur Vermessung des Schwerefeldes unserer Erde von ungeahnter Präzision ermöglichen. Dies wird die Kommunikation und Navigation revolutionieren sowie Beiträge zur Grundlagenforschung leisten.

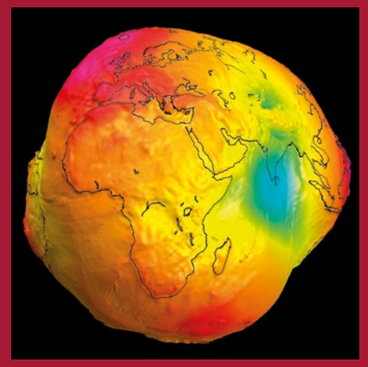
Atomchip der MAIUS-Apparatur



© MAIUS-Projektteam / J.Matthias

## Beschleunigung so exakt wie nie zuvor

**In der Inertialsensorik wird die Beschleunigung, das heißt die zeitliche Änderungsrate der Geschwindigkeit, gemessen. Dadurch können sowohl Geschwindigkeits- als auch Höhenänderungen von Flugzeugen oder erdnahen Satelliten im Gravitationsfeld der Erde bestimmt werden. Atom-Interferometer, die sich Bose-Einstein-Kondensate zunutze machen, reagieren sehr sensitiv auf Beschleunigungen. Durch auf Atom-Interferometrie und damit Quantentechnologie basierenden Inertialsensoren kann daher die Genauigkeit und zusätzlich die Stabilität von Beschleunigungsmessungen gesteigert werden. Dies ermöglicht mit einer Höhengenauigkeit im Zentimeterbereich eine Messung kleinster Positionsänderungen von Navigationssatelliten sowie autonomen Flugverkehr ohne Abgleich mit Uhren. Auch plant das DLR, sich an einer Nachfolgemission zu GRACE-FO zu beteiligen, um hierduch das Gravitationsfeld der Erde exakt vermessen zu können. Diese soll quantenoptische Inertialsensoren nutzen, um beispielsweise die Verteilung von Wasser und das Pflanzenwachstum zu beobachten.**



© GFZ Potsdam

## Abhörsichere Quantenschlüssel für Digitalisierung

Mehr und mehr durchdringen digitale Lösungen und digital vernetzte Geräte den Alltag und die Berufswelt – dies reicht von der Kommunikation über Industrie 4.0 bis hin zu zukünftigen Innovationen im Rahmen der zweiten Quantenrevolution. Die zukünftigen Möglichkeiten, bestehende kryptografische Verschlüsselungen durch Quantencomputer aufzubrechen, machen eine neue Art der Verschlüsselung zum Schutz unserer Infrastruktur, Kommunikation und Daten nötig.

Eine mögliche neuartige Verschlüsselung macht sich ebenfalls Quanteneffekte zunutze. Das Prinzip beruht auf dem Quantenphänomen, dass eine Messung auch immer den Zustand des Gemessenen beeinflusst. Dabei werden überlagerte Wellen- oder Quantenzustände bei der Messung auf einen Zustand, beispielsweise 0 oder 1, reduziert. Nun haben ein Sender und Empfänger einen gemeinsamen, zufälligen und geheimen Quantenschlüssel, der benutzt wird, um Nachrichten zu ver- und entschlüsseln. Dieser Quantenschlüssel ist sowohl zwischen Sender und Empfänger geteilt als auch mit dem jeweils anderen verschränkt.

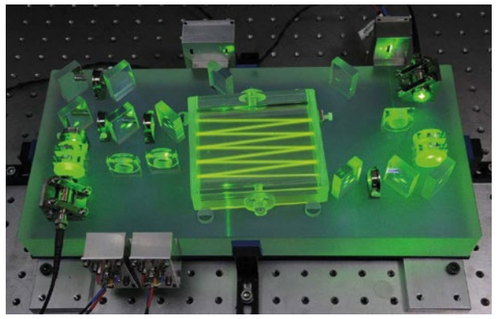
### Über weite Distanzen verschränkt

Beide Schlüssel „wissen“ also vom Zustand des jeweils anderen Schlüssels. Bricht nun jemand in das quantenverschlüsselte System ein und führt durch Auslesen der Daten eine Messung des Zustandes durch, kollabiert dieser zu 0 oder 1. Der Einbruch in das System wird dann durch die Quantenschlüssel angezeigt. Diese Verschränkung tritt auch über weite Distanzen auf und kann daher bei der verschlüsselten Satellitenkommunikation genutzt werden.

Die Demonstration einer solchen Kommunikation mit Quantenschlüsseln auf dem Weg zur Nutzbarmachung dieser Technologie ist ein Ziel von Forschung und Entwicklung der DLR-Raumfahrtforschung. Für zukünftige Missionen – beispielsweise im Rahmen der QUARTZ-Plattform gemeinsam mit der europäischen Raumfahrtorganisation ESA – soll derselbe verschränkte Quantenzustand oder Welle aufgeteilt werden. Ein Teil wird dann mit einem Satelliten ins All gebracht, während der zweite Schlüssel auf der Erde verbleibt. Die Manipulation beispielsweise des auf der Erde verbliebenen Quantenschlüssels führt dann ebenfalls zu einer Veränderung bei der Tausende Kilometer entfernten Quantenwelle im All. Diese Quanten-Erde-All-Kommunikation und umgekehrt wäre weltweit die erste Demonstration von Quantenschlüsseln in dieser Konfiguration und ein Durchbruch für die zweite Quantenrevolution.

## Mit Quanten zu präziser Zeitmessung – eine neue Uhren-Generation

Uhren bestimmen und strukturieren unseren Alltag. Darüber hinaus ist möglichst präzise Zeitmessung essentiell für Kommunikation, Navigation und Steuerung autonomer Systeme – im All und auf der Erde. Energienetze und Finanzmärkte beispielsweise erfordern eine exakte zeitliche Synchronisation. Um die durch gestiegene Anforderungen an die Zeitmessung nötige Genauigkeit zu erreichen, werden immer neue Systeme zur Zeitmessung entwickelt. Eine gewaltige Steigerung der Genauigkeit wurde Mitte des 20. Jahrhunderts durch die Erfindung und Nutzung von Atomuhren als Zeitstandard möglich. Bei Atomuhren wird die Frequenz von Licht beim Übergang zwischen zwei Energiezuständen von Elektronen des Atoms als Zeitreferenz genommen, um Zeitintervalle mit einer Genauigkeit von bis zu $10^{-15}$ Sekunden zu messen.



© MAIUS-Projektteam / J. Matthias

### Genauigkeit für All und Erde

Modernste Atomuhren ermöglichen so bei globalen Satellitennavigationssystemen wie den Galileo-Satelliten die Messung der Laufzeiten zwischen mehreren Satelliten und uns auf dem Erdboden. Aus diesen unterschiedlichen Laufzeiten der Satelliten werden dann genaue Positionen abgeleitet. So überträgt sich die Genauigkeit der Uhren in Genauigkeit bei der Positionsmessung; eine hohe zeitliche Präzision ist also die Voraussetzung, um genaue Positionsangaben auf der Erde, auch für uns Nutzer*innen, errechnen zu können.

Um heutige Systeme für Kommunikation und Navigation weiterzuentwickeln, wird an den neuen quantentechnologischen Instituten des DLR eine völlig neue Generation von Uhren entwickelt: optische Atomuhren mit einer höheren Genauigkeit von bis zu $10^{-18}$ Sekunden. Gleichzeitig sollen diese Uhren mit einer größeren Stabilität gebaut werden als „traditionelle" Atomuhren sie aufweisen. Für diese optischen Atomuhren werden die Frequenzübergänge kalter Atome bei höherer optischer Frequenz – und damit zeitlicher Genauigkeit – als Referenz verwendet, wozu ein sehr genau stabilisierter Laser zur Auslesung nötig ist.

### Erprobung auf Kompaktsatelliten

Die am DLR entwickelten optischen Jod-Atomuhren sind über längere Zeiträume kompakt und sollen im All getestet werden. Ziel ist es, ein neues globales Referenzsystem für Zeit zu entwickeln, das die Sekunde neu definiert. Ein solches innovatives Referenzsystem kann dann sowohl für Anwendungen im All als auch auf der Erde eingesetzt werden. Für Tests an optischen Atomuhren in der Umlaufbahn entwirft und plant das DLR die Kompaktsatellitenmission COFROS mit quantenoptischen Terminals. Eine weitere Erprobung und Anwendung optischer Atomuhren könnte auch auf der Internationalen Raumstation ISS und bei Konstellationen zukünftiger Navigationssatelliten im Rahmen des DLR-Projekts ADVANTAGE erfolgen.

## Die Welt der kleinen Dinge

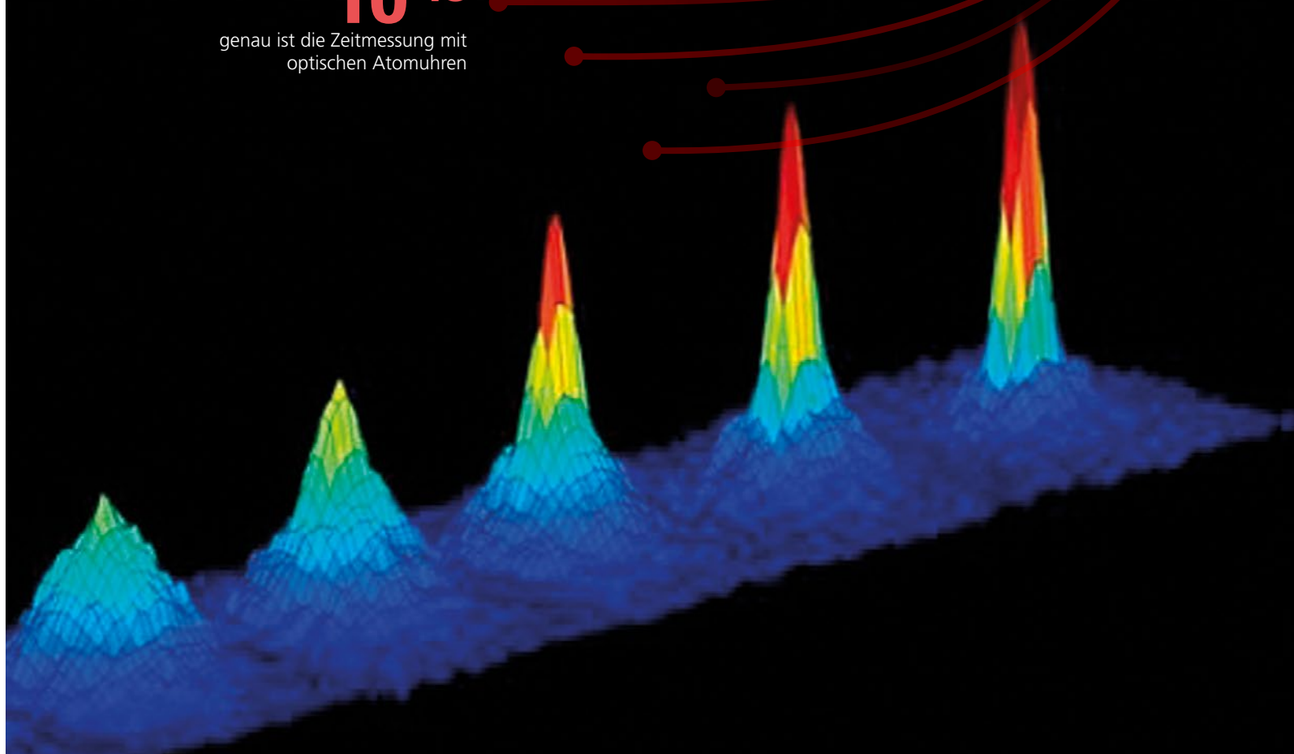
**Auf den kleinen Skalen der Quanten scheinen Gesetze unserer makroskopischen Welt außer Kraft gesetzt: So verhalten sich Quanten je nach Situation grundlegend verschieden. Bei Experimenten kann ein Verhalten nachgewiesen werden, das entweder dem von Wellen entspricht – mit Überlagerung oder Interferenz – oder dem von Teilchen, die an einem Ort lokalisiert sind (der sogenannte Welle-Teilchen-Dualismus). So kann Licht entweder als ein einzelnes Photon oder als eine Welle mit bestimmter Frequenz oder Wellenlänge nachgewiesen werden. Daher können Quanten beziehungsweise ihre Zustände sich auch wie Wellen auf dem Meer überlagern oder sogar gemeinsam denselben Wellenzustand annehmen. Dies führt zu weiteren faszinierenden Phänomenen wie Kohärenz und Verschränkung.**

**Bei der Kohärenz befinden sich mehrere Teilchen als Teil einer größeren Materiewelle im selben Zustand. Interessanterweise führt dann die Auslenkung eines Teilchens zur gleichen Auslenkung aller anderen Teilchen im gleichen kohärenten Zustand – so, als handele es sich um ein einziges neues „großes" Teilchen. Ähnlich sind bei der Verschränkung Teilchen in einem Zustand, der von anderen Teilchen abhängt. Die Teilchen „wissen" also voneinander. Und sie tun dies theoretisch über beliebig große Distanzen, was völlig neue Wege für Kommunikation und Verschlüsselung ermöglicht.**

**-273,15**
Grad Celsius beträgt die Temperatur bei Experimenten mit CAL und BECCAL auf der ISS

**20**
Sekunden überleben BECs auf der Internationalen Raumstation ISS

**$10^{-18}$**
genau ist die Zeitmessung mit optischen Atomuhren



**Impressum**

Herausgeber:
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Vorstandsbereich Raumfahrtforschung und -technologie
Programmstrategie
Redaktion: Manuela Braun (DLR)
Bildrecherche: Ute Kersten (DLR)

Anschrift:
Hansestraße 115, 51149 Köln
Telefon 02203 601 3882
E-Mail: Kommunikation.Raumfahrt@dlr.de

DLR.de

Bilder DLR (CC-BY 3.0), soweit nicht anders angegeben.

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt