

DLR magazin

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt · Nr. 154 · Juni 2017

AM PULS DER ERDE

Mehr Durchblick in der Klimaforschung mit
der zukünftigen Satellitenmission Tandem-L





Bild: Barbara Frommann

Liebe Leserinnen und Leser,

die Weltgemeinschaft gab sich im September 2015 mit der Agenda 2030 und den dazugehörigen 17 Zielen für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals – SDGs) einen ambitionierten Fahrplan für die Lösung der globalen Herausforderungen. Mit seinen Forschungs- und Technologieentwicklungen in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Verkehr und Sicherheit arbeitet das DLR direkt oder indirekt für diese Ziele. Im aktuellen DLR-Magazin thematisieren wir Beiträge des DLR zum Klimaschutz (SDG 13), zur nachhaltigen Energieversorgung (SDG 7), zur Versorgung mit sauberem Wasser (SDG 6) und zur Bildung internationaler Partnerschaften für nachhaltige Entwicklung (SDG 17). Und mit unserer Forschungskommunikation leisten wir einen Beitrag zu hochwertiger Bildung (SDG 4).

Gemeinsam mit 18 Partnern in der Helmholtz-Allianz „Fernerkundung und dynamische Erdsystemmodelle“ hat das DLR mit Tandem-L eine Radarsatelliten-Mission für ein hochgenaues und dreidimensionales Abbild unserer Erde konzipiert – als wichtigen Beitrag zur Umwelt- und Klimaforschung. Wie bewegen sich Berge? Wie entwickeln sich Wetter und Wasserverfügbarkeit? Was ist mit den Eisschilden? Wie viel Biomasse steckt in den Wäldern? Die Erdbeobachtung mit Radarsatelliten wird hierauf Antworten liefern können.

Und wie lässt sich aus Solarenergie emissionsfrei Wasserstoff erzeugen? Auf der Plataforma Solar de Almería nimmt das zukunftsweisende Projekt Hydrosol_Plant mit Partnern aus Spanien, den Niederlanden und Griechenland seinen Testbetrieb auf. Das Besondere: Der Wasserstoff wird nicht durch Elektrolyse erzeugt, sondern durch einen thermochemischen Prozess in einem Solarreaktor made by DLR.

Für die nachhaltige Transformation der Energiesysteme hat sich international der deutsche Begriff ‚Energiewende‘ etabliert. Im Kopernikus-Programm arbeiten Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft gemeinsam an den technologischen und wirtschaftlichen Lösungen für die Dekarbonisierung. Die DLR-Energieforschung beteiligt sich an drei von vier Kopernikus-Projekten in den Bereichen Energiespeicher, Energiesystemanalyse, alternative Brennstoffe und technische Verbrennungsprozesse.

Dies sind nur einige Beispiele, wie das DLR mit seiner Forschungskompetenz an der Lösung der globalen Herausforderungen mitwirkt – als verlässlicher Partner für Politik und Wirtschaft. Viel Freude beim Erkunden des DLR-Magazins.

Matthias Ruchser
Leiter Politikbeziehungen und Kommunikation



ERKENNTNISSE ÜBER CERES UND VESTA 44



MONDSTEIN „BACKEN“ IM SOLAROFEN 40



SOLARE WASSERSTOFFERZEUGUNG 20



KOMMENTAR 4



AUTONOM LANDEN 36



IM ARLANDA-LUFTFAHRTMUSEUM 52

DLRmagazin 154

KOMMENTAR	4
MELDUNGEN	5
KURZMELDUNGEN	6
AM PULS DER ERDE Die Satellitenmission Tandem-L	8
BRANDHEISSE MISSION Feuerüberwachung aus dem All	16
GANZ OHNE KOHLENDIOXID Solare Wasserstoffgewinnung	20
MIT KOPERNIKUS IN DIE ZUKUNFT Initiative zur Energiewende	24
WASSERREINIGUNG IN NEUEM LICHT Wie wirken Xenon-Strahler auf Schadstoffe?	26
MIT CARBON UND KORK INS ALL Neue Finnen für Höhenforschungsraketen	28
FÜNFBÄTTRIG LEISER Weniger Lärm von Hubschraubern	32
ERSTLFUG DES ROCHENS Premiere im Simulator	34
EIN NAVI FÜR FREMDE PLANETEN Test zum autonomen Landen	36
EIN HAUS AUF DEM MOND Ziegelsteine „backen“ im Sonnenofen	40
HOHER BERG UND SALZIGER ZWERG Fundamentales Wissen dank Sonde Dawn	44
BLICK INS FEUER Teil 4 der Serie Großgeräte: der HBK-5	48
IN MUSEEN GESEHEN Das Arlanda-Luftfahrtmuseum in Schweden	52
REZENSIONEN	56

„DIGITALISIERUNG IN DER LUFTFAHRT- FORSCHUNG HEISST, VERSCHIEDENSTE DATENQUELLEN INTELLIGENT ZU VERKNÜPFEN“

Ein Kommentar von Professor Rolf Henke

Die Mobilität bestimmt mehr und mehr unseren Alltag. Diese Mobilität nachhaltig zu gestalten, ist eine unserer wichtigsten Aufgaben. Emissionen aller Art zu senken, verlangt nach ständigen Weiterentwicklungen. Waren es früher acht bis zehn Jahre, die vergingen, bis ein neues Luftfahrzeug in Betrieb genommen werden konnte, so muss es heute schneller gehen. Die Flugzeuge, an denen wir heute forschen, sollen noch in 30 Jahren fliegen. Das bedeutet, dass wir heute nicht nur an, sondern auch in die Zukunft denken müssen. Dafür sind neue Prozesse in Entwicklung, Produktion und Betrieb notwendig. Doch wie werden diese aussehen?

Es gilt, auf neue Art zu denken, sich neuer Werkzeuge zu bedienen. Es gibt Unmengen an Daten von jedem einzelnen System, vom Antrieb bis zur Flugzeugzelle über das Flugzeug als Ganzes, auch über seinen Betrieb und die Wartung. Es sind komplexe und heterogene Datensätze, die zu verknüpfen sind. Heute stehen uns nicht nur die Daten zur Verfügung, auch die Computertechnik verfügt über eine vor Jahren noch nicht denkbare Leistungsfähigkeit. Es kommt immer mehr darauf an, nicht nur den Flugzeugentwurf am Rechner zu realisieren, sondern das Produkt auch auf diese Weise zu erproben und zu zertifizieren – certification by analysis. Nicht nur, dass damit Kosten gesenkt werden, auch die Entwicklungszyklen können optimiert und neue Technologien besser bewertet werden. Einher gehen diese Prozesse mit dem Verständnis für das Gesamtsystem – die sogenannte Systemfähigkeit. Die Betrachtung aller Teilbereiche, von der Aerodynamik und Aeroelastik, der Flugführung und Flugsystemtechnik, bis hin zur Strömungstechnik, Materialwissenschaft und Betriebswirtschaft.

Einen deutlichen Schritt nach vorn sind wir mit C²A²S²E² gegangen, unserem Hochleistungsrechner. Er kann aerodynamische Prozesse und deren Wechselwirkungen auf die Flugzeugstrukturen berechnen. Auch wurde im DLR mit CPACS (Common Parametric Aircraft Configuration Scheme) ein neues Datenformat entwickelt. Damit ist es möglich, zu erkennen, wie sich zum Beispiel aerodynamisch bedingte Veränderungen innerhalb eines Entwicklungsprozesses auf andere Bereiche wie die Antriebe und die Struktur auswirken. Entwickelt wurde die Software im Projekt FrEACs (Future Enhanced Aircraft Configurations), elf DLR-Institute und -Einrichtungen haben daran interdisziplinär zusammengearbeitet.

Diesen Weg weiterzugehen, viel mehr Daten einfließen zu lassen, kann bedeuten, auf neue Gesetzmäßigkeiten zu stoßen. Die dürften es wiederum ermöglichen, alle Prozesse rund um ein neues Produkt vorherzusagen, von der fliegerischen Performance über die Wartungsintervalle für die Triebwerke bis hin zu Instandhaltungszyklen, verbunden mit einer intelligenten Ersatzteilversorgung.

Das DLR schafft die Grundlagen dafür – mit drei neuen Instituten. In Dresden werden die softwarebasierten Werkzeuge entwickelt, in Hamburg erfolgt die Prozessanalyse für Wartungs- und Instandhaltungsprozesse und in Augsburg betrachten wir den Antrieb der Zukunft.

All das soll uns, in Kooperation mit der Luftfahrtindustrie, in die Lage versetzen, riesige Datenmengen zusammenzuführen, sie zu verknüpfen, zu interpretieren und die richtigen Schlussfolgerungen zu ziehen.

Am Ende steht das virtuelle Produkt und die Zukunft des Luftverkehrs – unsere Mobilität von morgen.



Professor Rolf Henke ist im Vorstand des DLR für den Bereich Luftfahrt zuständig

FÜNF JAHRE HALO

Forschung zu Klimagasen, Wolkenbildung und für Wetterprognosen

Seit fast fünf Jahren ist das deutsche Ausnahme-Forschungsflugzeug HALO (High Altitude and Long Range Research Aircraft) weltweit für die Umwelt- und Klimaforschung unterwegs. Jüngst zog ein Symposium zu den bisherigen HALO-Aktivitäten Bilanz: Auf 18 wissenschaftlichen Missionen rund um den Globus konnten die Forscher die Atmosphärenchemie untersuchen, Wolken und Niederschlagsbildung vermessen sowie die Dynamik und Transportprozesse der Atmosphäre studieren.

Beispielhaft im Bereich Atmosphärenchemie ist die Mission POLSTRACC (The Polar Stratosphere in a Changing Climate). In ihr wurde während des Winters 2016 untersucht, wie sich die Spurengase Ozon und Wasserdampf in der Arktis auf das bodennahe Klima auswirken. Im Bereich Wolkenforschung war HALO im Herbst 2014 auf Flügen über dem brasilianischen Regenwald unterwegs. Bei der Mission ACRIDICON (Aerosol, Cloud, Precipitation, and Radiation Interactions and Dynamics of Convective Cloud Systems) erkundeten die Forscher, wie sich der Ruß aus Brandrodungen in den Tropen auf die Wolkenbildung und Niederschlagsintensität auswirkt. Die Mission ML-CIRRU (Mid-Latitude Cirrus) hatte zuvor im Frühjahr 2014 den Blick auf die hohen Eiskolken (Zirren) in acht bis 14 Kilometer Höhe sowie deren Auswirkung auf das Klima gelenkt. Bei der Mission NAWDEX (North Atlantic Waveguide and Downstream impact Experiment) im Herbst 2016 flog HALO im Rahmen einer internationalen Messkampagne mit Partnern aus den USA, Großbritannien und der Schweiz über dem Nordatlantik, um die Atmosphärendynamik und Transportprozesse zu vermessen. Mit Hilfe der umfangreichen Daten sollen zukünftig Wetterprognosen verfeinert sowie Extremwetterereignisse besser verstanden und vorhergesagt werden.

Das Forschungsflugzeug HALO ist eine Gemeinschaftsinitiative deutscher Umwelt- und Klimaforschungseinrichtungen. Das DLR ist Eigner und Betreiber des Flugzeugs.

s.DLR.de/37z4



Dr. Gisela Helbig (links), Ministerialrätin im Bundesministerium für Bildung und Forschung, und die DLR-Vorstandsvorsitzende Professor Dr. Pascale Ehrenfreund informieren sich gemeinsam bei DLR-Forschungspilot Stefan Grillenbeck über die Technik im Langstreckenflugzeug HALO

SUPER-RECHNER IN GÖTTINGEN

MARVIN_NG bringt die Simulation dem realen Flugverhalten näher

Einen Super-Rechner für die Flugzeugforschung nahm das DLR an seinem Standort Göttingen in Betrieb. Mit der Investition in Höhe von drei Millionen Euro stärkt das DLR seine Rolle als eine führende europäische Einrichtung auf dem Gebiet der aeroelastischen Simulation und geht einen weiteren Schritt in der Digitalisierung der Luftfahrtforschung.

Für die Entwicklung künftiger Flugzeuge ist eine Simulation der aerodynamischen Flugeigenschaften nötig. Dies ist sehr rechenintensiv, da besonders die Wechselwirkungen von bewegten Objekten wie Flügeln mit der umströmenden Luft äußerst komplex sind. Mit dem Hochleistungsrechensystem MARVIN_NG wird die Rechenleistung gegenüber dem bisherigen System vervierfacht. Die Leistung beträgt 239 Tera-Flops, das ist 1.500 Mal so schnell wie ein heute üblicher PC. Damit wollen die Wissenschaftler in der Computersimulation der Wirklichkeit des fliegenden Flugzeugs noch näher kommen.

Der neue Super-Computer ist ein wichtiges Werkzeug, um Phänomene wie das Flattern bei Flugzeugen, Hubschraubern, Turbomaschinen und Windkraftanlagen zu erforschen. Neben seiner immensen Rechenleistung verfügt das neue Rechen-Cluster über eine hochmoderne Warmwasserkühlung. Damit setzt es auch energetisch gesehen einen neuen Standard.

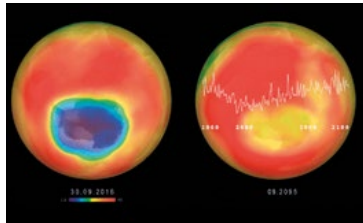
s.DLR.de/37v0



Das neue Rechner-System MARVIN_NG im DLR Göttingen arbeitet 1.500 Mal schneller als ein üblicher Personal Computer

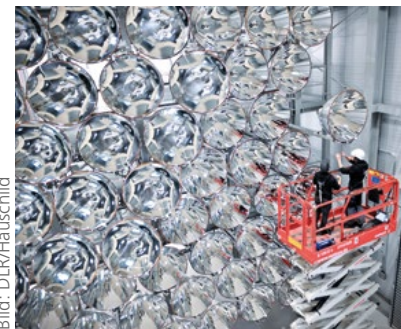
ZWEI PETABYTE KLIMADATEN

Die DLR-Atmosphärenforscher haben mehr als zwei Petabyte Daten für die Klimaforschung gewonnen. Mit Hilfe des Simulationssystems EMAC (ECHAM/MESSy Atmospheric Chemistry) wurde die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre von 1950 bis 2100 nachvollzogen und prognostiziert. Die Modelldaten geben unter anderem Aufschluss darüber, welchen Einfluss einzelne atmosphärische Veränderungen auf den Klimawandel haben. Das verwendete Klima-Chemie-Modell erlaubt es, die Zusammensetzung der Atmosphäre detailliert zu beschreiben. Darüber hinaus wurde das modular aufgebaute EMAC mit einem Ozeanmodell gekoppelt, sodass auch der Einfluss der Weltmeere berücksichtigt ist. Die Daten werden in die Berichte des Weltklimarats (IPCC) wie auch der World Meteorological Organization (WMO) zur Entwicklung der Ozonschicht einfließen.



SYNLIGHT-PRÄSENTATION IN HANNOVER

Kohlendioxid-neutrale Brennstoffe sind ein Schlüssel zu einer klimafreundlichen Energieversorgung. Auf der Hannover Messe Industrie Ende April in Hannover stellte das DLR vor, wie solche Energieträger in Zukunft mit Sonnenenergie hergestellt werden können. Großes Interesse fand „Synlight“, die im März in Jülich in Betrieb gegangene größte künstliche Sonne der Welt. Mit der Forschungsanlage kann unabhängig vom Wetter unter reproduzierbaren Bedingungen experimentiert werden, um solare Treibstoffe und Bauteile von Solarkraftwerken zu entwickeln. Eine Klimaanlage



für Elektrofahrzeuge und das Brennstoffzellenflugzeug HY4 zeigten zudem, wie erneuerbare Energien der Mobilität zu Gute kommen. Und eine moderne Gasturbine mit geringen Schadstoffemissionen veranschaulichte den Weg zur dezentralen Energieversorgung.

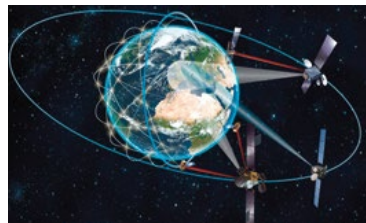
SCHWERELOS MIT MAXUS-9

Zum zehnten Mal und sieben Jahre nach dem letzten Start einer MAXUS-Rakete hob am 7. April 2017 die neunte dieses Forschungsraketentyps der Europäischen Weltraumorganisation ESA von der nordschwedischen Startanlage Esrange ab. Mit Erreichen der knapp zwölfminütigen Schwerelosigkeitsphase fanden im Inneren der Forschungsrakete fünf Experimente statt, davon aus dem DLR zwei materialphysikalische und ein biologisches. Untersucht wurden Phänomene an Metallschmelzen in der Schwerelosigkeit und die Erstarrung von Titan-Aluminiden. Um die biomolekulare Reizverarbeitung ging es in dem vom DLR Raumfahrtmanagement unterstützten Projekt der Universität Erlangen. Sie schickte den beweglichen Einzeller *Euglena gracilis* in die Schwerelosigkeit, um dem Zusammenspiel von Licht und Schwerkraft auf die Spur zu kommen.



RAUMFAHRT UND DIGITALISIERUNG

Satelliten gewährleisten immer schnelleres Internet mit extrem hohen Datenraten. Kommunikationstechnik steuert Industrie 4.0. Die Mobilität der Zukunft basiert auf Navigationsdaten. Auch Meteorologen, Behörden und Katastrophenschützer sind auf Wetter-, Klima- und Erdbeobachtungsdaten aus dem All angewiesen. Wie diese Daten in Zukunft sicher rund um den Globus zu transportieren sind, diskutierten Ende März in Bonn 300 Teilnehmer der 5. Nationalen Konferenz Satellitenkommunikation in Deutschland. Dabei wurde die Datenübertragung via Laser statt mit Funkwellen erörtert. Angesichts bald erreichter Bandbreitengrenzen ist die Übertragung mit Lichtwellen eine verheißungsvolle Alternative. Deutschland ist hier weltweit führend. In Kürze werden bereits elf Laser Communication Terminals (LCT) im Orbit sein.



ERDBEOBACHTUNG MIT COPERNICUS

Umweltschutz, Landwirtschaft, Stadtplanung: Dies sind nur drei der Bereiche, die von den Erdbeobachtungsdaten der Sentinel-Satelliten des europäischen Copernicus-Programms profitieren werden. Fünf dieser Satelliten liefern bereits Informationen über Zustand und Beschaffenheit der Erdoberfläche: Mit dem Start von Sentinel-2B am 7. März 2017 ist das Copernicus-System nun vollständig. Die Anwendungsmöglichkeiten waren Thema des Nationalen Forums für Fernerkundung und Copernicus 2017 – „Copernicus@work“. Das DLR Raumfahrtmanagement organisierte die Konferenz im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Rund 450 Nutzer und Anbieter von Erdbeobachtungsdiensten aus Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung nahmen an der Veranstaltung Mitte März 2017 in Berlin teil.



WENIGER RUSS DURCH BIOTREIBSTOFF

Eine Beimischung von 50 Prozent Biotreibstoff reduziert im Reiseflug die Rußpartikelemissionen eines Flugzeugtriebwerks um 50 bis 70 Prozent gegenüber der Verbrennung von reinem Kerosin. Dies zeigt eine im Fachjournal NATURE erschienene Studie, die auf Forschungsflügen der NASA, des DLR und des kanadischen National Research Council (NRC) beruht. Dafür war das DLR-Forschungsflugzeug Falcon in den USA im Abgasstrahl einer DC-8 der NASA geflogen. Die CFM56-Triebwerke der DC-8 wurden abwechselnd mit regulärem Jet-A1-Flugtreibstoff und einer 1:1-Mischung aus Jet-A1 und dem Biotreibstoff HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) auf Leindotteröl-Basis betrieben. Die Messungen zeigten, dass Biotreibstoffe nicht nur die Emissionen über Flughäfen mindern, sondern auch den Reiseflug klimafreundlicher machen können.



UNBEMANNT ZUR RETTUNG

Ein System, das bei Rettungseinsätzen Informationen zur Lage in Schadensgebieten liefert, ist Ende März 2017 in Kooperation des DLR mit I.S.A.R. Germany (International Search-and-Rescue) und Germandrones erprobt worden. Die Aufklärungsflüge mit einem unbemannten Luftfahrzeug zeigten, welche Potenziale diese Technologie für Rettungskräfte birgt und wie sie für den realen Einsatz noch zu optimieren ist. Bei dem Test in Weeze (Landkreis Kleve, Nordrhein-Westfalen) kam eine Version des MACS-Luftbildkamerateasystems (Modular Airborne Camera System) aus dem DLR-Institut für Optische Sensorsysteme zum Einsatz. Dieses kann die aktuelle Schadenslage als interaktive Karte abbilden. Dazu werden die Luftbilddaufnahmen direkt auf ein weltweit verfügbares Oberflächenmodell der Erde projiziert und in eine digitale Karte eingebündelt.

DOPPELJUBILÄUM MIR'92 UND MIR'97

Ein weltraumhistorisches Doppeljubiläum war Anlass für eine Veranstaltung des DLR Raumfahrtmanagements in Bonn. Am 19. März 1992 war Klaus-Dietrich Flade in die russische Raumstation MIR eingeschwebt. Flade blieb im Rahmen der MIR'92-Mission sechs Tage lang auf dem Außenposten der Menschheit im All. Reinhold Ewald war bei der MIR'92 Flades Ersatzmann, weilte aber fünf Jahre später, vom 10. Februar bis zum 2. März 1997, mit der Mission MIR'97 auf der russischen Raumstation. Von den 14 Experimenten der MIR'92-Mission waren fünf vom DLR, bei der MIR'97 waren es zwölf der insgesamt 36 Experimente. Thematisch reichten sie von Biomedizin über Strahlenschutz bis zu Materialwissenschaft. Die Veranstaltung würdigte beide Missionen. (Ein Dossier zu diesem Raumfahrtjubiläum war im DLR-Magazin 153 vom April 2017 zu lesen.)



REGIONALMELDUNGEN

LAMPOLDSHAUSEN: Die Zukunft des europäischen Raumtransports diskutierten 100 Experten aus Raumfahrtagenturen, Industrie und Wissenschaft auf den 5. Industrial Days Mitte April 2017 im DLR Lampoldshausen. Der Kerngedanke: Satelliten ressourcenschonend und auf die jeweilige Fracht abgestimmt ins All bringen. Für zukünftige Antriebe verspricht die Treibstoffkombination Methan und Flüssigsauerstoff Erfolg.

KÖLN: Eine Delegation des Netzwerks der europäischen Regionen, die Raumfahrttechnologie nutzen (NEREUS), besuchte am 10. März 2017 das DLR Köln. Von der Wettervorhersage bis zum Verkehrsleitsystem – die Rolle solcher Technologien im Alltag wird immer bedeutsamer. Eine Aufgabe des Netzwerks ist es, regionale Bedürfnisse zu identifizieren.

BERLIN: Aktuelle DLR-Projekte zu Automatisierung, Elektromobilität und Klimaschutz im Verkehr wurden dem Bundestagsabgeordneten Andreas Rimkus vorgestellt. Als stellvertretenden verkehrspolitischen Sprecher der SPD-Bundestagsfraktion, Berichterstatter für Telematik im Verkehrsausschuss und Vorstandsmitglied der Parlamentsgruppe Elektromobilität interessierten ihn aktuelle Forschungsprojekte dieses Themenkreises. Rimkus informierte sich aber auch über die Nachwuchsarbeit im DLR.

NEUSTRELITZ: Das DLR_School_Lab_Neustrelitz führte am 3. März 2017 den Themenabend „Die Tiefen des Weltalls“ für Schülerinnen und Schüler ab der 9. Klasse durch. Sie verfolgten die Reise der europäischen Weltraumsonde Rosetta zum Kometen „Tschuri“, erkundeten das jüngst entdeckte vierzig Lichtjahre entfernte Planetensystem Trappist-1 und kamen schließlich zur laufenden ExoMars-Mission, die Antwort auf die Frage nach Leben auf dem Mars geben soll.

KÖLN: Zu einem Erlebnistag Energie kamen 45 Schülerinnen und Schüler am 24. März 2017 ins DLR nach Köln. Ihre Projektarbeiten hatten im DLR-Schulwettbewerb „Zeigt uns Eure Power!“ gewonnen. Nun erhielten sie Einblicke in die Solar- und Verbrennungsforschung sowie in Arbeiten zur Aerodynamik von Windkraftanlagen.

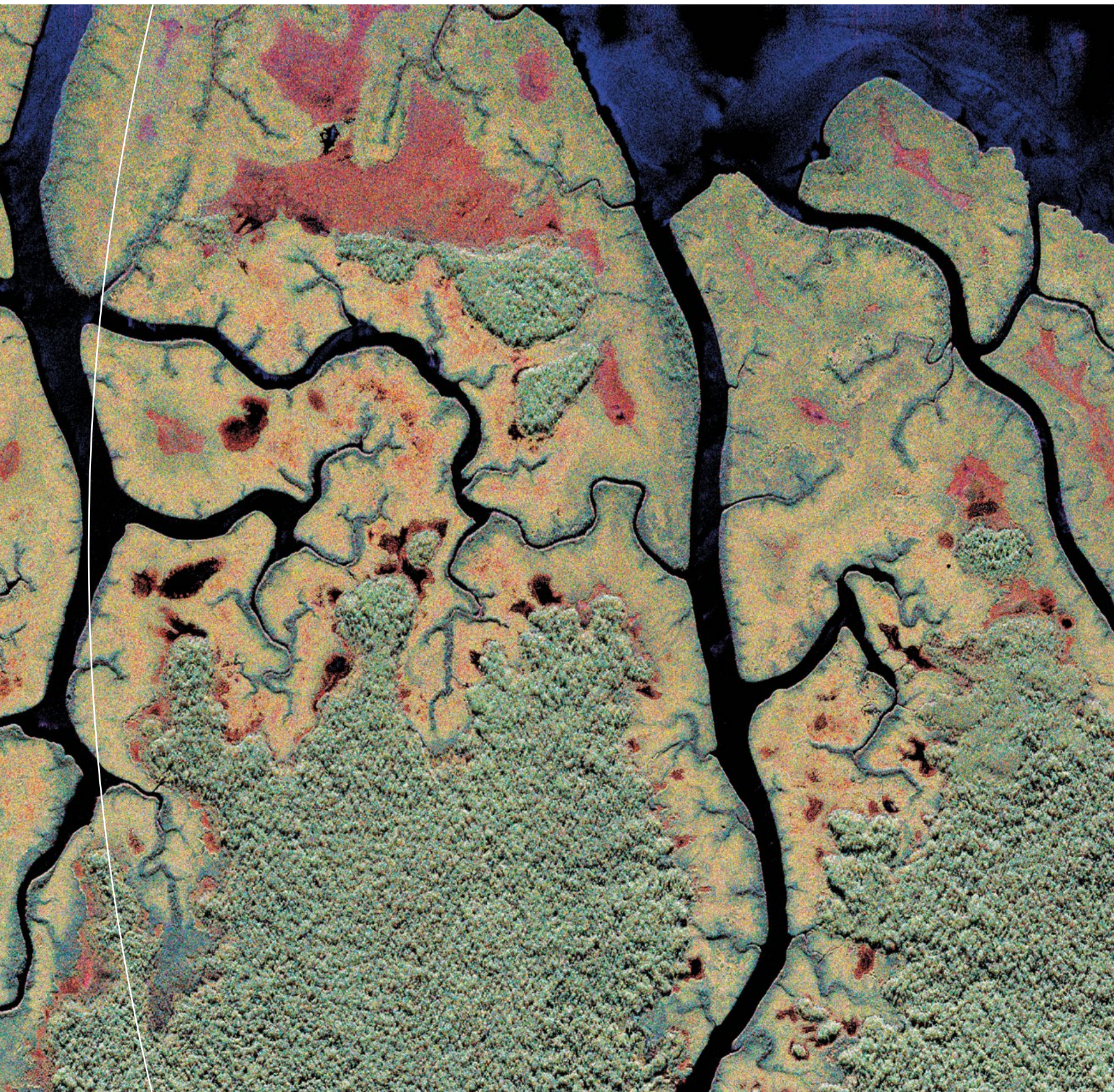
BREMERHAVEN, DRESDEN, JENA, OLDENBURG: Das DLR baut vier neue Standorte auf. Schwerpunktmäßig werden sie sich dem Schutz maritimer Infrastrukturen, der Softwareforschung und Simulation sowie den Themen Big Data und Energie der Zukunft widmen.

DLR.DE: MELDUNGEN AUF DER DLR-WEBSITE UND DER DLR-NEWSLETTER

Alle Meldungen können in voller Länge und mit Bildern oder auch Videos online im News-Archiv eingesehen werden. Möchten Sie die Meldungen per E-Mail zugeschickt bekommen, abonnieren Sie einfach den Newsletter.

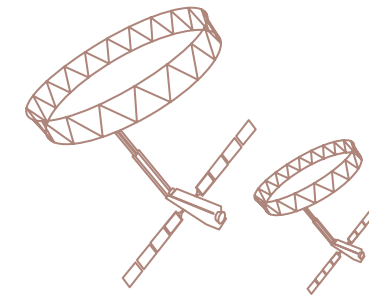
DLR.de/meldungen

DLR.de/newsletter



Mangrovenwälder in der Mündung zum Atlantischen Ozean südlich von Libreville, der Hauptstadt Gabuns. Das Radarbild im L-Band entstand 2016 im Rahmen einer groß angelegten Flugzeugkampagne im Auftrag der ESA in Kooperation mit den Raumfahrtbehörden Frankreichs, der USA und Gabuns. Ziel ist es, aus tomografischen Radaraufnahmen die Waldbiomasse und die dreidimensionale Waldstruktur zu ermitteln.

AM PULS DER ERDE



Mehr Durchblick in der Klimaforschung mit der Satellitenmission Tandem-L

Von Elisabeth Schreier

Das System Erde ist vielseitig, komplex und immer in Bewegung. Ständig verändert sich unser Heimatplanet: Der Boden hebt und senkt sich, Gletscher kalben ins Meer, Feuer zerstören Teile eines Waldes. „Es gibt ja nicht nur die natürlichen Umweltveränderungen, sondern auch die von Menschen gemachten: Von Abholzungen über bauliche Aktivitäten bis hin zum Einfluss, den wir auf das Klima nehmen“, erzählt Professor Dr. Alberto Moreira, Direktor des DLR-Instituts für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme und Hauptwissenschaftler der Helmholtz-Allianz Remote Sensing and Earth System Dynamics, auf Deutsch: Fernerkundung und Erdsystemdynamik. Diese Veränderungen zu begreifen, ist ein essenzieller Teil der Klimaforschung und wichtig, um eine nachhaltige, positive Entwicklung langfristig möglich zu machen. Bereits seit den Neunzigerjahren arbeitet Professor Moreira an Radartechnologien, die es erlauben, die Dynamik des Planeten global zu erfassen und darzustellen. Mit der Satellitenmission Tandem-L könnte die Wissenschaft diesem Ziel einen großen Schritt näher kommen.

Die Erdbeobachtung mit Radarsatelliten bietet einzigartige Möglichkeiten, Einblicke in die dynamischen Prozesse auf unserem Planeten zu erhalten. Unabhängig von Wetter und Tageszeit liefern Radarsatelliten zuverlässig Daten und erlauben den Einsatz hochpräziser interferometrischer und sogar tomografischer Messtechniken. Ein aktuelles Beispiel sind die Zwillingssatelliten TerraSAR-X und TanDEM-X, die seit 2010 im engen Formationsflug mit Abständen von wenigen hundert Metern die Erde interferometrisch vermessen. Vom daraus entstandenen, hochgenauen dreidimensionalen Abbild unserer Erde profitieren zahlreiche Forschungsbereiche der Klima- und Umweltforschung. Obwohl bereits über eintausend Wissenschaftler weltweit mit dem Höhenmodell der Erde arbeiten, wurde schnell klar, dass TanDEM-X – im wahrsten Sinne des Wortes – nur an der Oberfläche von dem kratzt, was eine solche Satellitenmission leisten könnte.

Zahlreiche für die Umweltforschung wichtige Prozesse finden innerhalb der dreidimensionalen Struktur von Waldökosystemen statt. Zudem spielen sich viele der Veränderungen binnen einer relativ kurzen Zeitspanne ab, weshalb eine kontinuierliche Erfassung des Zustands notwendig wäre. Man bräuchte folglich eine Lösung, die nicht nur tiefer in die Vegetationsschicht eindringen kann, sondern auch eine regelmäßige Aufnahme in kurzen Zeitintervallen ermöglicht. „Anfang der Neunzigerjahre haben wir erste Experimente mit unserem flugzeuggetragenen Radarsystem im X-Band und L-Band gemacht und uns wurde klar, wie genau wir die Topografie der Erde mit Radar aufnehmen könnten. So ist dann die Idee zu TerraSAR-X und TanDEM-X entstanden. Als TanDEM-X im Jahr 2006 offiziell genehmigt wurde, kam im Institut gleich die Frage, wie die Entwicklung weitergehen kann. Meine Antwort dazu war schon damals sehr deutlich: Wir machen dann ein Projekt Tandem-L“, erinnert sich Professor Moreira.



Bild: CCO Public Domain

Hydrosphäre

WETTERPROGNOSE UND WASSERMANAGEMENT

Dr. Carsten Montzka,
Forschungszentrum Jülich

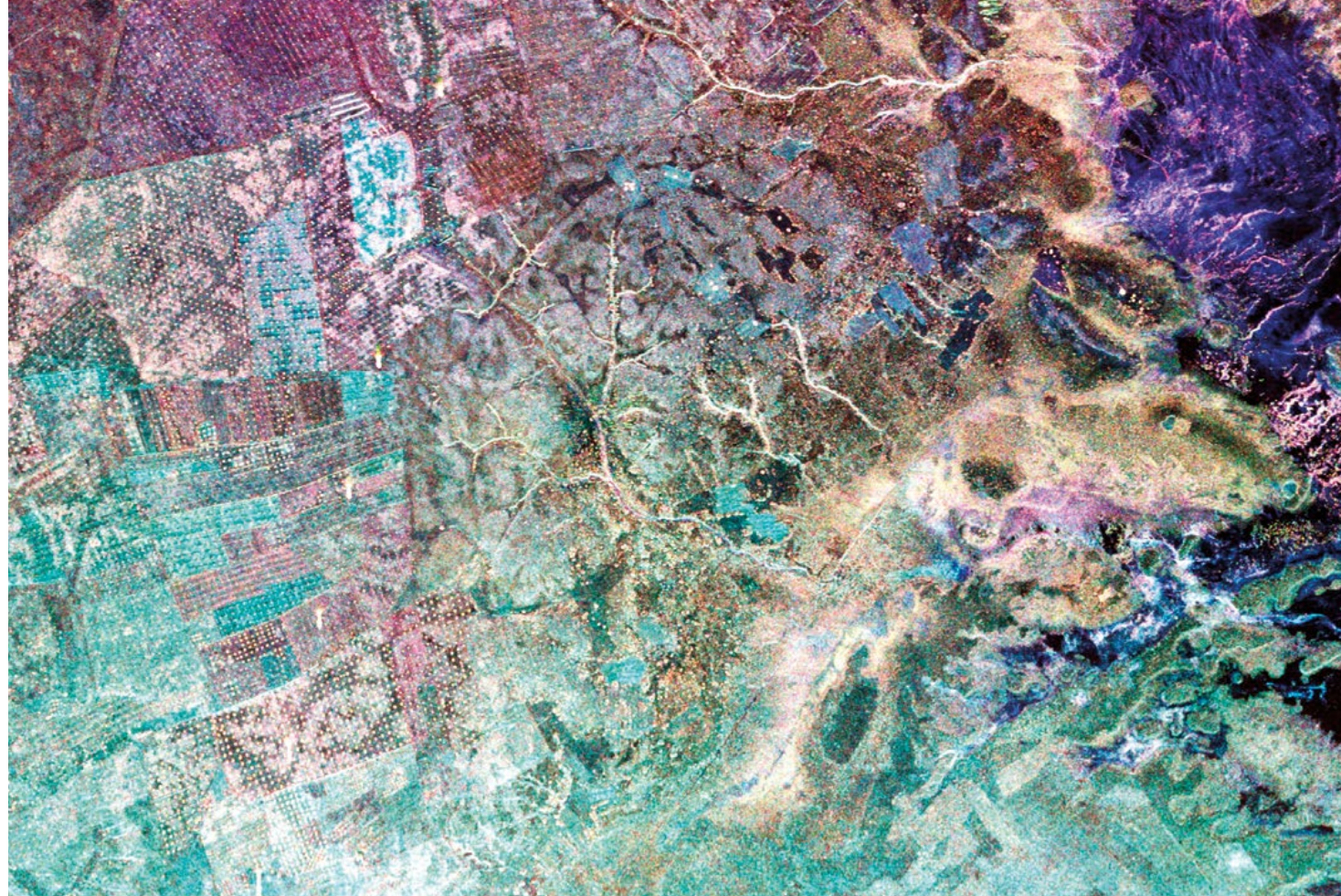
An der Erdoberfläche spielen sich Austauschprozesse von Wasser und Energie ab. Diese steuern Massenbewegungen sowohl in der unteren Atmosphäre als auch innerhalb des Bodens. Tandem-L wird solche Prozesse direkt und indirekt über die Veränderung der Bodenfeuchte beobachten können, und dies in bisher nicht erreichter räumlicher Auflösung und Genauigkeit. Tandem-L wurde als Monitoring-Mission konzipiert. Durch die hohe zeitliche Wiederholrate im Zusammenspiel mit einer besseren Auflösung und Präzision erschließen sich uns neue Anwendungsfelder für die Satellitenfernerkundung.

Eine ganze Reihe wichtiger Austauschprozesse an der Bodenoberfläche wird in aktuellen Wettervorhersagemodellen nicht oder kaum berücksichtigt. Die Entwicklung dieser Modelle hin zur regionalen beziehungsweise sogar lokalen Skala weist derzeit noch eine Datenlücke auf, die mit Tandem-L geschlossen werden kann. Die Integration von Tandem-L-Informationen über die Bodenfeuchte in Wettervorhersagemodelle wird die Wetterprognose deutlich verbessern. Auch das regionale Wasserressourcen-Management kann von Tandem-L profitieren. So ist das flächendeckende Monitoring der Bodenfeuchte wichtig für die Bewirtschaftung von Talsperren oder für eine optimale Bewässerung in der Landwirtschaft.

Doch Tandem-L liefert nicht nur für die Hydrologie der Landoberfläche wichtige Informationen, sondern auch über die Meeresoberfläche. Mit Hilfe der SAR Along Track Interferometry ist es sogar möglich, die Geschwindigkeit von oberflächennahen Meeresströmungen zu bestimmen. Insgesamt sind die Möglichkeiten von Tandem-L sehr vielseitig und bieten der Wissenschaft großes Potenzial.



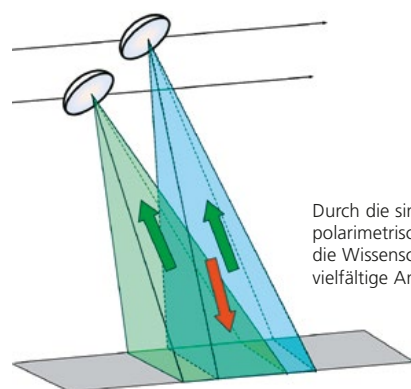
Bild: Forschungszentrum Jülich



Olivenplantagen südwestlich von Ben Garne, Tunesien. Das Bild (etwa 2.000 mal 1.500 Meter) entstand zur Unterstützung des ESA-Projekts Aquifer, das im Rahmen der TIGER-Initiative der UN der Untersuchung und dem Management von Grundwasserreserven mit Hilfe von Fernerkundung in Afrika dient („Earth Observation for Integrated Water Resources Management in Africa“). Optische Bilder dieser Gegend sind von der Farbe des Sandes (gelblich braune Farbtöne) dominiert. Die Radaraufnahme zeigt sich jedoch ungewohnt farbenfreudig. Die Farben entstehen in einer Kombination dreier Radaraufnahmen (RGB), die jeweils Radarrückstreuungen verschieden polarisierter Langwellen (23 Zentimeter) in Grautönen darstellen. Deutlich zu erkennen sind die einzelnen Olivenbäume, die in regelmäßigen Strukturen in Plantagen angeordnet sind. Da Langwellen in trockenen, sandigen Boden eindringen können, sieht man aber nicht nur Reflexionen der Oberfläche, sondern auch Strukturen, die unter der Oberfläche verborgen sind. Fraktale Gebilde können also auch auf unterirdische Wasseradern – fleckartige Gebilde gar auf Wasserdepots hindeuten.

Von der Vegetation bis zur Plattentektonik: großes Potenzial der innovativen Technik

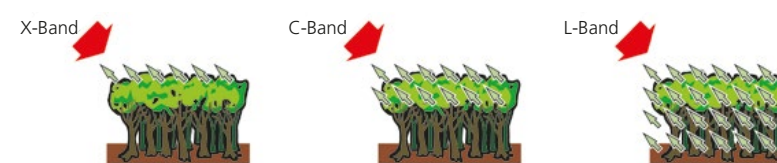
Ähnlich wie bei TanDEM-X sind für die Mission Tandem-L zwei baugleiche Satelliten geplant, die in einem helixförmigen Formationsflug die Erde umkreisen und die Oberfläche Streifen für Streifen mit Radar abtasten. Radarsysteme werden üblicherweise in unterschiedlichen Frequenzen zwischen drei Zentimetern (X-Band) und 25 Zentimetern (L-Band) betrieben: Die bei TanDEM-X genutzten X-Band-Wellen sind kurz und werden bereits an der Oberfläche von Baumkronen zurückgeworfen. Für Tandem-L werden die längeren L-Band-Wellen eingesetzt, die deutlich tiefer in Vegetation, Eis oder Boden eindringen können. So ist es möglich, die gesamte Biomasse, von den Baumkronen bis zum Waldboden, zu vermessen. Dabei kommen zwei unterschiedliche Betriebsarten zum Einsatz. Erstens die 3D-Messung, die auf polarimetrischer SAR-Interferometrie (Pol-InSAR) basiert. Mit ihr lassen sich durch die Kombination von der Überlagerung der Wellen (Interferometrie) und der vertikalen und horizontalen Ausrichtung ihrer Schwingung (Polarisation) anhand des Wellenechos eindeutige Aussagen über die Vegetation sowie deren Dichte und Struktur machen. Zweitens steht mit dem Deformationsmodus die Möglichkeit offen, die topografischen Veränderungen – tektonische Verschiebungen, vulkanische Aktivitäten oder Hangrutschungen – zu messen. „Die zwei Modi können, je nach Bedarf, abwechselnd betrieben werden. Für den Betrieb des Satelliten wird es einen Beobachtungsplan geben, der sich an der



Durch die simultane Datenakquisition mit zwei vollpolarimetrischen Radarsatelliten im L-Band erhalten die Wissenschaftler einzigartige Datenprodukte für vielfältige Anwendungen

Nachfrage der beteiligten Wissenschaftspartner der Helmholtz-Allianz orientiert“, erklärt Professor Moreira.

Ein besonderes Novum an der Bauart der Satelliten sind die kreisrunden entfaltbaren Reflektorantennen mit 15 Meter Durchmesser. Dank der großen Reflektorfläche können bis zu 350 Kilometer breite Streifen abgebildet werden. Um trotz der großen Streifenbreite eine hohe Auflösung zu erzielen, wendet Tandem-L das im DLR entwickelte Konzept des Digital Beamforming an. Diese Technologie macht sich zunutze, dass die von der Erdoberfläche reflektierten Signale zeitlich nacheinander am Satelliten empfangen werden. Im sogenannten digitalen Feedarray werden einzelne Antennenelemente so kombiniert, dass ein stark gebündeltes Antennendiagramm genau diesen zeitlich versetzten Signalen folgt. Trotz seiner 350 Kilometer breiten Abdeckung kann Tandem-L dadurch eine Auflösung von bis zu fünf Metern gewährleisten. Während TanDEM-X für eine globale Erfassung der Erdoberfläche circa ein Jahr braucht, wird Tandem-L dies bis zu zweimal pro Woche schaffen. Veränderungen auf der Erde, die sich innerhalb kürzester Zeit abspielen, können so erfasst werden.



Vergleich der Eindringtiefe von X-, C- und L-Band mit drei, fünf und 24 Zentimeter Wellenlänge bei Vegetation: Während Radarwellen im X-Band nur von der oberen Baumkrone reflektiert werden, dringt das L-Band bis zum Boden. Nur L-Band-Radarsysteme können Signale aus allen Bereichen der Vegetation empfangen.



Bild: CC-by-sa Christian Ziegler/Wikipedia.de

Biosphäre

ÜBER DIE WÄLDER BESSER INFORMIERT

Professor Dr. Andreas Huth,
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig

Die Wälder der Erde speichern riesige Mengen Kohlenstoff. Sie spielen daher eine wesentliche Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf und sind wichtig für das weltweite Klima. Doch in den letzten zwei Jahrhunderten hat sich die Waldfläche der Erde infolge andersartiger Landnutzung halbiert! Durch die heterogene und vielfältige Struktur der Wälder ist es zurzeit nur eingeschränkt möglich, ihren Zustand zu erfassen. Der Weltklimarat IPCC betont den Bedarf an Programmen, mit denen die Waldbiomasse und deren Änderungen weltweit vermessen werden können. Doch die Grundlage nationaler Wald-Inventuren sind Schätzungen auf Basis lokaler Inventurflächen. Gestörte Waldflächen lassen sich somit nicht unbedingt erfassen. Die nächste Generation hochauflösender Radarsatelliten, wie die der Mission Tandem-L, kann diese Wissenslücke schließen. Ein wichtiges Missionsziel ist es, Waldbiomassen und deren zeitliche Veränderungen global zu bestimmen. Tandem-L ist dazu in der Lage. Anhand von Waldhöhe und Waldstruktur lässt sich die Biomasse viel genauer abschätzen. Wichtige Strukturmerkmale sind hierbei Baumdichte und vertikale Heterogenität.

Dabei zeichnet sich das L-Band im Vergleich zu X- und C-Band durch eine hohe Eindringtiefe bei Vegetation aus. Diese neue Technik ermöglicht es, selbst bei dichter Vegetation bis zum Boden durchzudringen. Hieraus lassen sich neben Informationen zur Waldstruktur auch Erkenntnisse über die Bodenfeuchte und zum Störungsgrad des Waldes ableiten. Indem die Forscher Informationen aus der Radarfernerkundung mit Daten aus der Waldmodellierung verknüpfen, können – auch dank der hohen räumlichen Auflösung – bessere Aussagen zu wichtigen Eigenschaften von Wäldern getroffen werden.

Auf einer neu etablierten Super-Testsite in Froschham (Traunstein, Bayern) werden solche Ansätze, also die Kombination von Wald-Inventuren mit Radarmessungen und Waldmodellierung, derzeit erprobt. In dem 25 Hektar großen Waldgebiet wurden 16.000 Bäume vermessen und Befliegungen sowohl mit Radar als auch mit Lidar durchgeführt. Die erhobenen Daten werden frei verfügbar sein und der Waldplot wird dem internationalen Forest-Geo-Netzwerk angehören. Erkenntnisse aus dieser und weiteren Kampagnen, beispielsweise AfriSAR in Gabun, dienen einem besseren Verständnis über den Zusammenhang von Waldstruktur, Waldbiomasse und Kohlenstoffflüssen.



Bild: UFZ



Bild: CCO Public Domain

Geosphäre

DIE BEWEGUNGEN DER ERDE ERFASSEN

Dr. Mahdi Motagh,
Deutsches GeoForschungsZentrum

Tandem-L unterstreicht nicht nur die Innovationskraft und Führungsrolle der deutschen Raumfahrtstechnologie, sondern bietet uns einzigartige Möglichkeiten, präzise und verlässliche geodätische Messungen aus dem All vorzunehmen. Die Forschung erhält damit erstmals die Gelegenheit, auf globaler Ebene systematisch und über große Räume hinweg Verformungen zu messen, die geologischen Ursprungs oder vom Menschen verursacht sind – und das Ganze mit einer feinen Auflösung (bis zu einem Meter) und einer enorm verbesserten zeitlichen Kohärenz. Dies wird möglich dank der langen Wellenlänge des L-Bandes, die Tandem-L unempfindlich macht gegenüber Messfehlern aufgrund struktureller Änderungen und/oder massiver Deformationen.

Wöchentlich erhalten wir aktualisierte Messungen der Topografie bis hinunter in den Millimeterbereich. Wir können damit vielfältige geologische Prozesse akkurat nachverfolgen, seien es tektonische Bewegungen und Bruchzonenverformungen, magmatische Prozesse an Vulkanen, Massenverlagerungen oder Erosionsprozesse. Auch vom Menschen verursachte Vorgänge lassen sich dokumentieren, beispielsweise Deformationen aufgrund von Flüssigkeitseinspeisungen oder -entnahmen in und aus dem Untergrund. Und auch Aussagen beispielsweise zur Stabilität von Dämmen können wir treffen.

Im Gegensatz zu den gängigen Radarsystemen wird Tandem-L nicht nur eine Komponente des dreidimensionalen Deformationsfeldes messen, sondern durch eine Kombination unterschiedlicher Observationsgeometrien erlauben, 3D-Bewegungsvektoren zu rekonstruieren. Mehr noch: Im Akutfall – etwa bei einem Erdbeben oder einer Vulkaneruption – kann das betroffene Gebiet innerhalb von ein bis zwei Tagen unter Beobachtung genommen werden. Das macht Tandem-L zu einem völlig neuen Faktor bei der Bereitstellung von Daten in Kurzzeit aus dem All. Die Informationen aus zerstörten oder gefährdeten Gebieten werden die Forschung voranbringen und ebenso der Allgemeinheit dienen.



Bild: GFZ

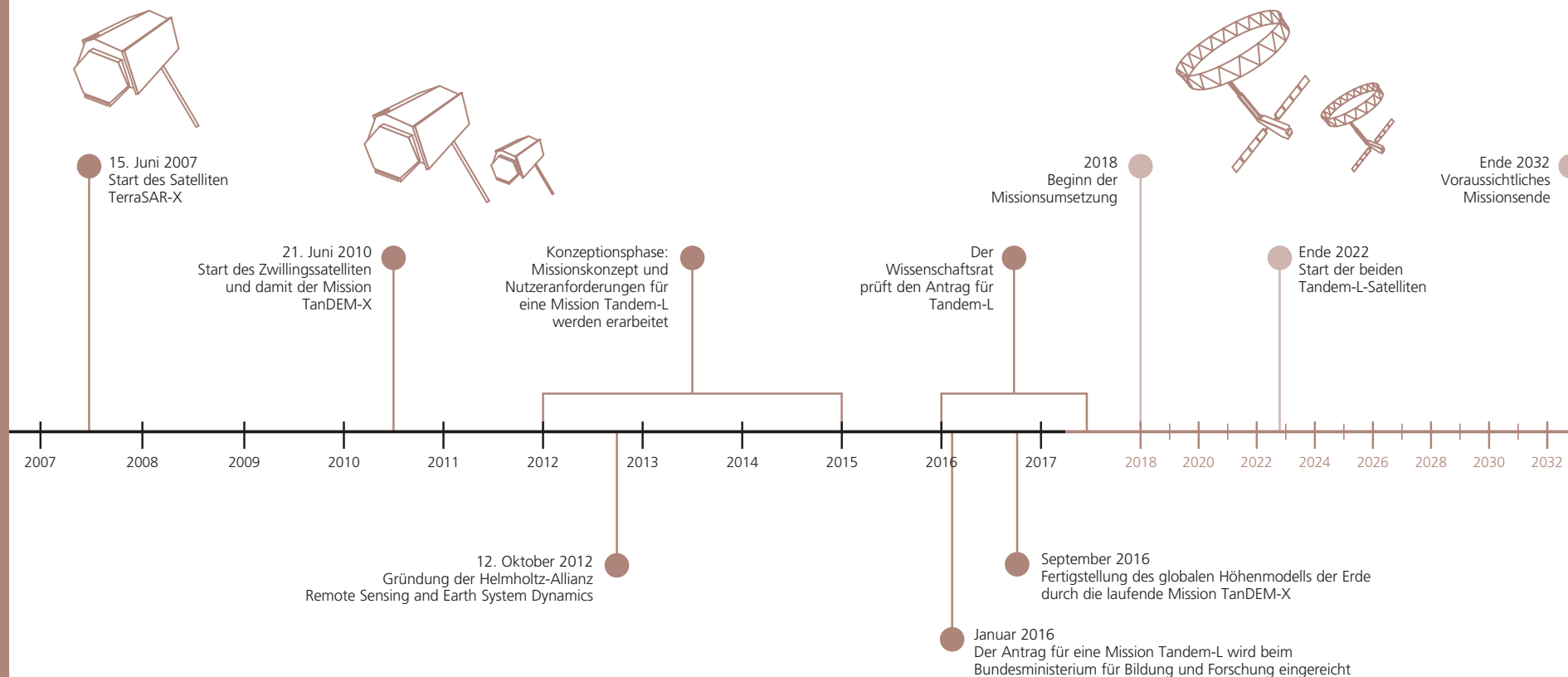
Detaillierte und globale Informationen für Wissenschaft und Politik

„Tandem-L hat einen anderen Fokus als vorhergehende Missionen. TanDEM-X zielt auf den kommerziellen und sicherheitstechnischen Bereich, während Tandem-L eine hochkarätige Wissenschaftsmision ist“, meint Professor Dr. Richard Bamler, Direktor des DLR-Instituts für Methodik der Fernerkundung, das die Methoden zur Prozessierung der gewaltigen Datenmengen entwickelt. „Tandem-L ist von vornherein auf die Bedürfnisse der Wissenschaftler abgestimmt und nicht nur auf die der Wirtschaft beschränkt. Natürlich sind die Daten aber auch für Unternehmen interessant.“

Als nach dem erfolgreichen Start von TanDEM-X die Planung für die L-Band-Mission anging, holte das DLR weitere Partner der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren mit an den Tisch. Nach ersten Konzeptionsideen 2011 wurde unter Federführung des DLR die Helmholtz-Allianz Remote Sensing and Earth System Dynamics gegründet. Inzwischen wirken rund 140 Wissenschaftler in der Allianz mit und treffen sich regelmäßig zum Informationsaustausch. In den Bereichen Geo-, Hydro-, Kryo- und Biosphäre wurden spezifische Themenbereiche festgelegt, die allein sieben der essenziellen Klimavariablen, wie Meereisbedeckung, Bodenfeuchte oder Waldbiomasse, abdecken. Die vom Global Climate Observing System (GCOS) definierten Klimavariablen geben Auskunft über unser System Erde und die Veränderungen des Klimas. „Wissenschaftler, die zum Beispiel die Daten für den IPCC-Report (Intergovernmental Panel on Climate Change, Weltklimarat, Anmerkung der Redaktion) liefern, können die Informationen von Tandem-L für ihre Arbeit nutzen“, erläutert Professor Bamler. „Ein anderes Beispiel ist die Vermessung von Biomasse. Diese ist sehr wichtig für das Klimaabkommen im Zusammenhang mit den weltweiten Kohlendioxid-Emissionen. Die Länder wollen natürlich wissen, wie viel Kohlenstoff durch ihre Ökosysteme gebunden werden kann. Dafür muss man nachweisen, wie viel Biomasse – beispielsweise in den Wäldern – vorhanden ist, die als Kohlenstoffsänke fungieren kann. Und dies bedarf einer regelmäßigen Kontrolle.“

Gespannte Erwartung im Jahr der Entscheidung

Für die Wissenschaftler um Professor Moreira wird 2017 sehr spannend. Bereits im Januar 2016 hat das Team Tandem-L als Vorschlag für eine Großforschungsinfrastruktur beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) eingereicht.



„Dort durchläuft das Projekt einen Begutachtungsprozess durch den Wissenschaftsrat. Neben der wissenschaftlichen Exzellenz wird auch die Wirtschaftlichkeit geprüft“, erklärt der Radarexperte. „Für Mitte 2017 erwarten wir dann das Ergebnis des Gutachtens. Wenn wir ein positives Votum bekommen, dann ist der Weg für die Realisierung von Tandem-L geebnet.“

Bei der Konzeption der neuen Radarmission profitiert das DLR von seinen Erfahrungen aus der seit sieben Jahren laufenden TanDEM-X-Mission. Das Herz der Mission wird im DLR-Standort Oberpfaffenhofen schlagen, an dem gut 100 Mitarbeiter aus vier Instituten – für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme, für Methodik der Fernerkundung, das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum und der Raumflugbetrieb – eng zusammenarbeiten und dabei die gesamte Systemkette der Mission beherrschen. Sowohl Professor Moreira als auch Professor Bamler betonen, dass dies die große Stärke des Projekts Tandem-L ist. Das kann weltweit keiner.

Bei positivem Votum Missionsstart Ende 2022

In dem Fall, dass Tandem-L „grünes Licht“ vom Wissenschaftsrat bekommt und die Mittel genehmigt werden, könnte die Rakete mit den beiden Satelliten, die für eine Missionsdauer von zehn Jahren ausgelegt sind, im Jahr 2022 starten. Die geowissenschaftlichen Informationen, die von der Mission geliefert werden, dürften auch mehrere Jahre nach Missionsende für viele wissenschaftliche Erkenntnisse sorgen. Dabei betont Professor Bamler: „Tandem-L ist bewusst eine Mission, die eine große Bandbreite an Fragestellungen bedienen will. Nicht immer wird sie allein die Lösung liefern, manchmal muss man ergänzende Informationen einbringen. Doch Tandem-L kommt fantastisch nahe an das Optimum heran, liefert also eine für sich stehende, aussagekräftige Information zur jeweiligen Fachfrage.“

In einem Zeitalter, in dem die Veränderungen unserer Welt so schnell voranschreiten und nicht nur die Wissenschaft, sondern auch die Politik auf verlässliche Informationen angewiesen ist, hat eine Mission speziell für die Klimaforschung große Bedeutung. „Die Vision, jederzeit zu wissen, was sich auf unserem Planeten verändert, treibt uns an“, sagt der für Tandem-L verantwortliche Wissenschaftler Alberto Moreira. „Wenn man eine Radarmission speziell für die Klimaforschung und Umweltbeobachtung entwerfen will, dann ist Tandem-L genau die Antwort, die wir brauchen.“



Bild: CCO Public Domain

Kryosphäre

WISSENSZUWACHS ÜBER EISSCHILDE

Professor Dr. Angelika Humbert,
Alfred-Wegener-Institut, Bremerhaven

Tandem-L wird uns erstmals die Möglichkeit geben, mittels SAR-Tomografie die Struktur der obersten hundert Meter der Eisschilde Grönlands und der Antarktis in hoher räumlicher Auflösung und in kompletter Abdeckung zu messen – ein gigantischer Schritt für Glaziologen! Schichten im Firn, die durch jahreszeitliche Verdichtung von Schnee entstehen, sind so endlich großflächig beobachtbar. Die Mission Tandem-L knüpft damit direkt an das Klimasignal an, wovon ich mir einen enormen Wissenszuwachs über die räumliche Veränderung der Eisschilde verspreche.



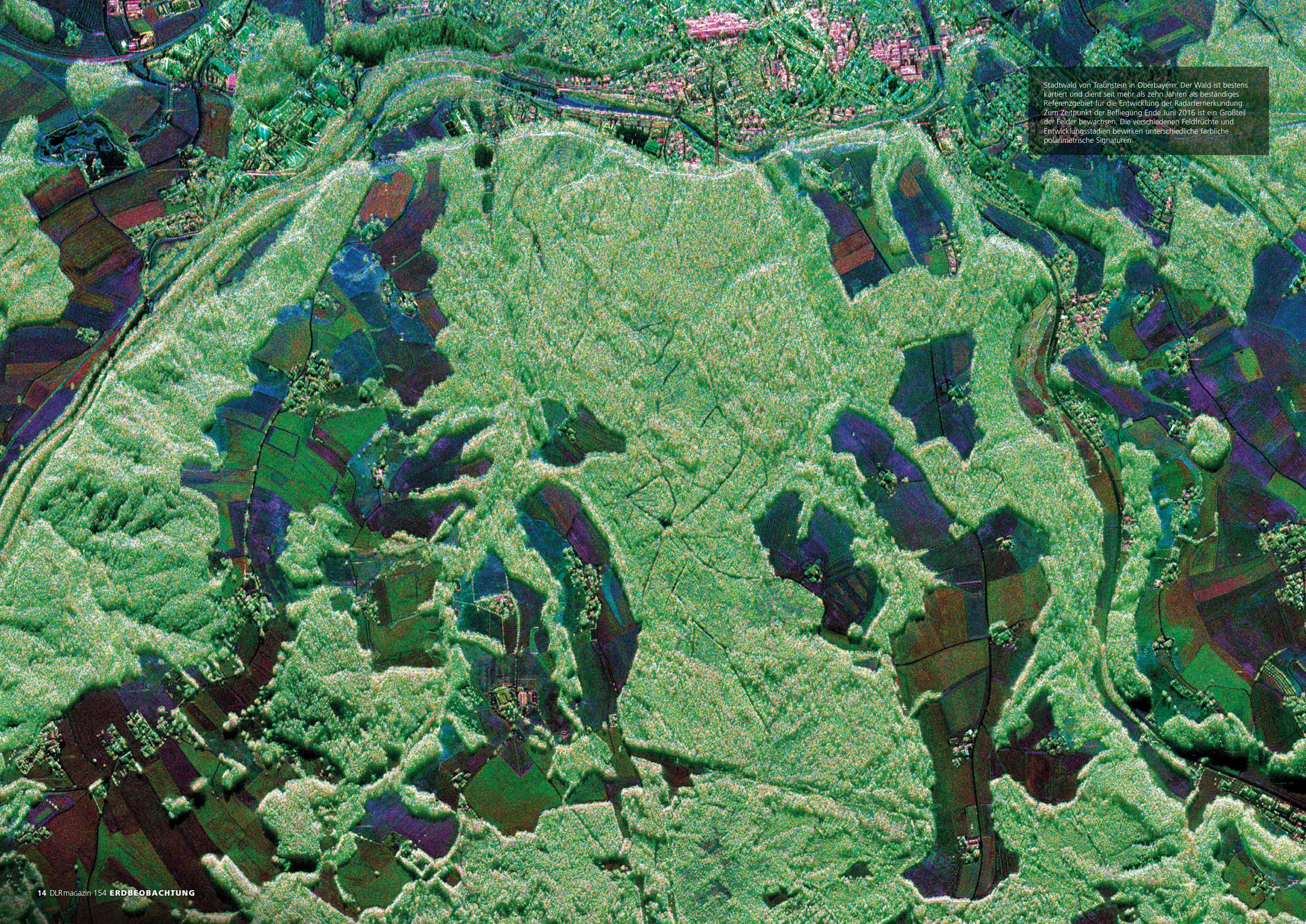
Bild: MBuchholz



HELMHOLTZ-ALLIANZ REMOTE SENSING AND EARTH SYSTEM DYNAMICS

Seit einigen Jahren fördert die Helmholtz-Gemeinschaft (HGF), in der sich deutsche Großforschungseinrichtungen, wie auch das DLR eine ist, zusammengeschlossen haben, die Bildung von sogenannten Helmholtz-Allianzen. HGF-Mitglieder können sich mit Partnern aus Wissenschaft und Forschung zu Allianzen verbünden und so neue Themen aufgreifen oder aktuelle Forschungsprojekte voranbringen.

Zusammen mit neun anderen Helmholtz-Zentren und weiteren 18 Partnern hat das DLR 2012 die Helmholtz-Allianz Remote Sensing and Earth System Dynamics gegründet. Das Ziel: Generierung neuartiger Geoinformationsprodukte durch Erdbeobachtungssatelliten. Diese Informationsprodukte sollen dazu beitragen, das vielschichtige System Erde und die darin ablaufenden Prozesse besser zu verstehen.



Stadtwald von Traunstein in Oberbayern: Der Wald ist bestens kartiert und dient seit mehr als zehn Jahren als beständiges Referenzgebiet für die Entwicklung der Radarfernerkundung. Zum Zeitpunkt der Befliegung Ende Juni 2016 ist ein Großteil der Felder bewachsen. Die verschiedenen Feldfrüchte und Entwicklungsstadien bewirken unterschiedliche farbliche polarimetrische Signaturen.

BRANDHEISSE MISSION



Der Kleinsatellit BIROS sucht gemeinsam mit TET-1 nach Waldbränden. BIROS kann aber noch mehr ...

Von Melanie-Konstanze Wiese

Am 22. Juni 2016 um 5:55 Uhr mitteleuropäischer Sommerzeit trat der Kleinsatellit BIROS seine Reise ins All an. Vom indischen Weltraumbahnhof Satish Dhawan Space Centre an Bord einer PSLV-Trägerrakete (Polar Satellite Launch Vehicle) gestartet, folgte er seinem „Brudersatelliten“ TET-1. Der Technologie-Erprobungsträger hält bereits seit Juli 2012 vom Orbit aus nach Waldbränden Ausschau. Gemeinsam bilden die beiden Satelliten die Mission FireBIRD (Fire Bispectral InfraRed Detector) – eine Mission zur Feuerfernerkundung. Insgesamt zehn DLR-Institute und -Einrichtungen waren an der Entwicklung des Feuerfernerkundungs-satelliten BIROS (Bi-Spektral Infrared Optical System) beteiligt. Der Spezialist für sogenannte Hochtemperaturereignisse wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem DLR Raumfahrtmanagement gefördert und dient gleichzeitig als Plattform für Technologie-Experimente der beteiligten DLR-Institute.

FireBIRD – vier „Augen“ sehen mehr als zwei

In vielen Regionen der Welt sind Waldbrände ein ganz natürliches Phänomen. Doch Brände in Wäldern und Savannen nehmen global an Häufigkeit und Schwere zu. Auf natürliche Weise verursachte Brände machen mit etwa vier Prozent nur einen sehr geringen Teil aus. Die meisten werden direkt oder indirekt vom Menschen verschuldet – mit unmittelbaren Auswirkungen auf die Umwelt. So sind nach groben Schätzungen zwischen 20 und 25 Prozent der weltweiten Kohlendioxid-Emissionen auf Waldbrände und weitere unkontrollierte Feuer zurückzuführen. Auch wenn ein Teil des freigesetzten Kohlendioxids durch nachwachsende Biomasse gebunden wird, verbleiben große Teile des Kohlendioxids über Jahrzehnte in der Atmosphäre. Bedingt durch den Temperaturanstieg in einem sich wandelnden Klima könnte die Zahl der Waldbrände zukünftig weiter anwachsen. Umso wichtiger wird die Waldbrandbekämpfung – vor allem dort, wo es große zusammenhängende Waldgebiete gibt, die sich nicht von lokalen Frühwarnsystemen überwachen lassen. Voraussetzung dafür sind exakte Daten über Ort, Größe und Intensität der Feuer, die im Notfall den Einsatzkräften schnellstmöglich zur Verfügung gestellt werden können.

Zu diesem Zweck hat das DLR im Rahmen der Mission FireBIRD die zwei Feuerfernerkundungs-spezialisten TET-1 und BIROS ausgesendet. Ihre Aufgabe: das Aufspüren von Hochtemperaturereignissen auf der Erdoberfläche. Beide Satelliten umkreisen unseren Heimatplaneten in einer



Die beiden Satelliten TET-1 und BIROS bilden zusammen die Mission FireBIRD (Fire Bispectral InfraRed Detector) – eine Mission zur Feuerfernerkundung. Neben Waldbränden sollen auch vulkanische Aktivitäten, Gasfackeln oder Industrie-Hotspots beobachtet und dokumentiert werden.



Der fertig vermessene Satellit BIROS im DLR. Nächste Station: die Startrampe in Indien.

Höhe von etwa 500 Kilometern in einem Orbit, der sie über die Pole führt. Diese polaren oder auch sonnensynchronen Orbits sorgen dafür, dass die Satelliten den Äquator stets zur gleichen Ortszeit überqueren: TET-1 um 11:30 Uhr und BIROS um 9:30 Uhr. Dabei bewegen sich die Satelliten zueinander um einen halben Orbit versetzt, sodass der eine um 9:30 Uhr den nullten Breitengrad von Nord nach Süd passiert, während der andere um 10:30 Uhr von der Süd- auf die Nordhalbkugel wechselt. Für eine komplette Umrundung benötigen sie 90 Minuten und schaffen somit pro Tag 16 Umrundungen entlang der Längengrade. Nach etwa 20 Tagen haben sie die Erdoberfläche mit ihren hochempfindlichen Sensorsystemen vollständig über alle Breitengrade abgetastet. Dabei bewegen sie sich zueinander in freier Konstellation, nicht etwa in fester Formation wie Satelliten anderer Missionen.

„FireBIRD-Satelliten können aufgrund ihrer sensiblen Sensoren sowie der hohen Genauigkeit und Auflösung auch kleine energieärmere Brände präzise lokalisieren“, erläutert Winfried Halle, Projektleiter am DLR-Institut für Optische Sensorsysteme. Dazu gehören auch „Wärmeunregelmäßigkeiten“ wie Vulkane, brennende Schiffe, Industrie-Hotspots, Gasfackeln, chemische Hitzeentwicklungen oder Schwelfeuer. Für diese Präzision sorgt ein neuartiges Sensorsystem, das sich baugleich an Bord beider Satelliten befindet. Es besteht jeweils aus einer optischen und zwei Infrarotkameras, dem Hot Spot Recognition System (HSRS). Dabei besitzt das bi-spektrale Infrarotsensorsystem zwei identische Infrarotsensoren, die sich lediglich in den Spektralbereichen unterscheiden: Ein Sensor ermittelt elektromagnetische Strahlung im mittleren Infrarot, der andere im thermischen Infrarotbereich. Zusätzlich deckt der optische Sensor den sichtbaren Spektralbereich ab. Da diese optische Kamera eine höhere Auflösung als die Infrarotsensoren besitzt, können die Wärmebilder viel exakter geografisch verortet werden.

MESSUNGEN BEI MEHR ALS 35 GRAD

Bislang konnte bei der Feuerfernerkundung aus dem All nur auf Daten globaler Erdbeobachtungssatelliten zurückgegriffen werden. Diese sind allerdings nicht speziell dafür vorgesehen und erfassen nur Normaltemperaturen. Außerhalb des Messbereichs zwischen 25 und 35 Grad Celsius lässt die Genauigkeit nach und es kann nur noch die Hälfte aller Hitzeereignisse registriert werden. Entsprechend lässt sich auch der Ausstoß klimarelevanter Gase nur grob abschätzen.

Nicht nur die räumliche Auflösung, sondern auch die Empfindlichkeit der Sensorik ist höher als bei bisherigen Systemen. „Die FireBIRD-Satelliten sind die Ersten, die in der Lage sind, bereits Hitzeereignisse ab einem Megawatt zu detektieren“, erläutert Winfried Halle. Bislang ließen sich nur Hitzequellen mit einer Leistung ab zehn Megawatt erfassen. Durch diese exakte Bestimmung der Feuerintensität kann überdies auf die Art der Verbrennung geschlossen werden. So sind nun auch chemische Hitzeentwicklungen und Schwelfeuer aus dem All erkennbar. Die Wärmesensoren haben gegenüber rein visuellen Systemen noch einen Vorteil: Sie arbeiten unabhängig von Wetter und Sichtverhältnissen. Egal ob bei Nacht, Regen oder auch verdeckt hinter Rauch- und Aschewolken, die FireBIRD-Orbiter liefern zuverlässig Ortungs- und Messdaten – und das, dank schneller Breitbanddatenübertragung und -verarbeitung, nahezu in Echtzeit. So lassen sich genaue Aussagen zur Ausbreitung und Hitzeentwicklung von Waldbränden treffen. Das macht FireBIRD zu einem verlässlichen Frühwarnsystem.

Zudem leistet das Satelliten-Tandem einen wichtigen Beitrag zur Klimaforschung. Denn sie soll die Klimaveränderungen durch vom Menschen verursachte Kohlendioxid-Emissionen untersuchen und Prognosen darüber treffen, welche Auswirkungen die durch Verbrennung entstehenden Aerosole auf Wetter und Klima haben können. FireBIRD-Daten sind also für die Wissenschaftler von großem Interesse. Sie werden der wissenschaftlichen Nutzung weltweit zugänglich gemacht.

BIROS: mit neuen Technologien flexibler, schneller und leistungsfähiger

Etwa kühlschrankgroß und zwischen 120 und 130 Kilogramm schwer, bewegen sich die Hochtemperaturspezialisten TET-1 und BIROS um unseren Heimatplaneten. Obwohl mit identischen Kamerasystemen ausgestattet, unterscheiden sich die Kleinsatelliten hinsichtlich ihrer Bauweise. BIROS ist dabei nicht einfach nur eine Kopie seines vier Jahre älteren Brudersatelliten TET-1, sondern Ergebnis der kontinuierlichen Weiterentwicklung in der Kleinsatellitentechnik.

BIROS verfügt im Gegensatz zu TET-1 nicht nur über einen höheren Nutzlastanteil von 46 statt 42 Prozent, sondern auch über ein eigenes Antriebssystem. Ein Kaltgasantriebssystem befähigt ihn, Orbitmanöver durchzuführen und somit seine Lage auf der Umlaufbahn aktiv zu variieren. So kann er die Konstellation zu seinem Brudersatelliten gezielt verändern. Speziell entwickelte dynamische Reaktionsräder, sogenannte High-Torque-Wheels, verleihen dem Kleinsatelliten dabei

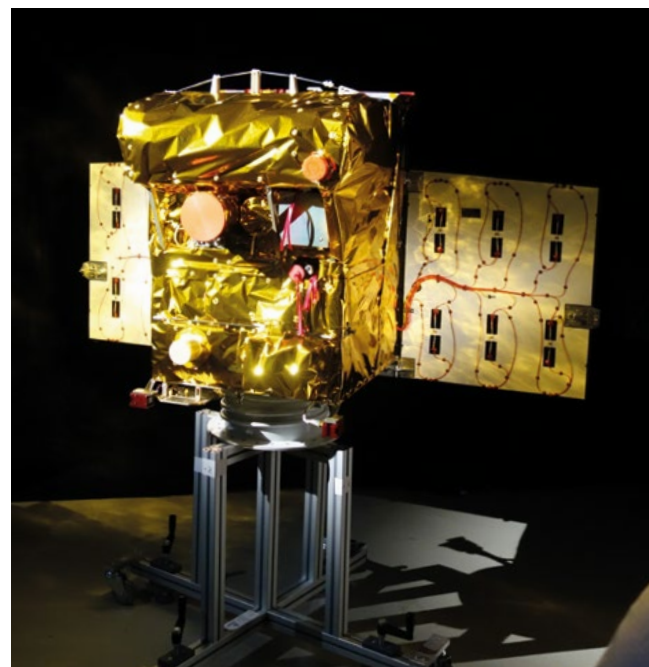
hohe Genauigkeit und Agilität. Durch schnelle präzise Schwenkbewegungen kann er seine „Augen“, das Kamerasystem, wiederholt auf einen bestimmten Punkt an der Erdoberfläche richten und diese aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachten. Diese Eigenschaft erlaubt ihm auch einen raschen Wechsel von einem Aufnahmeziel zum anderen. Seine Beweglichkeit ist ebenso von Vorteil, wenn es um die Übermittlung der Daten an eine Bodenstation geht. Die drei an Bord befindlichen Laserkommunikationssysteme können die Position der Hochtemperaturereignisse sowie bestimmte Feuerparameter wie Temperatur, Energie oder die Fläche von bereits aktiven oder gerade entstehenden Brandherden in Echtzeit an Bodenstationen auf der Erde übertragen. „Sollte der Kontakt zu einer Station durch eine Wolkendecke beeinträchtigt werden, ist BIROS flexibel und kann sich schnell an eine alternative Bodenstation wenden“, sagt Halle. „Wenn jede Minute zählt, ist diese Anpassungsfähigkeit lebenswichtig.“

Um die Daten schneller zu prozessieren sowie die Kommunikation zur Erde zu beschleunigen, kommt auf BIROS ein verbesserter Bordcomputer zum Einsatz. Er erreicht eine Geschwindigkeit bei der Datenverarbeitung, die auf älteren Kleinsatelliten nicht denkbar war: Der Satellit sendet seine Daten über einen optischen (Laser-)Downlink mit Datenraten bis zu einem Gigabit pro Sekunde zur Erde. Wo früher Datenübertragungen zu konventionellen Bodenstationen einen ganzen Tag und mehrere Funkkontakte benötigten, ist dies nun innerhalb weniger Sekunden Kontaktzeit zu einer optischen Bodenstation möglich. Zusätzlich können die Parameter entdeckter Brände nahezu in Echtzeit über ein separates Modem direkt per E-Mail an Mobilgeräte gesendet werden. Diese einzigartige Kommunikation zwischen Satellit und Nutzer läuft zunächst allerdings noch experimentell ab.

Picosatellit BEESAT-4: Satellit im Satelliten

Wie bei einer Matroschka befand sich beim Start im Innern des Satelliten BIROS ein weiterer Satellit. Der Picosatellit BEESAT-4 (Berlin Educational and Experimental Picosatellite) der TU Berlin wurde im September 2016 von BIROS über der norwegischen Inselgruppe Spitzbergen ins All ausgesetzt. Dafür wurde ein Startmechanismus eingebaut, über dessen Feder der Picosatellit mit einer Geschwindigkeit von 1,5 Metern pro Sekunde aus BIROS herausgeschoben wurde. Der würfelförmige Satellit mit einer Kantenlänge von zehn Zentimetern wurde von Mitarbeitern und Studierenden der Technischen Universität Berlin entwickelt und gebaut sowie vom DLR Raumfahrtmanagement mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert, um optische Navigationsexperimente durchzuführen. Ausgestattet mit dem GPS-Empfänger Phoenix sammelt BEESAT-4 Informationen zur präzisen Positions- und Orbitbestimmung. Gleichzeitig nimmt eine spezielle Kamera Fotoserien und Einzelbilder von der Erdoberfläche auf, um die Lage des Satelliten zu bestätigen. Zur Auswertung werden die dabei gewonnenen Telemetriewerte und Bilddaten über BIROS an die Bodenstation der Technischen Universität gesendet. Das Experiment zur genauen Positionsbestimmung des Picosatelliten dient der Weiterentwicklung von Formationsflügen mehrerer Satelliten, die sich Aufgaben und Funktionen teilen können.

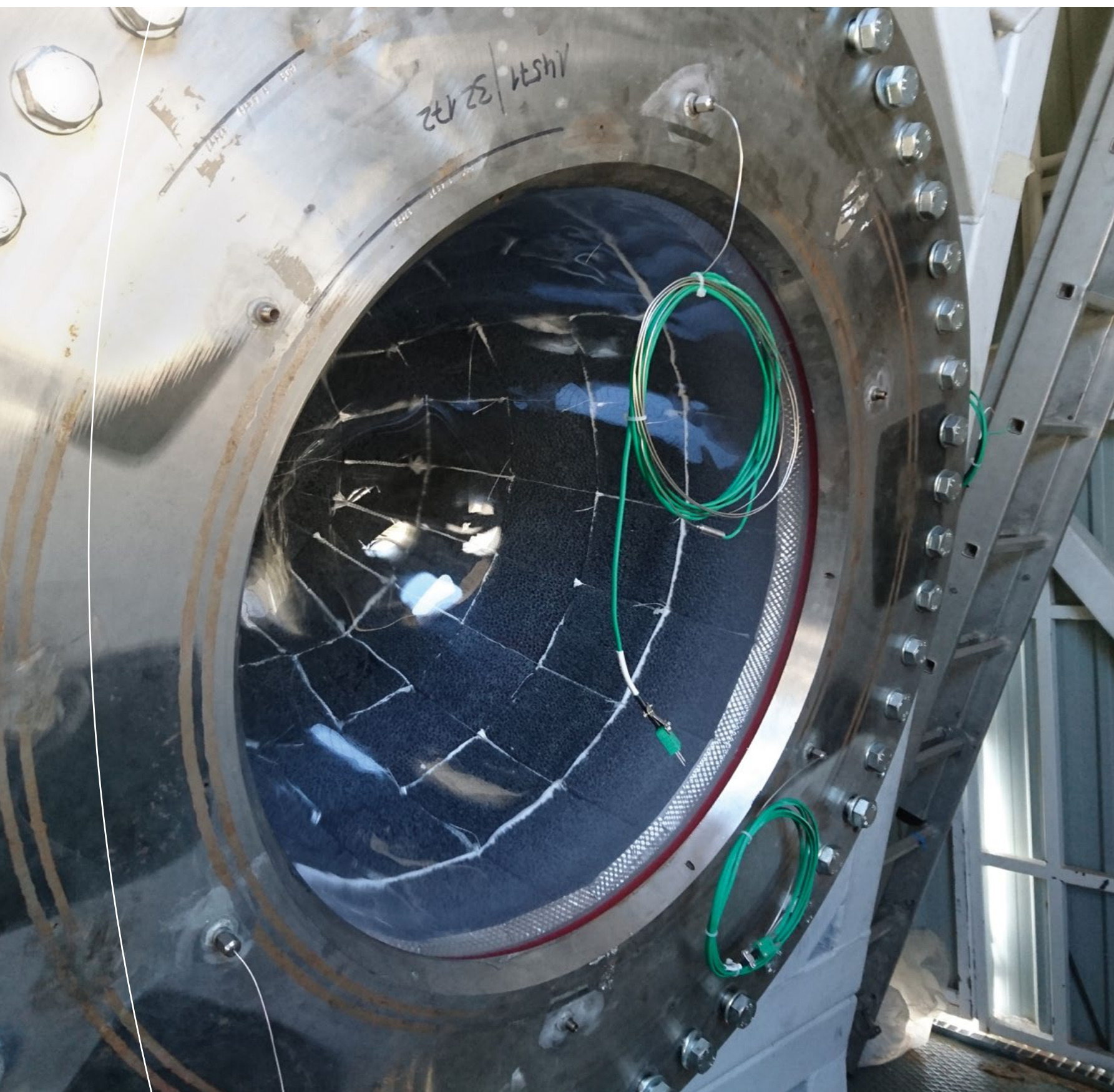
Zugleich wurde BEESAT-4 für ein Experiment genutzt, das bislang einmalig in der Geschichte der Raumfahrt ist. Im Rahmen des Experiments AVANTI (Autonome Visuelle Anflug-Navigation und Target Identifikation) des DLR-Instituts für Raumflugbetrieb und Astronautentraining zeigten Wissenschaftler, wie sich ein Satellit einem Fremdsatelliten völlig autonom, allein auf Basis passiver optischer Beobachtungen annähern kann – ganz ohne Nutzung von GPS-Daten des Zielsatelliten und auch ohne Kommandos aus dem Kontrollzentrum. Durch seine Manövrierfähigkeit gelang es dem Satelliten im November 2016, bis auf etwa 50 Meter an sein Zielobjekt, den Picosatelliten, heranzufliegen. Hierzu lernte BIROS, seine Bahn gezielt zu verändern und mit seiner Sternkamera den Picosatelliten zu suchen sowie „im Auge“ zu behalten. Aus den Bilddaten wurde der Zielsatellit identifiziert und seine Bahn vermessen. Somit war es möglich, die Schubmanöver für eine Annäherung zu berechnen und auszuführen. All diese Schritte erfolgten vollständig autonom an Bord von BIROS. Die Befehle für seine Bahnmanöver bekam der Satellit direkt über die an Bord integrierten Programme des AVANTI-Experiments (Autonome Visuelle Anflug-Navigation und Target Identifikation). Zukünftig könnte diese Fähigkeit eines Satelliten sehr wichtig werden, denn sie bietet die Möglichkeit, alte und inaktive Satelliten sowie Weltraumschrott zu erkennen und später einzufangen.



Noch ein letzter Fototermin für BIROS, bevor die Reise ins All beginnt

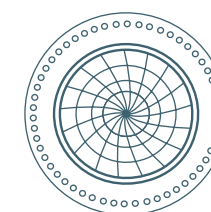
MISSIONSBETRIEB UND DATENEMPFANG

Direkt nach dem Start übernahm das German Space Operations Center (GSOC) am DLR Oberpfaffenhofen die Kommunikation mit dem Satelliten und brachte ihn in seine vorbestimmte Position. Gemeinsam mit den beteiligten Wissenschaftlern arbeiteten hierfür die Teams von Flugbetrieb, Flugdynamik und Missionsplanung eng zusammen, um die Manöver des Satelliten und die daraus resultierenden Bahnen exakt zu berechnen und dann an die Satelliten zu übermitteln. Für die regelmäßigen Kontaktzeiten mit den beiden FireBIRD-Erdtrabanten nutzt das DLR sein globales Netzwerk von Empfangsstationen: Das S-Band-Bodenstationsnetz für den Routinebetrieb besteht aus den beiden deutschen Bodenstationen im DLR Weilheim (Bayern) und Neustrelitz (Mecklenburg-Vorpommern). Zusätzlich werden die polaren Bodenstationen im kanadischen Inuvik und O'Higgins in der Antarktis genutzt.



Reaktor zur Wasserstoffproduktion mittels Solarenergie

GANZ OHNE KOHLENDIOXID



Unter Spaniens Sonne geht das Projekt HYDROSOL_PLANT in den Testbetrieb

Von Dr. Martin Roeb und Dr. Thomas Fend

Wasserstoff hat das Potenzial, einer der dominierenden Energieträger in zahlreichen Bereichen der Energiewirtschaft zu werden. Im Verkehr wird er aktuell als Fahrzeugtreibstoff für Autos, Busse, Lastkraftwagen und Züge eingeführt. Der Antrieb erfolgt dabei über Brennstoffzellen. Diese finden auch in Fahrzeugen spezieller Flotten, beispielsweise in Logistikunternehmen oder auf Flughäfen, Einsatz. Daneben werden Wasserstoff und Brennstoffzellen auch stationär genutzt, so auf dem Gebiet der Kraft-Wärme-Kopplung oder bei Anwendungen, die eine unterbrechungsfreie Stromversorgung erfordern.

Das Vorteilhafte an Wasserstoff ist, dass er sich aus dem Rohstoff Wasser herstellen lässt, und zwar durch die Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Erst dadurch wird der Wasserstoff zu einem Energievektor, der es ermöglicht, bei Anwendungen mit substanziellem Energieverbrauch die Emissionen stark zu reduzieren oder gar ganz zu vermeiden. Nutzt man Wasserstoff als Brennstoff, so ist das einzige Verbrennungsprodukt Wasser – kein Kohlendioxid!

Thermochemischer Kreisprozess

Die in diesem Zusammenhang zurzeit am weitesten vorangeschrittene Technologie zur Herstellung von Wasserstoff ist die Wasserelektrolyse. Es gibt allerdings eine Reihe von alternativen Herstellungsmethoden, die mittel- bis langfristig das Potenzial haben, die Elektrolyse in Sachen Effizienz zu überbieten. Dazu zählen die sogenannten thermochemischen Kreisprozesse. Wird in einem thermochemischen Kreisprozess die notwendige Prozesswärme durch konzentrierte Sonnenstrahlung zugeführt, läuft der Prozess kohlendioxidfrei ab.

Und hier wird das Projekt HYDROSOL_PLANT interessant. Es ist nicht das erste Projekt zu einem solchen Prozess. In den letzten Jahren hat das DLR in einer Reihe von Projekten – HYDROSOL, HYDROSOL-2, HYDROSOL-3D – die Technologie Schritt für Schritt weiterentwickelt. Nun wird sie auf einem Solarturm unter Feldbedingungen in einer technisch relevanten Größenordnung demonstriert. Am Projekt HYDROSOL_PLANT arbeiten noch weitere Partner mit: aus Spanien das Forschungszentrum Centro de Investigaciones Energéticas,

Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), das niederländische Unternehmen HyGear, aus Griechenland das Energieversorgungsunternehmen Hellenic Petroleum, kurz HELPE, und das Forschungsinstitut APTL. APTL steht für Aerosol and Particle Technology Laboratory. Das Forschungsinstitut beschäftigt sich mit Energiethemen sowie mit Problemen der Abgasnachbehandlung von Verbrennungsmotoren. APTL ist ein langjähriger Partner des DLR und koordiniert das Projekt. Ort der Demonstration ist ein Solarturm auf der Plataforma Solar de Almería, wo Wissenschaftler und Ingenieure von CIEMAT und aus dem DLR seit vielen Jahren gemeinsam an der Entwicklung konzentrierender Solartechnik arbeiten.

Das Konsortium hat einen zweistufigen thermochemischen Kreisprozess entwickelt und „solarisiert“. Dafür setzen die Wissenschaftler Redox-Materialien ein. Das sind Metalloxide, die Sauerstoffmoleküle aus Wasser abspalten können und so Wasserstoff freisetzen. Bei den Metalloxiden handelt es sich um sogenannte Mischoxide. Die in HYDROSOL_PLANT verwendeten haben einen hohen Eisenanteil und werden in einer mehrstufigen Prozedur von Misch-, Verbrennungs- und Temperschritten vom Projektpartner APTL hergestellt. Eine Schlüsselrolle im Reaktorkonzept spielen poröse keramische Körper, die man sich wie harte Schäume vorstellen kann. Sie sind mit dem Metalloxid beschichtet. Damit bilden sie einerseits die Reaktionsoberfläche für die Spaltung von Wasser und dienen andererseits als Solarabsorber. Mittels konzentrierter Sonnenstrahlung werden die keramischen Absorber auf die notwendigen Prozesstemperaturen von 800 bis 1.400 Grad Celsius erhitzt.

Im ersten der beiden Teilschritte wird Wasser gespalten und Wasserstoff produziert. Dazu wird Wasserdampf in den Reaktor eingeleitet. Sobald Wassermoleküle mit der heißen Oberfläche des Metalloxids auf dem Absorber in Berührung kommen, werden sie gespalten. Die abgespaltenen Sauerstoffatome werden in das Metalloxid eingebunden und Wasserstoff bleibt als gasförmiges Produkt übrig. Er wird aus dem Reaktor abtransportiert, gereinigt und schließlich abgefüllt. Nach einer Weile, typischerweise 15 bis 20 Minuten, ist das Metalloxid mit Sauerstoff gesättigt und kann keine weiteren Wassermoleküle mehr spalten. Im zweiten Teilschritt wird dann das Metalloxid reduziert und damit wieder für den nächsten Zyklus der Wasserstoffherstellung „regeneriert“. Bei diesem Schritt wird Sauerstoff freigesetzt und durch ein Spülgas aus dem Reaktor entfernt. Dieser Schritt benötigt Hochtemperaturwärme. Diese wird durch das konzentrierte Sonnenlicht zur Verfügung gestellt.

Solarreaktor made by DLR

DLR-Wissenschaftler trieben in den letzten Jahren in europäischen Projekten die Entwicklung der Redox-Materialien voran. Im Projekt HYDROSOL_PLANT hat das DLR allerdings die Aufgabe, den Solarreaktor zu entwickeln und zu bauen. Dieser erfüllt zwei Aufgaben: Er dient als Strahlungsempfänger (deshalb wird er auch als Receiver-Reaktor bezeichnet) und in ihm laufen die zur Wasserstoffproduktion notwendigen chemischen Reaktionen ab. Entscheidende Weiterentwicklung zu den Vorgängerprojekten ist die Anordnung der keramischen Porenkörper im Receiver in Kuppelform. Dies ermöglicht eine

Maximierung der bestrahlten Fläche bei möglichst klein gehaltener, durch ein Quarzglasfenster verschlossener Öffnung des Receivers. So wird von den heißen Absorberstrukturen weniger Wärme an die Umgebung abgestrahlt, was bislang einer der Hauptverlustfaktoren dieses Prozesses war. Die gewölbten Quarzfenster sorgen dafür, dass die gebündelte Solarstrahlung mit minimalen Reflexionsverlusten empfangen werden kann.

Für eine effektive Absorption der Sonnenenergie werden drei Receiver-Module parallel betrieben. Das erhöht die Menge an Wasserstoff, die pro Tag erzeugt werden kann, und macht den Betrieb flexibel. Da die beiden Teilprozesse nicht immer gleich schnell ablaufen, kann man drei Reaktormodule nutzen und so die benötigten Zeiten für die Wasserspaltung und die Regeneration des Redox-Materials optimal aufeinander abstimmen.

Ein zentraler Aspekt der Betriebsführung ist die Temperaturregelung durch die Steuerung des Heliostatenfelds. Für den Regenerations-schritt sind hohe Temperaturen und intensive Energiezufuhr notwendig. Viele Heliostate werden auf die Öffnung desjenigen Receivermoduls gerichtet, das gerade diesen Reaktionsschritt durchführt. Wechselt der Reaktionsmodus von der Regeneration zur Wasserstoffherstellung, wird das Heliostatenfeld zeitgleich derart umgesteuert, dass der Brennpunkt der Heliostate auf das benachbarte Receivermodul umgelenkt wird, das dann seinerseits wiederum in den Regenerationsmodus wechselt.

Preisgekrönter Prozess

Die generelle Idee zu HYDROSOL und die erste erfolgreiche technische Validierung der neuen Technologie unter realen Randbedingungen eines Sonnenofens wurden mehrfach mit wissenschaftlichen Preisen ausgezeichnet, allen voran der Descartes-Preis der Europäischen Union. Die Juroren überzeugte neben dem großen Potenzial in Bezug auf den Wirkungsgrad vor allem die Robustheit und Einfachheit der Verfahrenstechnik, mit der die komplexen chemischen Reaktionen in einen Prozess transferiert werden. Zudem kann in dem Prozess auch Kohlendioxid (CO₂) gespalten werden. Dadurch lässt sich CO₂ aus Verbrennungsprozessen wiederverwerten und so beispielsweise synthetischer Treibstoff, wie Benzin oder Kerosin, aus CO₂ und Wasser mit Hilfe von Sonnenlicht herstellen.

2014 hat das DLR mit seinen Partnern in dem vom europäischen Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking co-finanzierten Projekt HYDROSOL_PLANT begonnen, diesen Prozess und die dazu benötigten Komponenten in einen Maßstab aufzuskalieren, der die technische Demonstration dieses Prozesses im Feldtest in einer Größenordnung von etwa 750 Kilowatt ermöglicht. Die Anlage wird zurzeit auf einer Messebene des sogenannten SSPS-Solarturms der Plataforma Solar de Almería in Südspanien aufgebaut. Im Sommer 2017 wird sie in ihren Test- und Demonstrationbetrieb gehen.

Dr. Martin Roeb ist im DLR-Institut für Solarforschung Gruppenleiter Solare Verfahrenstechnik – Hochtemperaturprozesse. **Dr. Thomas Fend** leitet das Projekt HYDROSOL_PLANT.

DER REAKTOR

Kessel

Isolierung

Ceroxid-Absorber

Auslass

Einlass

Fensterflansch

Quartz-Fenster

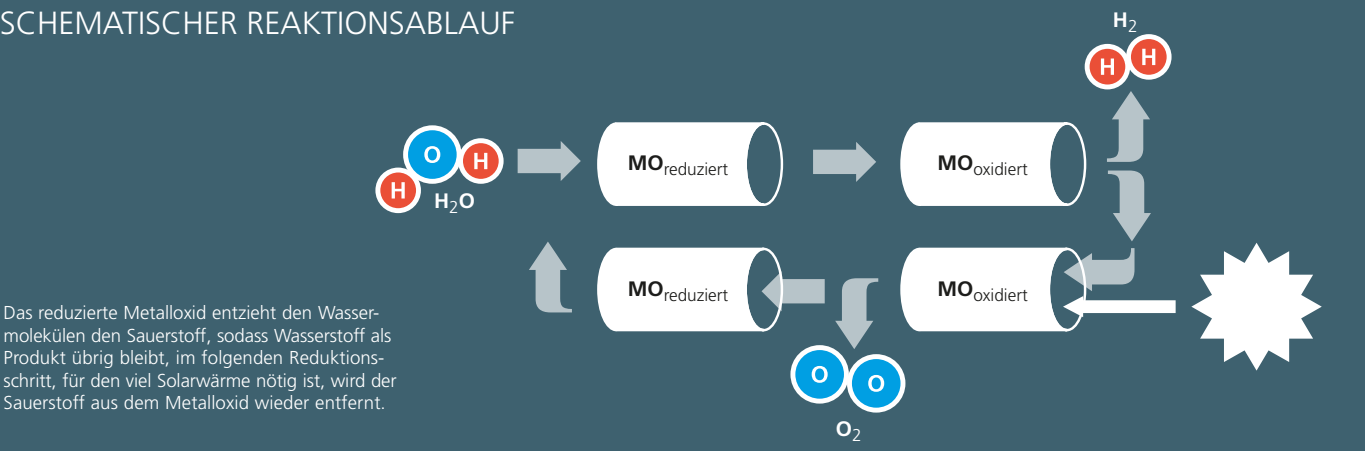
Verlängerung Sekundärkonzentrator

Innenkessel mit Strömungsverteilung

Vorder- und Rückansicht der Reaktoren

Heliostatenfeld und Turm auf der Plataforma Solar de Almería

SCHEMATISCHER REAKTIONSABLAUF



BLICK IN DIE ZUKUNFT SOLAR ERZEUGTEN WASSERSTOFFS

Eine Option für die Zukunft könnte sein, Erdgas mit Wasserstoff anzureichern, um einen Teil der dort gespeicherten und transportierten fossilen Energie durch kohlenstoff-freie Energie zu ersetzen, die sich auf der Basis nachhaltiger, erneuerbarer Energie- und Rohstoffquellen gewinnen lässt. Ein in dieser Hinsicht sehr ambitioniertes und konsequentes Programm zur Einführung von Wasserstoff als zentralem Energieträger wird von Japan verfolgt. Im April 2014 wurde vom japanischen Kabinett ein strategischer Plan verabschiedet, der den mittelfristigen Weg Japans in eine Wasserstoffgesellschaft skizziert. Dieser Plan umfasst sowohl technische Aspekte der Herstellung, des Transports und der Speicherung von Wasserstoff als auch gesellschaftliche Aspekte, wie die Akzeptanz dieser neuen Technologie, und wird daher in enger Abstimmung zwischen Forschung, Industrie, Regierung und Bevölkerung weitergeführt. Der dazu notwendige Prozess ist in drei Phasen gegliedert. In der ersten Phase, die bereits läuft und bis zum Ende des Jahrzehnts anvisiert ist, wird der Anwendungsbereich für Brennstoffzellen schrittweise erweitert, um Energieeinsparungen zu realisieren und sich eine entsprechende Position auf dem Weltmarkt zu sichern. In der zweiten Phase bis Ende der 2020er-Jahre soll ein Versorgungssystem für Wasserstoff etabliert werden, das auf Import-Wasserstoff basiert, der nicht nur, aber überwiegend mit erneuerbarer Energie hergestellt wurde. Hier ist vor allem Solarwasserstoff aus Australien und anderen stabilen Solarstandorten im Fokus, um die Versorgung auch sicher zu gestalten. In der dritten Phase geht es schließlich bis etwa 2040 darum, ein komplett kohlendioxid-freies Wasserstoffversorgungssystem für das ganze Land zu etablieren. Das Beispiel Japan könnte als Blaupause für eine Einführung der Technologie an anderen Standorten weltweit dienen – nicht zuletzt auch in Europa.

MIT KOPERNIKUS IN DIE ZUKUNFT

DLR unterstützt breit angelegte wissenschaftliche Initiative zur Energiewende

Von Denise Nüssle

Als der Mathematiker und Astronom Nikolaus Kopernikus im 16. Jahrhundert herausfand, dass sich die Erde um die Sonne dreht und nicht umgekehrt, löste das einen tiefgreifenden wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Wandel aus. Nun ist der Gelehrte Namensgeber für eine breit angelegte deutsche Forschungsinitiative zur Energiewende: Über einen Zeitraum von zehn Jahren entwickeln Akteure aus Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft in vier sogenannten Kopernikus-Projekten Lösungen für den nachhaltigen Umbau des Energiesystems. Die Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) soll Ergebnisse aus der Grundlagenforschung bis in die Anwendung führen und von Beginn an wirtschaftliche, gesellschaftliche, politische und technologische Fragestellungen verknüpfen. Zu den vier Schlüsselbereichen gehören: die Entwicklung von Stromnetzen, das Speichern gerade nicht benötigten Stroms aus erneuerbaren Quellen durch das Umwandeln in andere Energieträger, die Neuausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung und die Optimierung des Zusammenspiels aller Sektoren im Energiesystem der Zukunft.

Die DLR-Energieforschung ist an drei von vier Kopernikus-Projekten beteiligt. Die Institute für Technische Thermodynamik und für Verbrennungstechnik des DLR steuern vor allem Know-how in den Bereichen Energiespeicher, Energiesystemanalyse, alternative Brennstoffe und technische Verbrennungsprozesse bei. „Das DLR forscht bereits seit mehr als 40 Jahren an innovativen Technologien und Lösungen, um unsere Energieversorgung nachhaltig umzugestalten, sie umweltfreundlich und zugleich zuverlässig und bezahlbar zu machen. Wir freuen uns sehr darauf, in den nächsten Jahren unsere Expertise und Erfahrung in die Kopernikus-Projekte einzubringen und mit den Partnern wichtige Zukunftsfragen im Energiebereich gemeinsam anzugehen“, sagte die DLR-Vorstandsvorsitzende Professor Dr. Pascale Ehrenfreund anlässlich des Starts der Initiative.

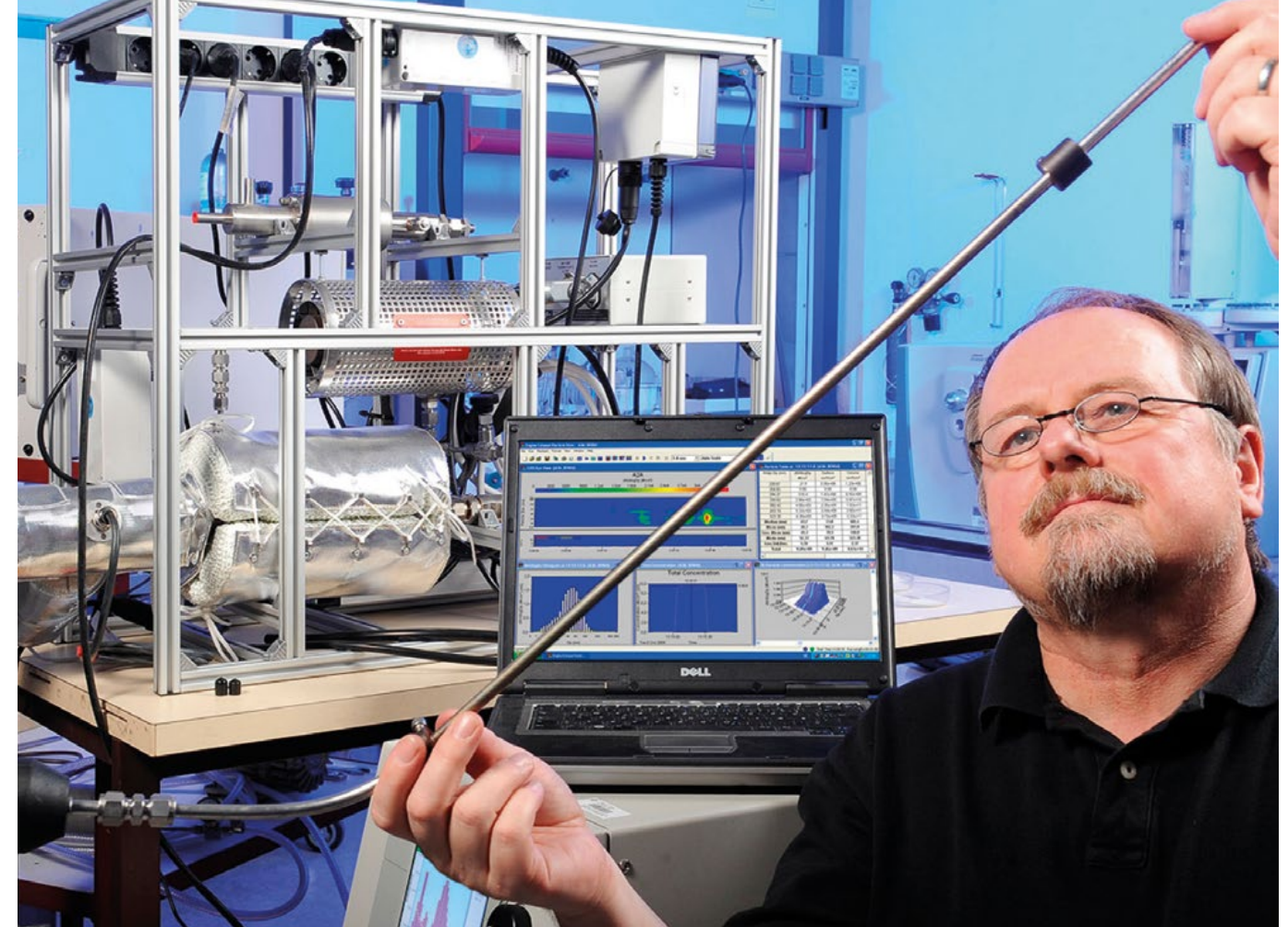
P2X: Speichern von erneuerbarem Strom

Der stetig steigende Anteil von Strom aus erneuerbaren Ressourcen führt bereits heute dazu, dass in Zeiten, in denen die Sonne stark scheint oder der Wind stark weht, mehr Strom produziert wird als benötigt. Die bisherigen Möglichkeiten, diesen Strom zum Beispiel mittels Batterien zu speichern, sind begrenzt. Eine vielversprechende technologische Alternative ist es, den Strom zu nutzen, um gasförmige Substanzen wie Wasserstoff oder Methan (Power-to-Gas) oder flüssige Substanzen für die chemische Industrie oder als Kraftstoffe für die Mobilität (Power-to-Liquid) herzustellen.

Die Abteilung für Elektrochemische Energietechnik des DLR-Instituts für Technische Thermodynamik untersucht im Zuge des Kopernikus-Projekts P2X (Power to X), wie mittels Elektrolyse aus Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid ein Synthesegas hergestellt werden kann. Im Mittelpunkt stehen die Materialien, die für diese spezielle Elektrolyse bei hohen Drücken und Temperaturen benötigt werden. Am Ende der Power-to-X-Prozesskette sind die Forschungsaktivitäten des DLR-Instituts für Verbrennungstechnik angesiedelt: Die Wissenschaftler untersuchen flüssige Energiespeicher, die mittels Power-to-Liquid hergestellt wurden, und koordinieren die Aktivitäten im Bereich der Kraftstoffqualität. Sie konzentrieren sich vor allem auf einen möglichen Einsatz in der Luftfahrt. Dazu analysieren sie die Eigenschaften der jeweiligen Treibstoffe sowie deren genaue chemische Zusammensetzung. Mit Hilfe experimenteller Analysen und modellbasierter Methoden sollen so Aussagen zu weiteren Optimierungspotenzialen getroffen werden.

SynErgie: Industrieprozesse flexibler gestalten

In Deutschland entfallen mehr als 40 Prozent des Nettostrombedarfs und 25 Prozent des Wärmebedarfs auf Industrieprozesse. Sie sind ein wichtiger Ansatzpunkt für den Erfolg der Energiewende und gleichzeitig eine Herausforderung: Auf der einen Seite steht ein Energiesystem mit einem steigenden Anteil schwankender Stromerzeugung aus erneuerbaren Ressourcen, auf der anderen Seite die industriellen Verbraucher mit einem konstanten Bedarf an Strom, Wärme und Gas. Es gilt, Erzeugung und Verbrauch von Energie zeitlich in Einklang zu bringen. Neben Speicherlösungen kommt dabei der Flexibilisierung von Industrieprozessen eine entscheidende Rolle zu. Vor allem besonders energieintensive Prozesse müssen nach anderen Grundsätzen konzipiert werden als bisher. Das Potenzial ist enorm: Bis zum Jahr 2020 könnten die Energieversorgungskosten der Industrie um mehr als zehn Milliarden Euro sinken und die Kohlenstoffdioxidemissionen erheblich reduziert werden.



Analyse neuer Treibstoffe: Mit Experimenten und modellbasierten Methoden optimieren Wissenschaftler des DLR-Instituts für Verbrennungstechnik die Eigenschaften neuer Kraftstoffe für ihren Einsatz in der Luftfahrt.

Im Kopernikus-Projekt SynErgie untersucht die Abteilung Thermische Prozesstechnik des DLR-Instituts für Technische Thermodynamik deshalb zunächst die Flexibilisierungspotenziale in der sehr energieintensiven Grundstoffindustrie, die beispielsweise Stahl, Aluminium, Glas, Baustoffe oder chemische Grundstoffe herstellt. Die dortigen Prozesse sind sehr komplex und müssen in eng begrenzten Betriebsfenstern ablaufen. Die erzeugten Produkte unterliegen gleichbleibenden Qualitätsansprüchen. Ziel der Forscher ist es, im ersten Schritt eine Methodik zu entwickeln, mit der Flexibilisierungsoptionen branchenübergreifend bewertet werden können. Auf dieser Grundlage werden dann in einer Potenzialanalyse exemplarisch Prozesse definiert und durchgespielt.

ENavi: Systemintegration Strom, Wärme und Mobilität

Der mit der Energiewende verknüpfte Umbau der Energieversorgung beeinflusst eine Vielzahl eng miteinander verknüpfter Systeme: Besonders die Sektoren Strom, Wärme und Mobilität stehen in einem engen Zusammenhang. Das Kopernikus-Projekt ENavi geht deshalb von einer gesamtheitlichen Betrachtung aus. Ziel ist es, das komplex vernetzte Energiesystem von morgen besser zu verstehen und Handlungsoptionen aufzuzeigen. Im Fokus stehen die Wechselwirkungen und Schnittstellen zwischen den Sektoren genauso wie die technologischen, wirtschaftlichen, politischen und gesellschaftlichen Anforderungen an das gesamte System. Dazu zählen Fragen nach dem Netzausbau, nach Erzeugungs- und Speicherkapazitäten, nach der Entwicklung geeigneter Steuerungsinstrumente sowie nach der gesellschaftlichen Akzeptanz. Die Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung des DLR-Instituts für Technische Thermodynamik entwickelt im Projekt unter anderem bestehende Simulationsmodelle weiter. So können sie beispielsweise Aussagen zur weiteren Entwicklung des Strommarktes treffen oder mögliche

zukünftige Energiesysteme zeitlich und räumlich hochaufgelöst modellieren. Aus der Verkehrsforschung des DLR fließen Szenarien und Modelle ein, um die Schnittstellen von Energie und Verkehr genauer betrachten zu können.

Die Industrie ist darauf angewiesen, dass Energie konstant bereitsteht. Wie sich das mit einer schwankenden Stromerzeugung aus erneuerbaren Ressourcen vereinbaren lässt, ist eine der Fragen, auf die Wissenschaftler im Rahmen der Kopernikus-Initiative Antworten finden wollen.



Bild: Thinkstock/ozgursengelli

WASSERREINIGUNG IN NEUEM LICHT

Wie wirksam entfernen Xenonstrahler Schadstoffe?

Von Anke Nietsch

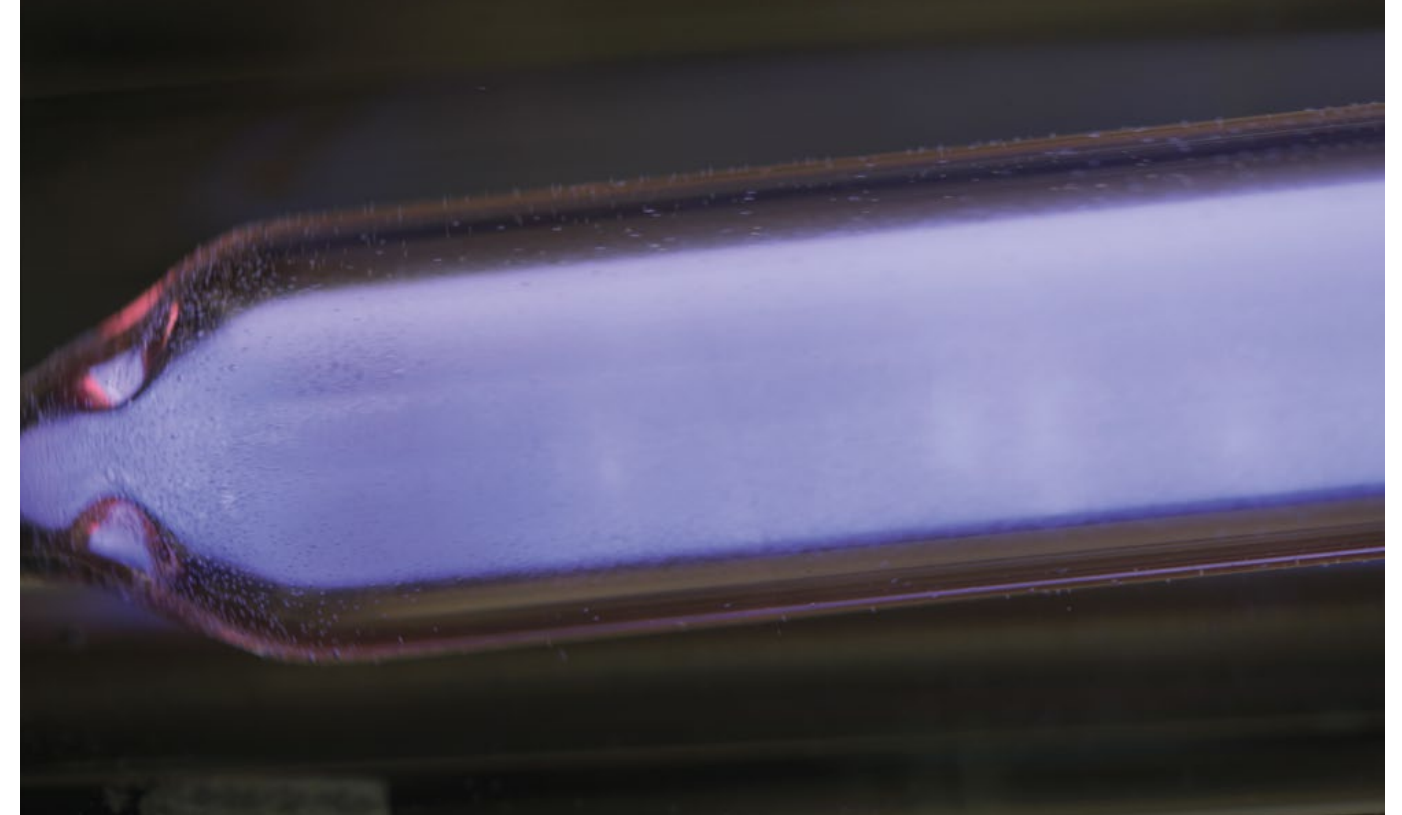
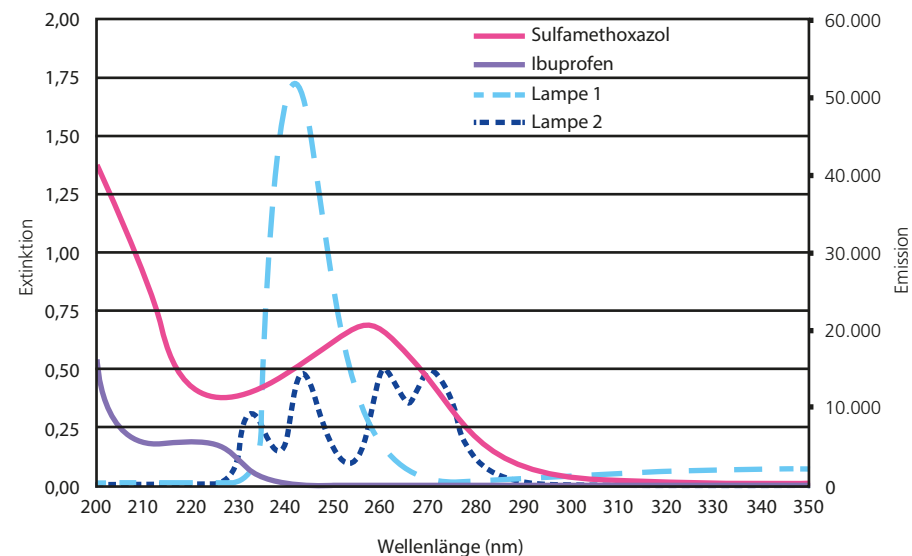
Industrieabwässer sind häufig mit Schadstoffen belastet, die eine zusätzliche und damit oft teure Behandlung notwendig machen. Neben verschiedenen physikalischen Verfahren wie Adsorption, Membranfiltration oder Ähnlichen, oftmals in Kombination mit einer nachfolgenden speziellen Entsorgung, kommen immer häufiger Verfahren auf Basis einer erweiterten Oxidation (engl. Advanced Oxidation Processes, AOP) zum Einsatz. Die Industrie setzt Oxidationsverfahren gerne ein, da der Prozess eine umweltfreundliche und kostengünstige Alternative zur Abwasserverbrennung ist. Zu den AOPs gehören diverse Kombinationen von Ultraviolett-Strahlung (UV-Strahlung), Ultraschall, elektrischen Feldern oder Katalysatoren jeweils mit Oxidationsmitteln wie Wasserstoffperoxid, Ozon oder Persulfat. Für die fotochemischen Oxidationsprozesse werden meistens Quecksilber-Dampflampen (Hg-Dampflampen) verwendet, da diese UV-Strahlung mit einer Effizienz von 20 bis 40 Prozent liefern. Eine energetisch günstigere Alternative zu den UV-Lampen ist es, natürliche Solarstrahlung zu nutzen.

Sauberes Wasser ist einer unserer kostbarsten Rohstoffe und von Jahr zu Jahr steigt der weltweite Bedarf. Grund genug, um an Systemen zur Wasserreinigung zu forschen. Im DLR tun das Wissenschaftler der Abteilung Solare Verfahrenstechnik des Instituts für Solarforschung schon seit mehr als 20 Jahren. Aktuell suchen sie nach Techniken zur Abwasserreinigung mit umweltfreundlichen Lampen.

Auf der Suche nach einer Alternative zu den Quecksilber-Dampflampen liegt es nahe, den sich rasch entwickelnden Leuchtmittelmarkt unter die Lupe zu nehmen. So verfolgten die DLR-Wissenschaftler aufmerksam die Entwicklung der LED (Light-Emitting Diode, lichtemittierende Diode). Ihre Effizienz hat sich bei den langwelligen UV-A-Strahlen in den letzten Jahren fast verdreifacht. Die Ausbeuten im UV-C-Bereich sind aber immer noch recht gering. Eine weitere Lichtquelle, die momentan auch im DLR-Projekt Fluoro_UV verwendet wird, sind Hg-freie UV-Strahler auf Basis einer Edelgasentladungslampe. Mit dieser Lampentechnologie könnte ausreichend kostengünstige UV-Strahlung erzeugt werden, wie sie für die Trink- oder Prozesswasseraufbereitung sowie die Abwasserbehandlung notwendig ist.

Im Projekt Fluoro_UV sehen die DLR-Wissenschaftler eine Chance, gemeinsam mit ihren Projektpartnern einen „grünen“ Strahler auf Basis einer Edelgasentladung zu entwickeln. Sie wollen leuchtstoffhaltige Xenon(Xe)-Excimerstrahler als UV-Quelle realisieren. Deren Emissionsspektren können genau auf die Anwendung zur Desinfektion oder zur Reinigung von Wasser unterschiedlicher Verschmutzungsgrade abgestimmt werden. Im Wasserlabor des DLR-Instituts für Solarforschung in Köln testen die Forscherinnen und Forscher die neuen, bisher handgefertigten Lampen und beschreiben ihre Eigenschaften, um schließlich deren Anwendungsmöglichkeiten zu bewerten und den Energiebedarf der Wasserreinigung mit den neuen Lampen zu ermitteln.

Pharmaka haben im Abwasser nichts zu suchen. DLR-Forscher testen Lampen auf deren Wirksamkeit beim Zerstören solcher Substanzen. Die Grafik zeigt die Überlagerung der Absorptionsspektren von Sulfamethoxazol und Ibuprofen mit dem Emissionsspektrum zweier Xe-Excimerstrahler mit Leuchtstoff. Der Extinktionswert zeigt die Abschwächung des Lichts nach Durchqueren eines Stoffs an. Je besser die Überlagerung der Spektren, umso wirksamer der Reinigungseffekt.



Der neue Xe-Excimerstrahler mit Phosphor-Leuchtstoff im Betrieb. Er kommt ohne Quecksilber aus und reinigt Abwasser effektiver als Hg-Dampflampen.

Die Charakterisierung der Leuchtmittel erfolgt mittels chemischer Aktinometrie. Dabei handelt es sich um eine chemische Reaktion, die durch Licht (Photonen) ausgelöst wird. In der Literatur sind solche Reaktionen beschrieben, bei denen der Zusammenhang zwischen der leicht messbaren stofflichen Veränderung und der absorbierten Photonenanzahl je nach Wellenlänge genau bekannt ist. Das gestattet es den Wissenschaftlern, im Wellenlängenbereich von 205 bis 550 Nanometern Leuchtmittel zu charakterisieren, unabhängig von der Geometrie der Lampe und dem dazu passenden Fotoreaktor. Ein unabhängiger Vergleich des Reinigungsfortschritts pro eingestrahlt photonische Energie (Licht) oder pro eingesetzte elektrische Energie ist damit möglich. So kann schließlich die Wirksamkeit der Lampen beurteilt werden.

Für ihre Untersuchungen nehmen sich die DLR-Wissenschaftler zunächst der Problematik von Pharmazeutika im Abwasser an. Eine Vielzahl von Medikamenten gelangt unter anderem nach der Einnahme ins Abwasser. Wenn der biologische Abbau in der Kläranlage nicht oder nur unzureichend erfolgt, gelangen diese Stoffe in die Umwelt und können dort schädliche Wirkungen hervorrufen. Besonders kritisch sind Antibiotika, denn sie können zur Bildung resistenter Keime beitragen. Im Projekt Fluoro_UV beschäftigen sich die DLR-Wissenschaftler deshalb auch mit zwei weit verbreiteten Medikamenten, einem Antibiotikum (Sulfamethoxazol) und einem Schmerzmittel (Ibuprofen). Beide Substanzen wurden in Grund- und Oberflächenwässern bereits nachgewiesen.

Die Kombination des Xe-Excimerstrahlers mit einem Leuchtstoff (einem Phosphor) führt zu einem charakteristischen Emissionsspektrum (siehe Diagramm, gestrichelte Linien). Je besser dieses Emissionsspektrum mit dem Absorptionsspektrum eines Schadstoffs überlagert, desto besser kann der Schadstoff zerstört werden. Die verwendeten phosphorkonvertierten Xe-Excimerlampen emittieren Strahlung unterhalb von 254 Nanometer Wellenlänge. Somit überlagern sie deutlich besser mit den Absorptionsspektren der Modellschadstoffe als ein sogenannter Amalgamstrahler, eine Hg-Dampflampe aktueller Technik, die als Referenz untersucht wurde.

Die Lampen werden nun in zwei unterschiedlichen Anwendungsvorgängen getestet. Bei der Fotolyse soll das mit dem entsprechenden Schadstoff verunreinigte Modell-Abwasser ausschließlich mit UV-Strahlung gereinigt werden. Bei der Foto-Oxidation wird dem Wasser zusätzlich ein Oxidationsmittel (beispielsweise Wasserstoffperoxid) hinzugefügt, das durch die Strahlung aktiviert wird. In beiden

Verfahren werden Verunreinigungen häufig in kleinere organische Verbindungen umgesetzt. Bei fortgesetzter Behandlung können die Schadstoffe zu Kohlendioxid, Mineralstoffen und Wasser abgebaut werden. Während der Abbauprobe werden der Lösung Proben entnommen. Neben den einzelnen Stoffen (Ibuprofen beziehungsweise Sulfamethoxazol) wird auch der gesamte organische Kohlenstoff (englisch Total Organic Carbon, TOC) bestimmt. Mit dem TOC als Summenparameter kann die Abbaubarkeit von Zwischenprodukten beurteilt werden, ohne diese im Einzelnen kennen zu müssen.

Die ersten Ergebnisse sind sehr ermutigend: Das Abwasser kann mit den neuen Leuchtmitteln auch ohne Quecksilber gut behandelt werden. Und der Energiebedarf der zur Reinigung erforderlichen Strahlungsdosis ist sogar geringer als bei den bisher genutzten Quecksilberlampen.

Anke Nietsch ist Diplom-Chemikerin im Institut für Solarforschung und betreut die Projekte im Bereich Wasserlabor.



UV-Oxidationsanlagen zur Abwasserbehandlung, wie sie momentan auf dem Markt sind

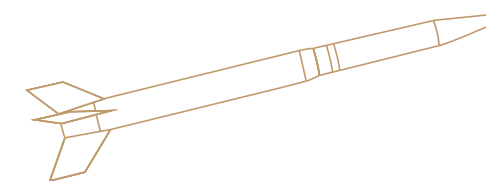
Bild: Enviolet



Die „Improved Malemute“, die Höhenforschungsrakete der MORABA, auf der Startrampe des Andøya Space Center in Norwegen.
Unten im Bild zu sehen: Die im DLR Stuttgart entwickelten und gefertigten Finnen.

Bild: Andøya Space Center/Trond Abrahamsen

MIT CARBON UND KORK INS ALL



Neue Finnen für Höhenforschungsraketen bestanden ihren Bewährungstest. Im Gespräch mit der Stuttgarter DLR-Wissenschaftlerin Anna Kolbe.

Sie ähneln in ihrer Form Flügeln, treten paarweise, manchmal auch zu dritt oder viert auf und können von quadratzentimetergroß bis Quadratmetergroß sein. Die Rede ist von Finnen, also den Stabilisierungsflächen, die Höhenforschungsraketen die nötige Stabilität im Flug geben. Anna Kolbe vom Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie im DLR Stuttgart gehört zu dem Team, das sich mit der Entwicklung von Leichtbaustrukturen für die Raumfahrt befasst. Um die Bauteile zu testen, machte sie sich letzten Sommer auf nach Norwegen. Im Juni 2016 startete von der Insel Andøya die Höhenforschungsrakete „Improved Malemute“ für zwei Qualifikationsflüge. Erprobt wurden neben einem neuen Raketenmotor auch Finnen aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK). Nicole Waibel, am DLR-Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie unter anderem für Öffentlichkeitsarbeit zuständig, sprach mit Anna Kolbe über die Tests.

Von der entlegenen Insel im Nordwesten Norwegens aus starten regelmäßig Höhenforschungsraketen. Letzten Sommer war auch eine mit Know-how aus dem DLR Stuttgart dabei. Was war Zweck der Tests?

■ Im Juni 2016 qualifizierte die Mobile Raketenbasis, die MORABA, eine Abteilung vom DLR-Raumflugbetrieb und Astronautentraining in Oberpfaffenhofen, in zwei Flügen eine neue Höhenforschungsrakete, die „Improved Malemute“. Wir arbeiten eng mit der MORABA zusammen und so konnten wir bei dieser Gelegenheit auch Finnen testen. Die erste „Improved Malemute“ startete am 30. Juni 2016 mit Finnen in Metallbauweise, die von der MORABA selbst entwickelt wurden. Mit der zweiten am 8. Juli 2016 hoben dann unsere CFK-Finnen ab. So konnten wir beide Bauweisen hinsichtlich Gewicht und Performance sowohl in Belastungstests als auch im Flug vergleichen.

Im heimischen DLR Stuttgart können Sie die Materialien nicht testen?

■ Nur bis zu einem gewissen Grad. Die komplexen und dynamischen Belastungsbedingungen sind in Boden-Testanlagen nur schwer nachzubilden. So kommt der Qualifikation im Flug eine besondere Bedeutung zu. Der Mitflug auf einer Höhenforschungsrakete war für uns eine tolle – und dazu kostengünstige – Chance.

Was sind die Vorzüge von Finnen aus carbonfaserverstärktem Kunststoff, kurz CFK, gegenüber Metall und welche Schwierigkeiten sind mit deren Bauweise verbunden?

■ Die Schwierigkeit lag darin, ein materialgerechtes Design zu entwickeln, das sowohl wirtschaftlich als auch einfach zu fertigen ist. Wir verfolgten einen hybriden Ansatz, der Verbundwerkstoffe und metallische Werkstoffe kombiniert: Das Finnblatt besteht aus CFK, der Anschluss an die Rakete erfolgt durch einen sogenannten Finnschuh aus Metall. Der Übergang



Bild: DLR/Frank Eppler
Anna Kolbe und Oliver Schatz bereiten eine Finne für die Tests vor ...

muss so ausgelegt werden, dass sich Blatt und Schuh unter Last so verformen, dass das Material keinen Schaden nimmt und kein sogenannter Steifigkeitssprung entsteht. Um das Finnblatt im Finnschuh zu fixieren, haben wir uns für eine Klebung entschieden und auf weitere mechanische Verbindungselemente wie Schrauben verzichtet. Die Zuverlässigkeit der Verbindung wurde vor dem Flug in Belastungstests am Boden nachgewiesen.

Gab es noch andere Fragen, auf die Sie während der Tests in Andøya Antwort suchten?

■ Ja, eine Herausforderung der Bauweise mit Verbundwerkstoffen ist außerdem der Umgang mit den thermischen Lasten. Metallische Finnen verteilen die Wärme sehr gut, wohingegen Verbundwerkstoffe zu Temperaturspitzen neigen. Um einen Thermalschutz zu gewährleisten, haben wir einen Kork-Ablator entwickelt und diesen in Form von Platten aufgeklebt. Das Finnblatt darunter ist wie ein Sandwich aufgebaut: Es besteht im Innern aus einem Schaumkern und dünnen Decklagen aus CFK. Gegenüber der bisherigen, metallischen Bauweise können wir so mehr als ein Viertel ihres Gewichts einsparen. Und noch etwas: CFK-Finnen weisen unter thermischen Lasten eine hohe Stabilität auf, das heißt, sie verziehen sich kaum, was für eine präzise Flugbahn sorgt.



Bild: DLR/Frank Eppler
... und kleben die Kork-Platten auf

Wie fertigen Sie die Finnen?

■ Entsprechend den Vorgaben der MORABA bezüglich Geometrie und Lasten haben wir im ersten Schritt die Finnen entwickelt und ausgelegt. Parallel arbeiteten wir am Kork-Ablator und entwickelten entsprechendes Werkzeug, um die Korkplatten in der benötigten Größe herstellen zu können. Da wir wegen des festen Start-Termins unter hohem Zeitdruck standen, begannen wir sofort mit der Fertigung, nachdem alle bestellten Materialien im DLR eingetroffen waren: Alle fünf Finnen – drei Flugfinnen, eine Ersatzfinne, eine Testfinne – mussten innerhalb von drei Wochen gefertigt, getestet und transportbereit sein. Aufgrund der langen Aushärtezeiten der CFK-Bauteile und Korkplatten in den Öfen war es nicht möglich, die fünf Finnen sequenziell herzustellen. Viele Fertigungsschritte mussten parallel ablaufen – und die Vakuumpumpen und Öfen des Instituts waren im Dauereinsatz. Um sicherzustellen, dass die Finnen für den Qualifikationsflug zugelassen werden, haben wir sie am Boden einigen Tests unterzogen, diese bestätigten die Tragfähigkeit und zeigten eine hohe Steifigkeit. Die Ergebnisse stimmten mit unseren Berechnungen überein.

Sie waren bei den Raketenstarts vor Ort. Wie haben Sie diese erlebt?

■ Schon die Anreise zum Andøya Space Center ist ein Abenteuer: Mit insgesamt drei Umstiegen erreicht man die Insel Andøya von Stuttgart aus schlussendlich mit einer Propellermaschine der Airline Wideroe. Nachdem wir den letzten Feinschliff an den Finnen vorgenommen hatten, montierten Experten der MORABA diese an die Rakete. Als alle Arbeiten abgeschlossen und die „Improved Malemute“ bereit zum Start war, mussten wir noch die richtigen Wetterbedingungen abwarten. Einige Tage zuvor war der erste Flug mit den metallischen Finnen erfolgreich durchgeführt worden, sodass uns der Ablauf bis zum Start bekannt war. Als der Countdown schließlich begann, stieg die Spannung. Die Finnen hatten zwar alle vorangegangenen Tests erfolgreich bestanden, trotzdem hatte ich Herzklopfen im Kontrollraum. Dann hieß es 320 Sekunden mitfiebern – so lange dauerte der Flug. Es hat alles gut geklappt und wir haben uns sehr gefreut: Die Flugbahn der „Improved Malemute“ wurde nominal durchfliegen und die Finnen haben alle an sie gestellten Erwartungen erfüllt.

Was sind Ihre nächsten Ziele?

■ Für die Qualifikation der Finnen wurden alle Schritte – von der ersten Auslegung über die Fertigung, die Qualifikationstests am Boden und die Flugerprobung – durchlaufen. Dadurch haben wir wichtige Erkenntnisse über den gesamten Prozess gewonnen. In Zukunft möchten wir noch mehr Gewicht einsparen und Finnen entwickeln, die komplett aus CFK bestehen – ohne metallischen Finnschuh. Zudem untersuchen wir alternative Thermalschutzsysteme und Hochtemperaturharze. So bauen wir unsere Kompetenzen auf dem Gebiet der aerodynamischen Steuerflächen immer weiter aus.



Bild: DST Group-Brisbane

Anna Kolbe

geboren in Miltenberg in Bayern, studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart. In ihrer Diplomarbeit beschäftigte sie sich mit der Berechnung der Wärmelasten an der Steuerklappe von SHEFEX III. Seit 2014 arbeitet sie in der Abteilung Raumfahrt Systemintegration des DLR-Instituts für Bauweisen und Strukturtechnologie in Stuttgart. Ihre Schwerpunkte liegen auf der Auslegung und Entwicklung von thermisch belasteten Strukturen aus Composite-Werkstoffen.

SHEFEX, SCRAMSPACE, HiFiRE und HEXAFLY – Flugexperimente beim DLR

Da sich Strukturkonzepte und Bauweisen mit thermalen Belastungsszenarien nicht beliebig skalieren lassen, sind Modellversuche, wie sie beispielsweise bei aerodynamischen Untersuchungen in Windkanälen verwendet werden, nicht zielführend. Andererseits sind Tests mit Raumfahrzeugen in voller Größe extrem teuer. Innerhalb des bis 2012 im DLR durchgeführten SHEFEX-Programms (Sharp Edge Flight Experiment, scharfkantiger Flugversuch) konnte ein kostengünstiger Mittelweg gefunden werden.

Höhenforschungsraketen zur Untersuchung spezieller technologischer Problemstellungen liefern wichtige Erkenntnisse. In dieser Tradition beteiligt sich das Institut auch nach Einstellung des SHEFEX-Programms weiterhin an zahlreichen Flugmissionen internationaler Partner. Insbesondere die Zusammenarbeit mit australischen Forschungseinrichtungen, die große Anstrengungen auf dem Gebiet der Hyperschalltechnologie unternehmen, hat sich als sehr produktiv erwiesen. So konnten innerhalb des Projekts Scramjet-based Access-to-Space Systems, kurz SCRAMSPACE, neue vollkeramische Stabilisierungsflossen in integraler Bauweise und ein spezieller, dehnungskompatibler Flügel/Rumpfanschluss zum Ausgleich des sehr unterschiedlichen Thermaldehnungsverhaltens der verwendeten Werkstoffe entwickelt und geflogen werden.

Ebenfalls je vier vollkeramische Flossen wurden auf den Missionen HiFiRE 5 und 5B mitgeflogen. Sie konnten dank umfangreicher Sensorik wertvolle Informationen zu den aerodynamischen Wärmeflüssen beim Wiedereintritt mit circa achtfacher Schallgeschwindigkeit liefern. Das spezielle Messsystem wurde vom Institut für Raumfahrtssysteme IRS der Universität Stuttgart entwickelt. Beim letzten US-amerikanisch/australischen HiFiRE-5B-Flug, der auf dem Testgelände Woomera in Zentralaustralien durchgeführt wurde, konnten sogar zwei der geflogenen Finnen wieder geborgen werden. Für den nächsten HiFiRE-Flug der 5er-Reihe wird zurzeit eine aktiv gekühlte Variante des Finnen-Experiments vorbereitet.

Aber nicht nur Experimente finden ihren Platz auf den Flugkörpern. Auf Basis des ersten SHEFEX-Fluges konnten neue, konturstabile Flügelvorderkanten entwickelt werden, die beim Start und vor allem beim Wiedereintritt in die Atmosphäre einen stabilen Flug der Höhenforschungsraketen gewährleisten. Bei der australischen Mission HiFiRE 3 konnten diese modifizierten Stabilisierungsflossen ihr Können zeigen. Inzwischen gehören diese Elemente zum Standard.

In naher Zukunft stehen in Form des europäischen Projekts HEXAFLY INT (High-Speed Experimental Fly Vehicles International) und des australischen HiFiRE-8-Flugkörpers deutlich komplexere Flugexperimente auf dem Plan, bei denen die Erkenntnisse aus dem SHEFEX-Programm und aus den zahlreichen Mitflügen als „Passagier“ genutzt werden, um die Schlüsselbereiche in der Struktur von Hyperschallgleitern mit DLR-Technologie auszurüsten. Ein notwendiger und wichtiger Schritt, um in der Zukunft rückführbare und wiederverwendbare Raumtransportsysteme realisieren zu können.



Hyperschalltestflug HiFiRE 5B in Woomera, Australien (Mai 2016)

FÜNFBLÄTTRIG LEISER

Weniger Vibrationen und geringerer Lärm bei Hubschraubern

Von Daniel Beckmann

Liegt ein „Teppichklopfen“ in der Luft, ist schnell klar, was dort fliegt – kaum ein Verkehrsmittel lässt sich am Geräusch bereits aus der Ferne so gut erkennen wie ein Hubschrauber. Je lauter dieses Charakteristikum jedoch ist, umso störender ist es für Personen außerhalb des Drehflüglers. Und auch im Hubschrauber wirkt es durch die Vibrationen als Störfaktor. Diese Faktoren zu reduzieren ist das Ziel des Verbundprojekts SKAT (Skalierbarkeit und Risikominimierung von Technologie bei innovativem Design) des DLR-Instituts für Flugsystemtechnik und von Airbus Helicopters.

Neben dem Betriebsgeräusch des Antriebs sind es vor allem die Wirbel an den Blattspitzen, die für die hohe Lärmemission von Hubschraubern verantwortlich sind. Hinter jedem Rotorblatt entstehen durch die Umströmung während der Umdrehung Luftwirbel. Kollidiert ein Rotorblatt mit den konzentrierten Wirbeln des vorherigen Blattes, gibt es eine hörbare Wechselwirkung – das „Teppichklopfen“. Im langsamen Sinkflug tritt es besonders deutlich auf. Deshalb haben die Luftfahrtingenieure neben anderen Flugzuständen speziell den Landeanflug genauer untersucht.

Zuwachs mit Folgen

Eine Möglichkeit, diese Kollisionen zu dämpfen, ist es, den Einstellwinkel der Rotorblätter dynamisch anzupassen. Mit der Mehrfachtaumelscheibe „META“, 2008 entwickelt und patentiert vom DLR, ist es möglich, den Verlauf der Einstellwinkel jedes einzelnen Rotorblattes ohne zusätzliche Aktuatoren und Leitungen im Rotorkopf auf die Fluglage abzustimmen. Gegenüber anderen Steuerungssystemen wird so die Belastung der Steuerungselemente enorm reduziert. Denn diese sind unterhalb des Rotorkopfes montiert und müssen somit nicht mit rotieren. Das Potenzial der Mehrfachtaumelscheibe für weniger Lärm und geringere Vibrationen zeigte sich bereits im Herbst 2015, als die Blätter eines Vierblattrotors im niederländischen Marknesse die Luft im Windkanal der Deutsch-Niederländischen Windkanäle (DNW) durchschnitten. Dass sich diese Methoden und Ergebnisse ebenfalls auf Systeme mit mehr als vier Rotorblättern übertragen lassen, sollte nun das Projekt SKAT anhand eines fünfblättrigen Rotors beweisen.

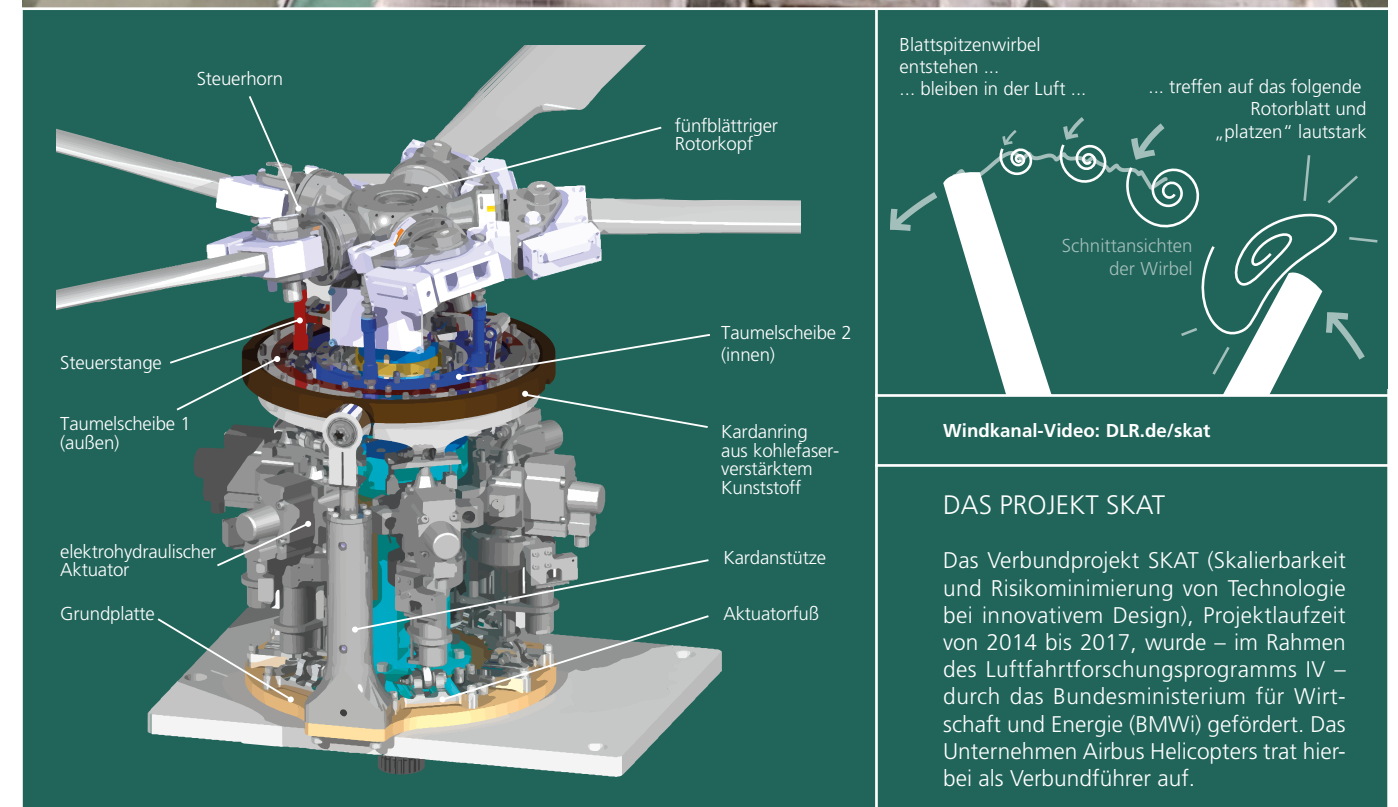
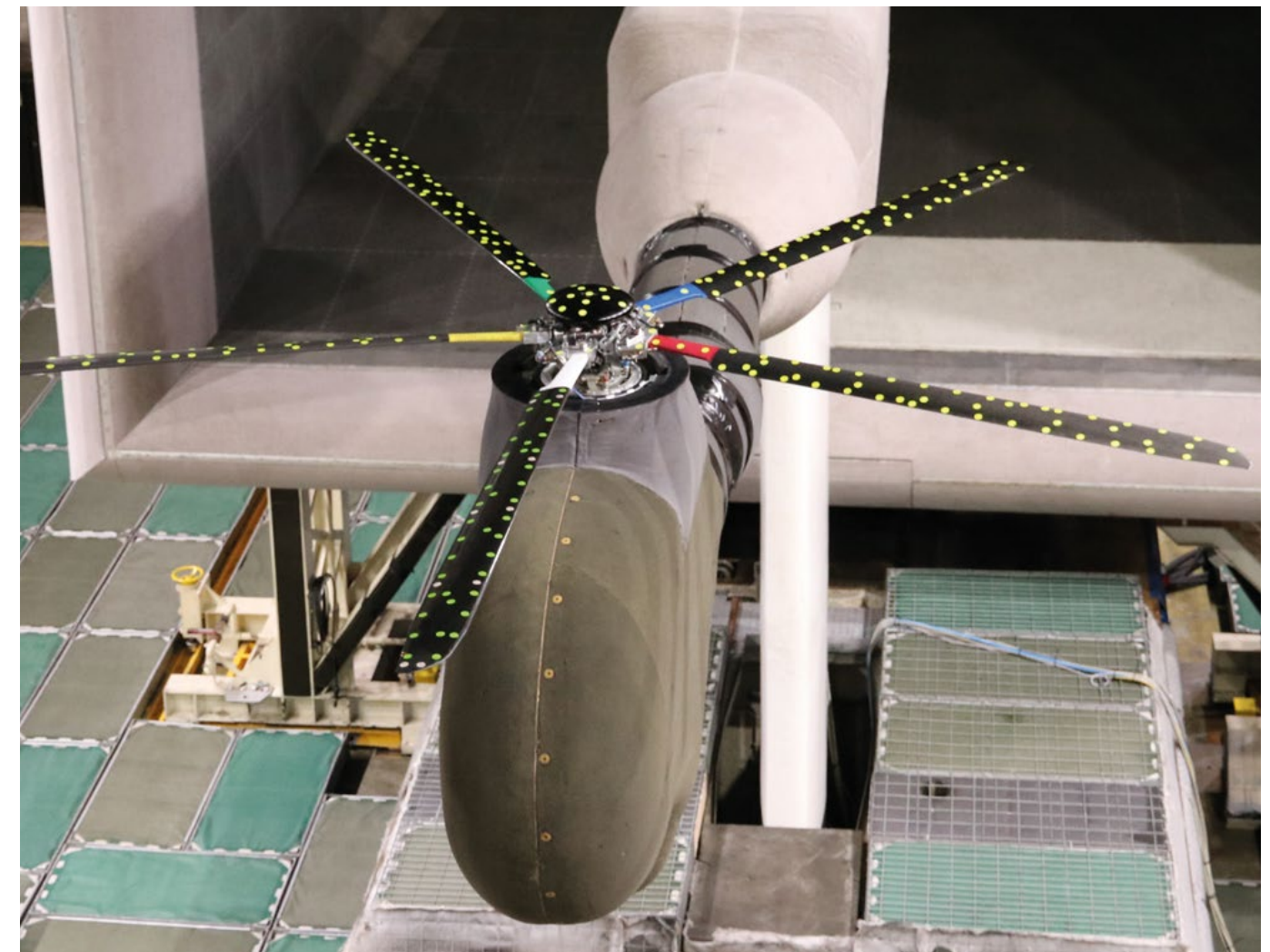
Die ursprüngliche Mehrfachtaumelscheibe war für vier Rotorblätter symmetrisch konstruiert worden. Fünf Rotorblätter hingegen erfordern eine asymmetrische Konstruktion der beiden Taumelscheiben. Die Wissenschaftler und Ingenieure um Projektleiter Philip Küfmann mussten META also weiterentwickeln: „Hierzu war es nötig, einen Rotorkopf für fünf Blätter zu konstruieren, der kompatibel mit dem DLR-Rotorversuchsstand ist. Dafür mussten wir auf dem bisher vierblättrig bestückten Modellrotorkopf Anschlüsse für fünf Rotorblätter unterbringen.“ Dies betraf auch die Elektronik und Sensorik. Dafür entwarfen die Ingenieure ein gänzlich neues Gehäuse, das sie auf den Rotorkopf montierten.

Neben der Konstruktion selbst hatte das Team die asymmetrische Ansteuerung der Rotorblätter zu bewerkstelligen. Während beim vierblättrigen System nur eine einfach zu handhabende Frequenzansteuerung für den Blatteinstellwinkel und die Aktuatoren der Taumelscheiben nötig war, erfordert das fünfblättrige System weit mehr Fingerspitzengefühl. „Um die Blatteinstellwinkel im drehenden System mit einer festen Frequenz zu verändern, müssen an den Aktuatoren bis zu drei Frequenzen überlagert und die Positionen der Aktuatoren präzise geregelt werden. Darüber hinaus reagiert das System deutlich empfindlicher auf kleine Abweichungen in der Aktuatorsteuerung“, verdeutlicht Küfmann die Sachlage. Deshalb verbesserten die Ingenieure die Positionsregelung der Aktuatoren stark und fügten dem System eine aktive Nachregelung der Blatteinstellwinkel hinzu, wodurch die Einstellwinkeländerungen schnell, exakt und zuverlässig vorgenommen werden konnten.

Nach den Änderungen und Verbesserungen an der Mehrfachtaumelscheibe wurde das System zusammen mit dem neuen Fünfblattrotorkopf sowie der gesamten Messelektronik auf dem Rotorversuchsstand montiert. Im niederländischen Marknesse sollten die zweiwöchigen Versuche die Reduktion von Lärm und Vibrationen nachweisen. Dazu wurden auf den Rotorblättern Drucksensoren montiert. Sie sollten den Ingenieuren in der Steuerzentrale Aufschluss über die Wirbel-Interaktionen geben. Die akustische Messanlage der DNW misst zudem minimalste Veränderungen der Lautstärke. Und bis zu acht Hochgeschwindigkeitskameras zeichnen die Deformation der Blätter auf.

Surren statt „Teppichklopfen“

Als Ergebnis konnte im Windkanal für den Landeanflug eine Lärminderung um drei Dezibel nachgewiesen werden, und zwar an modernen, ohnehin bereits lärmarmen Rotorblättern. Gegenüber herkömmlichen Landeanflügen bedeutet dies eine Senkung der Lärmemission um mehr als 30 Prozent. Auch die Vibrationen, die besonders für die Insassen im Hubschrauber spürbar sind, wurden mit Hilfe eines erstmals eingesetzten adaptiven Reglers um über 80 Prozent gesenkt. Das Verbundprojekt von DLR und Airbus Helicopters hat gezeigt, dass die Steuerungsstrategien der Mehrfachtaumelscheibe von einem Vierblattrotor auf ein Fünfblattsystem mit ähnlicher Reduktion von Lärm und Vibrationen übertragbar sind. Die nun doppelt erprobte Technik wird Konstrukteure neuer Hubschrauber bei der Effizienzsteigerung und Emissionsreduzierung unterstützen. So dürfte das „Teppichklopfen“ bald nur noch als ein leises Surren wahrzunehmen sein.



Windkanal-Video: [DLR.de/skat](https://www.dlr.de/skat)

DAS PROJEKT SKAT

Das Verbundprojekt SKAT (Skalierbarkeit und Risikominimierung von Technologie bei innovativem Design), Projektlaufzeit von 2014 bis 2017, wurde – im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms IV – durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Das Unternehmen Airbus Helicopters trat hierbei als Verbundführer auf.

ERSTFLUG DES ROCHENS

Premiere im Simulator – der gemeinsame Flugzeugentwurf macht's möglich

Von Falk Dambowsky

Die Fluggäste auf der äußeren rechten Seite werden sanft in die Sitze gedrückt, während sich die Passagiere links außen kurz etwas leichter fühlen. Nun geht der Pilot in eine Linkskurve. Er weiß, dass er bei solchen Manövern behutsam mit seinen 450 Passagieren sein muss. Er sitzt am Steuer eines Blended Wing Body, kurz als BWB bezeichnet, einer rochenförmigen Flugzeugkonfiguration, bei der sich der Rumpf weit in die Breite streckt und zusätzlich zu den Tragflächen Auftrieb erzeugt.

Das Cockpit, das diesen spektakulären Ausblick in die Zukunft des globalen Interkontinentalverkehrs erlaubt, ist ein Simulator am DLR in Braunschweig. Und am Steuer des bisher nur im Rechner existierenden BWB sitzt Yasim Julian Hasan vom DLR-Institut für Flugsystemtechnik. Er hat die Flugeigenschaften des ungewöhnlichen Luftfahrzeugs untersucht. „Der BWB fliegt sich trotz seiner ausgedehnten Form und dem großen Trägheitsmoment recht agil in der Rollbewegung, also in der Drehung um die Flugzeuglängsachse“, sagt er und fliegt eine weitere langgezogene Kurve. „Problematisch ist allerdings ein kräftiger Tritt in das Seitenruder“, so Hasan. „Dabei stellt sich ein ungünstiger seitlicher Schiebewinkel ein, der beim BWB die nicht ausreichend gedämpfte Taumelschwingung, eine gekoppelte Schwingung um die Hoch- und Längsachse, anregt.“ Beim Blick aus dem Cockpitfenster bekommt man das Gefühl, als wandere die entfernte Landschaft am Boden in einer leichten kreisförmigen Bewegung langsam hin und her. Mit einem kombinierten Ausschlag von Quer- und Seitenruder dämpft Hasan die Schwingungen und nimmt wieder ruhigen Kurs auf. „Zukünftig wird der BWB ein spezielles Regelungssystem benötigen, das unter anderem die Taumelschwingung stabilisiert“, erklärt Hasan, um dann noch eine Besonderheit des majestätischen Rochenjumbos vorzuführen. Er beschleunigt mit den drei oben am hinteren Ende des Rumpfes montierten Triebwerken. Dabei beginnt die Nase langsam nach unten zu kippen. „Durch die ungewöhnliche Lage der Triebwerke oben auf dem Rumpf erzeugt die Schuberrhöhung ein abnickendes Moment, das durch ein Ziehen am Höhenruder ausgeglichen werden muss“, so Hasan. „Diese Besonderheiten des BWB bezüglich der Steuerbarkeit konnten schon mit numerischen Tools theoretisch berechnet werden, im Simulator-Flug lässt sich nun aber eine erstaunliche Detailtiefe der Flugeigenschaften erfahrbar machen.“

Es ist eine Premiere, dass ein Blended Wing Body virtuell im Simulatorzentrum AVES (Air Vehicle Simulator) in Braunschweig fliegt. Dieser Erstflug ist dem DLR-Forschungsprojekt FrEACs (Future Enhanced Aircraft Configurations) zu verdanken, das sich seit 2014 mit der ganzheitlichen Auslegung eines mittelgroßen BWB für die Langstrecke beschäftigt hat. „Insgesamt elf verschiedene DLR-Institute haben ihre Expertise beim Design und bei der Bewertung des BWB eingebracht“, sagt Projektleiter Till Pfeiffer von der DLR-Einrichtung Lufttransportsysteme in Hamburg. „Der Erstflug im Simulator ist die bisherige Krönung unserer Arbeit.“

Dabei stand am Anfang bis auf die grundlegende Form eines BWB gar nicht fest, wie dieser idealerweise konkret auszusehen hat. „Wir hatten zwischen den diversen Fachdisziplinen ganz unterschiedliche Varianten in der Diskussion“, so Pfeiffer. „Darunter Varianten mit kleinen Vorflügeln, mit einem oder zwei Triebwerken unter der Tragfläche oder einem klassischen Seitenleitwerk über dem Heck.“ Schließlich ergab sich als präferierte Variante ein BWB mit drei nebeneinander über dem Heck montierten Triebwerken, die von zwei Seitenleitwerken eingerahmt werden. Als Höhenruder dienen Klappen am Heck des Mittelsegments. „Durch diese Form fliegt der BWB sehr treibstoffsparend und die Platzierung der Triebwerke über dem Rumpf macht ihn zudem besonders leise.“

In Design-Camps trafen sich bis zu 20 DLR-Forscher – vom Verantwortlichen für den Flugzeugentwurf, der das Gesamtkonzept und die Rumpfform entwickelt, über den Aerodynamiker, den Triebwerkstechniker bis hin zum Flugmechaniker, der schließlich das Flugverhalten des fertigen Modells analysiert. „Normalerweise arbeitet jede Fachdisziplin für sich isoliert und übergibt ihre Auslegungsergebnisse an die nächste Fachdisziplin“, erklärt Pfeiffer. „Wir hingegen haben in enger Abstimmung eine gemeinsame Prozesskette aufgebaut, in der alle Disziplinen mit demselben Datensatz arbeiten.“



Grafische Darstellung der Entwicklungsschritte



Dafür wurde am DLR eigens ein spezielles Datenformat, genannt CPACS (Common Parametric Aircraft Configuration Scheme), entwickelt. Dieses ermöglicht es, direkt darzustellen, wie sich Konstruktionsänderungen einer Disziplin auf die anderen auswirken. „Wenn zum Beispiel der Aerodynamiker gern einen schmaleren Flügel bauen möchte, kann in unserem System direkt abgeklärt werden, ob dadurch unter Umständen auch ein kleineres Triebwerk verwendet werden kann und ob diese Änderungen sich auf die Struktur oder die einzubauenden Flugsteuerungssysteme auswirken“, so Pfeiffer. „Wir sind im Miteinander der Disziplinen beim Flugzeugentwurf deutlich flexibler geworden.“

Diese neugewonnene Flexibilität konnten die Forscher nun auch auf den Erstflug eines neuen Modells im Simulator ausweiten. „Im klassischen Flugzeugentwurf wurden Simulatorversuche von Forschung und Industrie erst dann durchgeführt, wenn das neue Modell weitestgehend von allen Disziplinen optimiert worden war“, erläutert Pfeiffer. „Mit unserer anhand des BWB-Erstflugs demonstrierten Schnittstelle zwischen Modell und Simulator können nun neue Flugzeugkonfigurationen schon in einem sehr frühen Stadium von Piloten virtuell geflogen und bewertet werden.“

Man darf gespannt sein, welche futuristischen Entwürfe demnächst in Braunschweig virtuell abheben.

www.cpacs.de

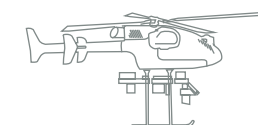


DAS PROJEKT FREACS

Das DLR-Projekt FrEACs (Future Enhanced Aircraft Configurations) hatte das Ziel, Unsicherheiten im Entwurfsprozess zu quantifizieren und diese im Entwurf zweier unkonventioneller Flugzeugkonfigurationen zu berücksichtigen. Für die Langstrecke und einen geplanten Markteintritt ab 2035 wurde ein Blended Wing Body (BWB) betrachtet, daneben eine innovative Kurzstreckenkonfiguration. Im DLR bereits vorhandene Bewertungsverfahren für Flugzeuge hinsichtlich Kosten, luftseitiger Kapazität und Lärm wurden in den Entwurfsprozess integriert. Das Projekt mit einer Laufzeit von drei Jahren (2014 bis 2017) war mit einem Budget von rund sechs Millionen Euro ausgestattet. Insgesamt elf DLR-Institute und -Einrichtungen beteiligten sich: die Institute für Aerodynamik und Strömungstechnik, Aeroelastik, Antriebs-technik, Bauweisen und Strukturtechnologie, Faserverbund-leichtbau und Adaptronik, die Institute für Flugführung, Flugsystemtechnik, Systemdynamik und Regelungstechnik ebenso wie das Systemhaus Technik und die Einrichtungen für Simulations- und Softwaretechnik sowie Lufttransportsysteme (Leitung).



EIN NAVI FÜR FREMDE PLANETEN



Hubschrauber superARTIS wird zur Landefähre: DLR-Forscher testen die autonome Mondlandung auf einem irdischen Flugfeld

Von Anna Boos und Manuela Braun

80 Planen, bedruckt mit Kreisen, halb in Schwarz, halb in Weiß, auf einem fünf Hektar großen Testfeld in der Nähe von Braunschweig – für einen Tag stellt dieses Szenario den Mond mit seiner Kraterlandschaft nach. Der unbemannte DLR-Forschungshubschrauber superARTIS (Autonomous Rotorcraft Testbed for Intelligent Systems) wird zum Landefahrzeug, soll autonom über die simulierte Mondoberfläche schweben und die Landestelle anfliegen. Das war 1969 noch ganz anders. Als die Landefähre der Apollo-11-Mission auf die Mondoberfläche zuflog, mussten Neil Armstrong und Buzz Aldrin nämlich feststellen: Die vorgesehene Landestelle war mit Felsbrocken bedeckt – ein ungünstiger, ja sogar gefährlicher Landeplatz. Damals griff Neil Armstrong ein und dirigierte per Handsteuerung die „Eagle“ über den felsigen Mondboden, um auf einer ebenen Stelle sicher landen zu können. Ohne den Menschen wäre die Landung unmöglich gewesen. Die Autopiloten jener Zeit waren nicht in der Lage, gefährliche Stellen automatisch zu erkennen und ihnen auszuweichen.

Heute untersuchen Wissenschaftler des DLR, wie Landefahrzeuge möglichst autonom und präzise zu einem optimalen Landeplatz navigieren können. ATON (Autonomous Terrain-based Optical Navigation) heißt das DLR-Projekt, an dem vier Institute und eine Software-Einrichtung beteiligt sind. Das Ziel der Wissenschaftler: die Entwicklung einer Software, die bei einem Landeanflug auf den Mond – oder einen anderen Himmelskörper – aufgenommene Bild- und Sensordaten automatisch auswertet, sich an der Topografie des Himmelskörpers orientiert und dabei in Echtzeit die Position, die Geschwindigkeit und die Lage des Raumfahrzeugs bestimmt. Dabei werden die Daten von Kameras und Laserscannern mit denen von Beschleunigungs- und Drehratensensoren kombiniert.

Schrubben für den Flugversuch

Auf dem Flugversuchsgelände in der Nähe von Braunschweig werden nun als Erstes die „Krater“ geschrubbt: Regen und Wind der vergangenen Wochen haben die Folien, die von den Forschern des DLR als kraterähnliche Mondlandschaft ausgelegt worden sind, mit Staub und Schmutz bedeckt. Der Durchmesser der Planen reicht von fünf Metern beim größten Krater bis zu gerade einmal zwanzig Zentimetern beim kleinsten Krater. „Unsere Navigationskamera orientiert sich an den Kontrasten der hellen und dunklen Flächen. Wenn diese durch die Software nicht eindeutig als echte Krater zu identifizieren sind, kann dies am Ende die Navigationsqualität beeinträchtigen“, erklärt Bolko Maass vom DLR-Institut für Raumfahrtssysteme.

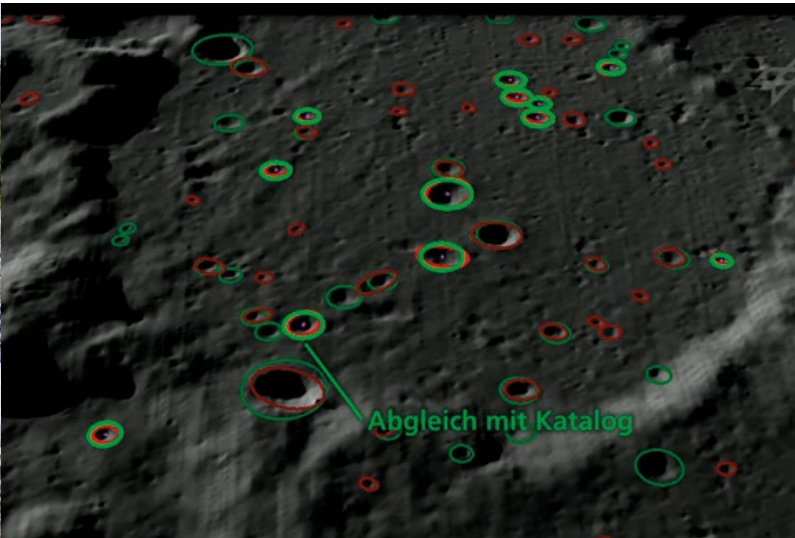
Seit sieben Jahren forschen die Wissenschaftler bereits an dem Projekt. Mit der Erstellung eines realistischen Simulationsmodells unter Nutzung von verfügbaren Monddaten sind sie vor fünf Jahren ihrem Ziel einen ersten großen Schritt näher gekommen. „Mit der ATON-Simulation haben wir ein komplettes 3D-Modell des Mondes und eine Simulationssoftware entwickelt, die Bilder berechnet, wie sie eine Kamera an Bord einer Landefähre sehen würde“, erklärt Projektleiter Stephan Theil vom Institut für Raumfahrtssysteme.



Bild: DLR/Moritz Küster
Hans Krüger vom Institut für Raumfahrtssysteme konfiguriert die Onboard-Sensorik für den ersten Flugversuch



Bild: DLR/Moritz Küster
Planen bilden die Krater nach. Damit die Kamera die Kontraste fehlerfrei erkennen kann, müssen sie sauber sein.



Abgleich mit Katalog



Bild: DLR/Moritz Küster
Nikolaus Ammann (rechts) und Daniel Lüdtké überwachen den Flugversuch aus der Bodenstation



Bild: DLR/Marek Kruszewski
Sicherheitspilot Michael Kislat-Schmidt macht superARTIS startklar

„Wie ein Pilot, der zur Orientierung aus dem Fenster schaut, soll die Software während des Landeanflugs die Kamerabilder nutzen, um selbstständig festzustellen, wo sich die Landefähre befindet und in welche Richtung sie sich bewegt.“ Krater oder auch andere markante Punkte auf dem Mond dienen dabei als Landmarken, die das System in Kombination mit den anderen Sensorinformationen zur Positionsbestimmung verwendet. Sind keine derartigen Landmarken zu erkennen, nutzt die Software die in den Bildern sichtbaren Bewegungen zur Navigation. Am Ende der Landung kann damit eine Positionsgenauigkeit von etwa einhundert Metern erreicht werden.

Fit für Mond und Asteroiden

Die ersten Prüfungen auf Genauigkeit hat die Navigationssoftware in den vergangenen Jahren bereits in Simulationen und in Laboruntersuchungen bestanden. So wurde nach der erfolgreichen Simulation des Landeanflugs die entwickelte Software in der TRON-Anlage (Testbed for Robotic Optical Navigation) des Instituts für Raumfahrtssysteme in Bremen getestet. Dort wurde die Bewegung relativ zu einem Mondmodell mit einem Roboterarm nachgebildet, der mit einer Kamera ausgestattet war. Das Mondmodell selbst bildet Krater und andere Strukturen dreidimensional ab, und mit einem weiteren Roboterarm mit einer Lampe als „Sonnenersatz“ können Beleuchtung und Schatten realitätsnah erzeugt werden. Die Entwicklung wurde mit dem Ziel weitergeführt, die Technologien für eine zukünftige Mission zum Mond oder zu Asteroiden reif zu machen. Dafür haben die Wissenschaftler Algorithmen und Software weiterentwickelt und optimiert sowie für den Betrieb auf Echtzeitrechnern implementiert.

Statt auf fernen Himmelskörpern soll ATON jetzt aber zunächst im Flugversuch die Probe bestehen. Es herrscht konzentrierte Stille an der simulierten Mondlandschaft. Jeder weiß, was jetzt zu tun ist, und die Handgriffe sitzen. Die mobile Bodenstation wird in Position gebracht, Antennen für den Funkverkehr werden aufgestellt, die je 1,30 Meter langen Rotorblätter am Hubschrauber befestigt und die angebrachte Sensorik wird ein weiteres Mal kontrolliert. „Die Aufgaben bei unseren Flugversuchen mit superARTIS sind klar verteilt“, erklärt Flugversuchsleiter Stefan Krause vom DLR-Institut für Flugsystemtechnik, der für den korrekten und sicheren Ablauf der heutigen Flüge verantwortlich ist. Zum Team gehören außerdem ein Sicherheitspilot, der bei Bedarf die Steuerung des unbemannten Hubschraubers übernimmt, sowie drei Wissenschaftler, die in der Bodenstation die Flugregelung und die ATON-Software überwachen.

Sicherheitspilot Michael Kislat-Schmidt trägt eine orangefarbene Warnweste und darf als Einziger wenige Meter entfernt von superARTIS auf dem Flugfeld stehen. Die anderen Kollegen befinden sich in der mobilen Bodenstation oder im dahinterliegenden Sicherheitsbereich.

Kislat-Schmidt hebt als Startzeichen seinen Daumen in die Luft. Mit der Fernbedienung in der Hand lässt er den unbemannten Hubschrauber starten. Die Rotorblätter beginnen sich zu drehen und wirbeln eine kleine Staubwolke auf. Sanft lösen sich die Kufen des 85 Kilogramm schweren Fluggeräts vom Boden und superARTIS hebt ab. Einmal in der Luft übernimmt Andreas Voigt aus der Bodenstation die Kontrolle und gibt dem unbemannten Hubschrauber das Kommando, wohin er fliegen soll – zum Startpunkt seiner Mondmission.

Kameras, Sensoren und Scanner

50 Meter schwebt der unbemannte Hubschrauber über dem Boden, die Sensoren auf das Flugfeld und die Kraterlandschaft unter ihm gerichtet. Mit ganzen 25 Kilogramm Nutzlast ist superARTIS für den simulierten Landeanflug auf den Mond ausgerüstet. Zur Sensorik gehören neben zwei Navigationskameras auch ein Beschleunigungs- und Drehratensensor und ein Laserscanner. In der Bodenstation überwacht Daniel Lüdtké von der DLR-Einrichtung Simulations- und Softwaretechnik die Bildschirme und kontrolliert, ob die Werte der Sensoren in der ATON-Software korrekt zusammenlaufen. „Ok, die ATON-Software läuft“, gibt er das Startzeichen für den Missionsflug. Nikolaus Ammann vom DLR-Institut für Flugsystemtechnik schaltet von der Hubschrauber-eigenen Sensorfusion auf die ATON-Sensorfusion um: Ab jetzt navigiert superARTIS über die Mondlandesoftware und folgt selbstständig der vorgegebenen Landetrajektorie.

Mit einer Geschwindigkeit von einem Meter pro Sekunde sinkt der unbemannte Hubschrauber sanft in Richtung Boden. Daniel Lüdtkés Blick in der Bodenstation ist weiterhin konzentriert auf die Bildschirme gerichtet. Die ATON-Software erkennt anhand der Schwarz-Weiß-Kontraste die Kraterflächen und setzt an markanten Bildpunkten grüne Marker. „Basierend auf diesen im Kamerabild erkannten Kratern und den Bewegungen, die in den Bildern erkennbar sind, können wir auf die Position des Fluggeräts schließen“, erklärt Lüdtké. „Die ATON-Sensorfusion kombiniert diese Positionsdaten mit weiteren Sensordaten und bestimmt so den einheitlichen Flugzustand, also die Position, die Geschwindigkeit und die Lage des Fluggeräts“, ergänzt Ammann. „Dieser aus optischen Navigationsdaten berechnete Flugzustand ist unabhängig von GPS und kann in gleicher Art und Weise auch auf dem Mond bestimmt werden.“

Die Krater weisen superARTIS seinen sicheren Weg zum Landeplatz. Der unbemannte Hubschrauber hat seine Mission als Landefähre erfüllt. Für die DLR-Wissenschaftler heißt es nun, die beim Flugversuch gesammelten Daten auszuwerten. Die Sensordaten aus dem Flugversuch können sie wieder in die Simulation einspielen und so den Flugversuch virtuell erneut durchführen. Damit kann die Software weiter optimiert werden. Das Projekt ATON ist mit den durchgeführten Flug-

Übersät mit Kratern und Unebenheiten ist der Mond in der simulierten Kameraansicht zu sehen, während sich virtuell eine Landefähre der Oberfläche nähert. Für das Computermodell haben die Wissenschaftler unter anderem auf Daten der amerikanischen Lunar Reconnaissance Orbiter-Mission und der japanischen Kaguya-Mission zurückgegriffen. Um die Mondsimulation möglichst realistisch zu gestalten, mussten zum Beispiel auch die Sonneneinstrahlung und die Eigenbewegung des Mondes im Weltall berücksichtigt werden. Neben den von der Kamera „gesehenen“ Bildern erzeugt die Simulation auch die realistisch berechneten Daten der weiteren Sensoren an Bord der Landefähre, wie die Beschleunigungsmessungen oder die Ausgabe des Laserscanners zur Entfernungsmessung.

versuchen erfolgreich abgeschlossen. Die Erkenntnisse daraus werden die Wissenschaftler in die Weiterentwicklung des ATON-Navigationssystems einfließen lassen. Langfristiges Ziel der DLR-Forschung ist es, ein „Navi“ für zukünftige Raumfahrtmissionen mit Landefähren zur Erforschung von Planeten, Monden und Asteroiden zu entwickeln und zu bauen.

Präzise landen neben der Mondbasis

Erforderlich geworden ist das „Navi für den Mond“ unter anderem durch die gestiegenen wissenschaftlichen Anforderungen an unbemannte Missionen. „Dann heißt es: Wir würden gerne an diesem Krater oder an diesem Riss landen“, erläutert Projektleiter Stephan Theil. „Zum Beispiel wäre eine Landung am Südpol des Mondes für die Forschung interessant, ebenso die Landung auf vergleichsweise schmalen Kraterrändern oder in der Nähe einer zukünftigen Mondbasis. Eine Landefähre so sicher und präzise zu navigieren, stellt heutzutage aber noch eine große Herausforderung dar. Erreicht man die Genauigkeit nicht, besteht die Gefahr, dass die Landefähre zum Beispiel im Kratergrund im ewigen Schatten landet und somit verloren wäre.“ Nur präzise Landemanöver und eine Bewertung des Landeplatzes in Echtzeit mit einem Navigationssystem würden diese Gefahr minimieren. „Mit ATON sind wir diesem Ziel einen guten Schritt näher gekommen“, sagt Theil.

Anna Boos ist im DLR-Institut für Flugsystemtechnik unter anderem mit der Öffentlichkeitsarbeit betraut. **Manuela Braun** ist DLR-Weltraumredakteurin.

BETEILIGTE INSTITUTE

Institut für Raumfahrtssysteme (DLR.de/irs) –
Abteilung Navigations- und Regelungssysteme

Institut für Flugsystemtechnik (DLR.de/ft) –
Abteilung Unbemannte Luftfahrzeuge

Institut für Optische Sensorsysteme (DLR.de/os) –
Abteilung Informationsverarbeitung optischer Systeme

Institut für Robotik und Mechatronik (DLR.de/mc/rm) –
Abteilung Perzeption und Kognition

DLR-Einrichtung für Simulations- und Softwaretechnik (DLR.de/sc) – Abteilung Software für Raumfahrtssysteme und interaktive Visualisierung

EIN HAUS AUF DEM MOND



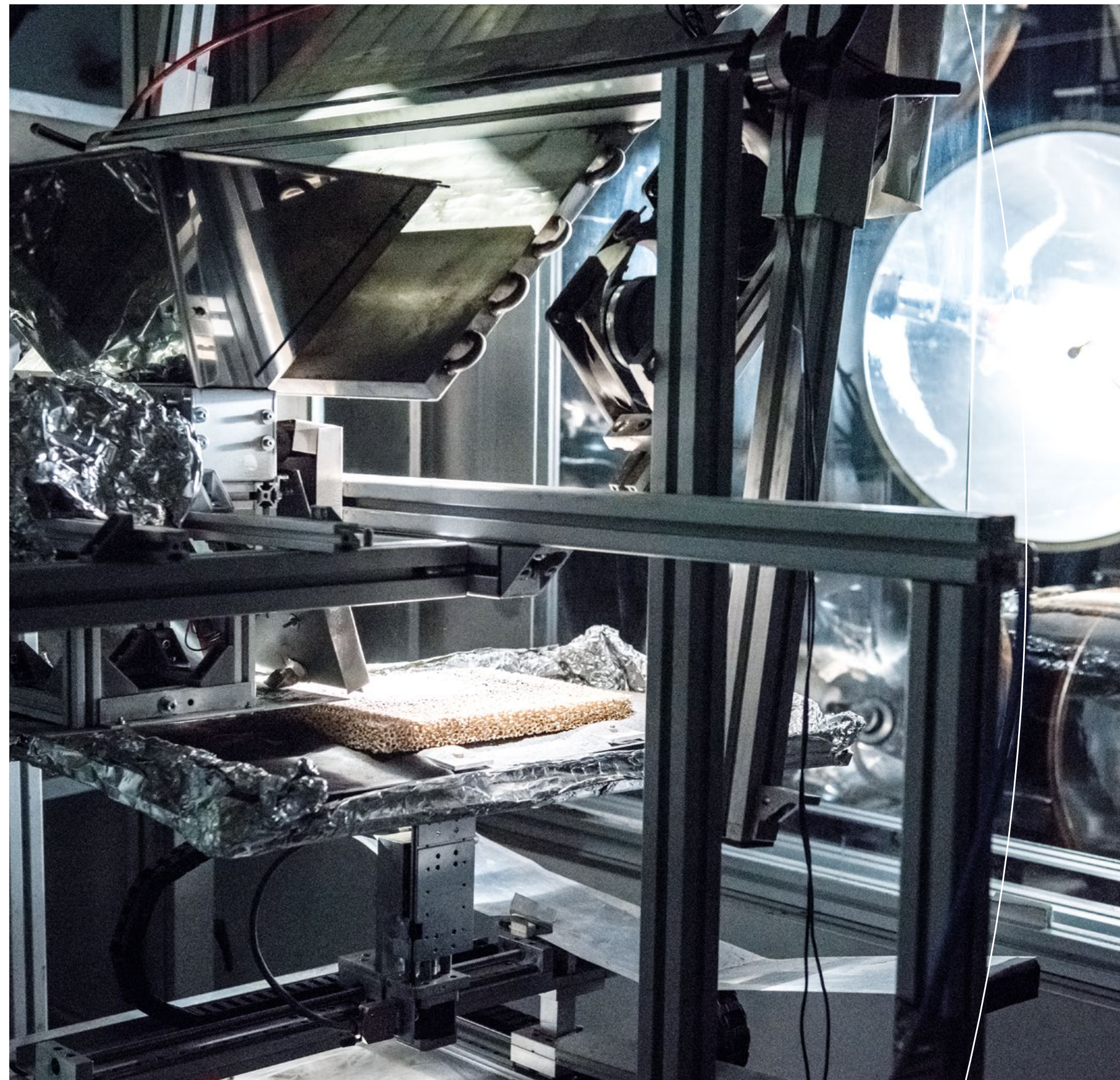
Materialphysiker und Solarforscher des DLR „backen“ Ziegelsteine für Habitate

Von Manuela Braun

Der grau-schwarze Staub, abgefüllt in ein Glas, sieht unspektakulär aus. Würde man jetzt etwas hektisch das Gefäß öffnen, würde sich das feine Material schnell verteilen und wäre da, wo man es nicht gebrauchen kann. Unter dem Mikroskop würde sich zeigen, dass der Stoff nicht so homogen ist, wie er scheint. „Dort sieht man dann die unterschiedlichsten Farben, manche Körner sind braun oder grün, manche durchscheinend“, sagt Miranda Fateri vom DLR-Institut für Materialphysik im Weltraum. Der feine Sand heißt JSC-2A und ist ein anerkanntes Simulat für Mond-Regolith. Am nächsten kommt ihm noch die irdische Vulkanasche, wie man sie beispielsweise in der Eifel findet. Würde der Staub tatsächlich vom Mond stammen, wäre er unbezahlbar – echter Mondstaub ist auf der Erde enorm kostbar. Neil Armstrong und Buzz Aldrin brachten gerade einmal 21,6 Kilogramm Gestein von ihrer Reise mit. Insgesamt lagern nach sechs Missionen zum Erdtrabanten nur 382 Kilogramm Mondsteine, Sand und Staub im Mondproben-Labor des Johnson Space Center in den USA.

Bauen mit den Ressourcen vor Ort

Auf dem Mond allerdings, dort gibt es den grau-schwarzen Regolith reichlich und umsonst, in allen Formen. Um herauszufinden, wie man auf dem Mond aus diesem Material unter anderem Habitate für Astronauten bauen kann, arbeiten die Materialphysiker Miranda Fateri, Alexandre Meurisse und Professor Matthias Sperl auf der Erde mit dem Simulat, das weltweit von nur wenigen Unternehmen nach dem Vorbild der Mondproben hergestellt wird. Dazu „backen“ sie im Sonnenofen des DLR mit Sonnenkraft Ziegelsteine aus Regolith. „Wir nehmen das, was wir auf dem Mond als Ressourcen vorfinden: Regolith als Rohstoff, der in Massen vorhanden ist, und die Sonne als Energiequelle, die vor Ort unerschöpflich ist“, sagt Projektkoordinator Matthias Sperl. Das ist nicht nur praktisch, sondern spart auch Geld, wenn in Zukunft einmal Menschen auf dem Mond arbeiten und forschen sollen. Sperl überschlägt das schnell und rechnet im Kopf ein Beispiel durch: Wenn der Transport von einem Kilo zum Mond etwa 100.000 Euro kostet und man 5.000 Ziegel mit je zehn Kilogramm Gewicht benötigt, um ein überschaubar großes Habitat zu bauen, müsste man allein fünf Milliarden Euro investieren, um die Ziegel von der Erde zum Mond zu fliegen. Setzt man hingegen auf die Ressourcen vor Ort, müsste lediglich ein Apparat zum Mond transportiert werden, der dort die Ziegelsteine herstellt.



Im Sonnenofen des DLR in Köln nutzen die Materialphysiker die Kraft gebündelter Sonnenstrahlen, um aus lockerem Pulver feste Ziegelsteine herzustellen

Habitat in internationaler Kooperation

Das Projekt „Regolight“, eine Wortzusammensetzung aus „Rego“ und „light“ (Licht) ist dabei international und interdisziplinär: Neben dem DLR-Institut für Materialphysik im Weltraum und dem DLR-Institut für Solarforschung in Deutschland sind das belgische Unternehmen Space Applications Services, die LIQUIFER Systems Group und das Ingenieurbüro Bollinger, Grohmann, Schneider aus Österreich sowie die Firma COMEX aus Frankreich beteiligt. Das langfristige Ziel: Robotisch werden auf dem Mond aus dem Regolith Schicht für Schicht verzahnbare Bauelemente gebacken, indem die Energie der Sonne über eine Linse oder ein Spiegelsystem gebündelt und auf den Baustoff gerichtet wird. Das daraus gebaute Habitat soll stabil sein und zugleich auch einen Schutz vor der schädlichen Weltraumstrahlung bieten. Ein mögliches Konzept ist dabei eine aufblasbare Kuppel, die mit den Regolith-Ziegelsteinen überbaut und anschließend mit weiterem Mondstaub bedeckt wird.

Schicht für Schicht zum Stein

Doch bevor dies Wirklichkeit werden kann, ist Grundlagenforschung notwendig. „Wir haben mittlerweile schon bewiesen, dass man aus Regolith mit Sonnenenergie Bauelemente fertigen kann“, sagt DLR-Doktorand Alexandre Meurisse. „Der 3D-Druck, also der Materialaufbau Schicht für Schicht, ist eine praktikable Methode.“ Allerdings: Ziegelsteine der ersten Generation – bröcklig und an den Seiten unregelmäßig geformt – hätten nur ein recht klägliches Habitat ergeben. Doch für die Materialphysiker, die das Projekt 2015 im Auftrag der Europäischen Weltraumorganisation ESA aufnahmen und seit 2016 mit EU-Mitteln als Horizon2020-Projekt fortsetzen, barg der Stein Informationen in sich, die wertvolle Rückschlüsse zuließen.

Um diesen ersten Ziegel zu bauen, fokussierten die DLR-Solarforscher die 159 sechseckigen Spiegel ihres Sonnenofens auf einen Behälter mit Regolith-Simulat. Dieser wurde auf einem Tisch kontinuierlich mit einer vorab eingestellten Geschwindigkeit bewegt, sodass unter dem gebündelten Sonnenstrahl der körnige Regolith sinterte. Dabei bleibt die Temperatur mit etwa 1.100 Grad Celsius knapp unter der Schmelztemperatur – statt zu schmelzen verbacken die einzelnen Bestandteile des Mond-Simulats miteinander. Das Sonnenlicht, das mit einer Leistung von einem Kilowatt pro Quadratmeter auf die Erde

auftrifft, wird dabei so fokussiert, dass es schließlich im Experiment mit einem Megawatt das Tausendfache dieser Leistung liefert. Nach und nach werden dann weitere Schichten des Regoliths aufgetragen, und der Ziegelstein gewinnt an Dicke. „Aber bei unserem ersten Test entstand ein unregelmäßiger Ziegel, der an einigen Stellen bereits geschmolzen war, an anderen noch nicht mal gesintert“, beschreibt Miranda Fateri das Ergebnis erster Experimente.

Ein Baustoff mit Hindernissen

Regolith ist nämlich kein einfaches Material: Es besteht aus verschiedenen Mineralien mit unterschiedlichen Schmelztemperaturen und inhomogenen Körner-Größen. Meteoriteneinschläge auf dem Mond haben es verändert, sodass es teilweise kristalline, also geordnete, aber auch einen größeren Anteil amorphe, also ungeordnete, Strukturen aufweist. Zudem funktioniert die irdische Sonnenstrahlung nicht exakt wie im Weltall: Atmosphärische Störungen oder auch Wolken sorgen dafür, dass an den Spiegeln des Sonnenofens schwankende Sonnenstärken ankommen und gebündelt auf die Regolith-Schicht auftreffen. Das eigentliche Material konnten die Materialphysiker nicht beeinflussen: „Wir müssen das nehmen, was auf dem Mond herumliegt – an dem Baustoff können wir also nichts ändern“, sagt DLR-Wissenschaftler Matthias Sperl. Und auch die Sonneneinstrahlung lässt sich nicht steuern. Aber immerhin war bereits im ersten Versuchslauf aus dem staubigen Ausgangsmaterial ein zum Ziegel geformtes Bauelement entstanden.

Die Wissenschaftler wechselten von der irdischen Sonne zur künstlichen Sonne aus Xenon-Lampen. „Der Künstlich-Hochleistungsstrahler ist unabhängig von der natürlichen Sonnenstrahlung und bietet daher auch über Stunden und Tage stabile, einheitliche Strahlungsbedingungen“, erläutert Hans-Gerd Dibowski vom DLR-Institut für Solarforschung. So, wie es auch auf dem Mond wäre, wo keine Atmosphäre, keine Wolken die kontinuierliche Strahlung der Sonne beeinträchtigen.

Optimieren für den perfekten Ziegel

Mit einem Baumaterial, das man nicht verändern kann, und einer Sonneneinstrahlung, die sich ebenfalls nicht beeinflussen lässt, bleiben dem Regolight-Team am DLR zwei Stellschrauben, an denen sie

für den perfekten Mondziegel drehen können: die Zeit, in der sie den Baustoff der Energiequelle zum Backen aussetzen, und die Dicke der einzelnen Schichten, die gesintert werden. Insgesamt zehn Ziegel in verschiedenen Varianten sind im Laufe der Testreihen entstanden. „Am Ende wollen wir schließlich etwas backen, was die Stabilität von Beton hat“, sagt Matthias Sperl. Der erste Ziegel war noch bröckelig, aber ein Pionier. Die nächsten Ziegel waren bereits besser, wölbten sich jedoch an den Rändern hoch. Doch auch dafür fanden die Materialphysiker eine Lösung mit ihrer Testreihe am Solarofen: Eine Unterlage aus Keramik sorgt mittlerweile dafür, dass sich der gebackene Ziegel aus Mond-Simulat in seiner Form nicht verzieht.

„Noch sieht man die Lamellenstruktur mit den einzelnen Schichten aber zu sehr“, zieht Alexandre Meurisse Bilanz. „Das ist nicht optimal, und wir versuchen zu verstehen, wie die einzelnen Lagen noch besser miteinander verbunden werden können.“

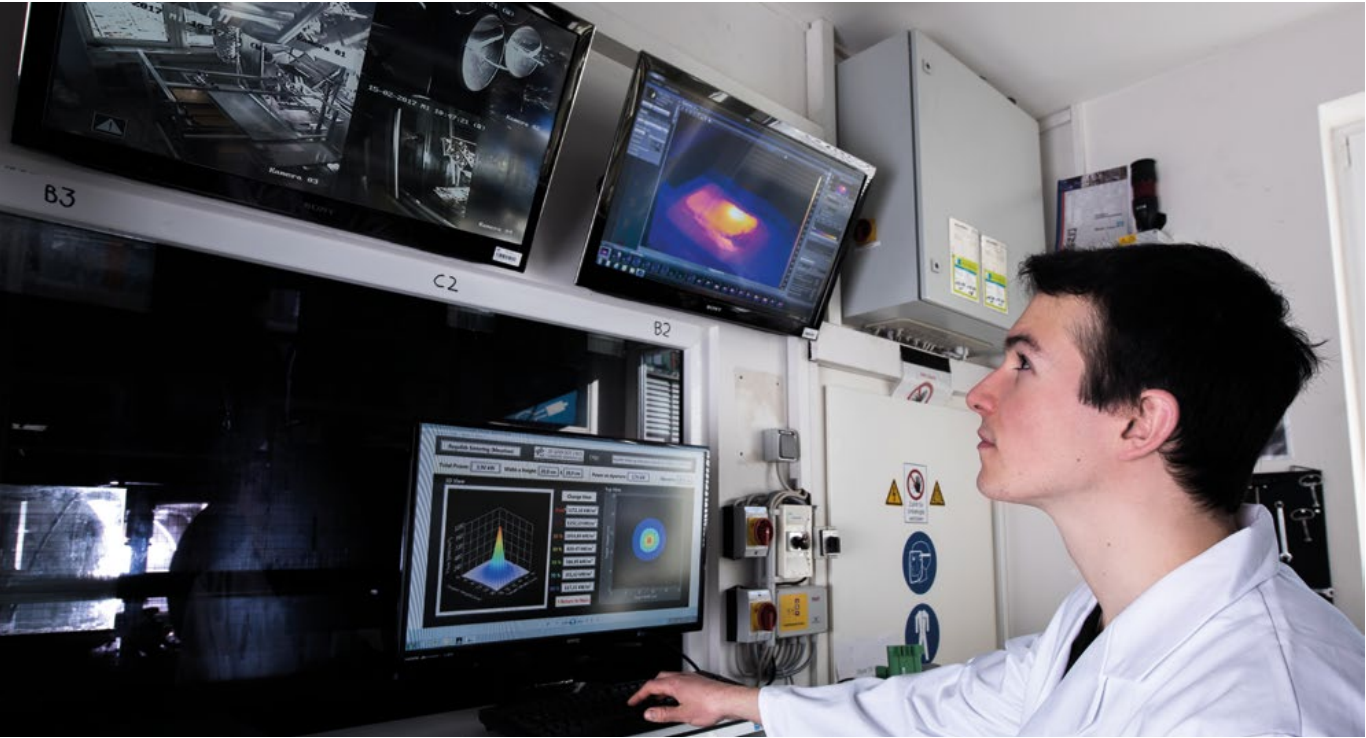
Von irdischen zu lunaren Bedingungen

Nachdem das eigentliche Prinzip, aus Mondstaub und Sonne Ziegelsteine zu backen, bestätigt wurde, stehen nun die nächsten Schritte an. Die bisherigen Erkenntnisse wurden unter einer irdischen Atmosphäre gewonnen – auf dem Mond aber herrscht Vakuum. „Es ist geplant, die Tests unter Vakuum zu wiederholen, um die Machbarkeit des Prozesses unter diesen Bedingungen zu belegen“, erläutert DLR-Wissenschaftler Alexandre Meurisse. Auch ein mobiler Druckerkopf soll im Regolight-Projekt entwickelt werden – damit käme man dem Apparat, der einmal auf dem Mond zum Einsatz kommen soll, schon deutlich näher. Dort würde nämlich nicht der Mondstaub unter einem konzentrierten Sonnenstrahl hin- und herbewegt, sondern der gebündelte Sonnenstrahl über den Regolith geführt werden. „So nähern wir uns den Bedingungen an, wie sie die Mondumgebung bietet.“

Nach bisherigen Erkenntnissen würde es rund fünf Stunden dauern, um auf dem Mond Schicht für Schicht einen Ziegel aus Regolith zu backen. Der Baustoff für ein Habitat aus 1.000 Ziegeln wäre also nach sieben Monaten bereit. „Noch würde ich in unseren Bauziegeln nicht wohnen wollen, aber in fünf bis zehn Jahren, wenn all unsere Erfahrungen umgesetzt sind, durchaus“, sagt Projektkoordinator Matthias Sperl. „Wir wissen jetzt: Es geht! Aber man muss am Verfahren noch feilen.“

Miranda Fateri und Alexandre Meurisse begutachten das Ergebnis ihres „Backprozesses“. Jede Erkenntnis fließt in den nächsten Versuch ein und bringt die Materialphysiker näher an ihr Ziel: einen stabilen Baustein für ein Haus auf dem Mond.

Alexandre Meurisse verfolgt am Monitor, wie Schicht für Schicht ein kompakter Baustein gesintert wird



Als Ausgangsmaterial nutzen die Forscher künstlich hergestellten Mondstaub



Der Ziegelstein entsteht auf einer Keramikunterlage, damit er in Form bleibt



Anfangs noch bröcklig, schlussendlich stabil: Mondstein backen ist ein Lernprozess.



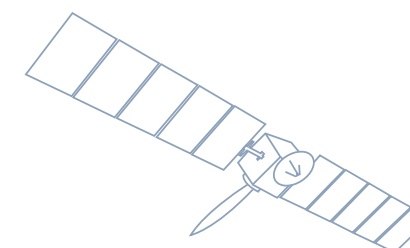
Noch weist der Ziegel eine Lamellenstruktur auf – im nächsten Schritt sollen sich die Schichten enger miteinander verbinden



Bild: NASA/JPL-Caltech

Wenn das die Weltraumraketen-Pioniere Wernher von Braun oder Sergeij Koroljow wüssten! Die NASA-Mission Dawn erreichte ihr Ziel nicht mit einem konventionellen Raketenantrieb, sondern mit einem Motor, der die Sonde mit einem gebündelten Strahl des ionisierten Edelgases Xenon langsam, aber stetig beschleunigte.

EIN GEWALTIGER BERG UND EIN SALZIGER ZWERG



Eine deutsche Kamera auf der Raumsonde Dawn liefert von Vesta und Ceres fundamentale Erkenntnisse zur Planetenentstehung

Von Ulrich Köhler

Zehn Jahre ist es her, dass sich die NASA-Raumsonde Dawn zu einer Mission aufmachte, die eine der aufregendsten und wissenschaftlich ergiebigsten in der Geschichte der Erforschung unseres Sonnensystems mittels Raumsonden werden sollte. Mit Dawn wurde ein Orbiter zum ersten Mal in die Umlaufbahn zweier unterschiedlicher Körper gebracht. Ziel 1: der Asteroid Vesta mit etwa 500 Kilometer Durchmesser, Ziel 2: der Zwergplanet Ceres, mit knapp 1.000 Kilometer Durchmesser der größte Körper im Asteroidengürtel. Und obwohl die Erwartungen an die Mission längst erfüllt und übertroffen wurden, kann Dawn noch bis mindestens Mitte 2019 Ceres weiter erkunden. Beide Ziele, Vesta und Ceres, verblüffen das etwa 50-köpfige Wissenschaftsteam – darunter auch mehrere DLR-Forscher – mit einer Fülle von überraschenden und bedeutsamen Erkenntnissen, die Einblick in die Frühzeit des Sonnensystems geben.

Am 27. September 2007 wurde der tonnenschwere Sondenwürfel vom amerikanischen Cape Canaveral ins All geschossen. Es ging zunächst vergleichsweise gemächlich weiter. Denn Dawn (Mission des Discovery-Programms der NASA; kleine, kostengünstige Sonden mit nur wenigen Experimenten) wurde aus der Erdumlaufbahn mit einem Ionenmotor beschleunigt. Im Gegensatz zum klassischen Raketenantrieb wird bei einem Ionenantrieb Edelgas durch elektrische Energie ionisiert. Die so geladenen Xenon-Ionen können in einem Magnetfeld gebündelt und gezielt ausgestoßen werden. Der dadurch erzeugte Rückstoß ist zwar nur schwach, dafür kann der Schub über Monate und Jahre aufrechterhalten werden.

Die drei Motoren an Bord von Dawn entwickeln eine Antriebskraft von 90 Millinewton, das ist nur etwa so stark wie bei einem zu Boden fallenden Blatt Papier. Doch wenn sie über lange Zeit wirkt, addiert sich der Schub zu vergleichbarer Geschwindigkeit wie bei einem konventionellen Raketenantrieb. Auch den hat die Sonde an Bord, in Form von kleinen Steuerdüsen, die zur Kurskorrektur, vor allem aber zum Einbremsen der Sonde in ihre Umlaufbahnen an Vesta und Ceres verwendet werden. Für den Ionenmotor wurden 425 Kilogramm Xenon mitgenommen, das ist viel weniger Masse, als es klassischen Treibstoffs bedurft hätte. Die Energie zum Start der chemischen Reaktion mit dem Edelgas liefern zwei große Solarpaneele mit fast 20 Meter Spannweite.

Als es noch eine „Himmelspolizey“ gab ...

Ähnlich wie die europäische Kometen-sonde Rosetta nahm Dawn zu- nächst im inneren Sonnensystem Schwung, ehe nach vier Jahren das erste Ziel, der Asteroid Vesta, ins Blickfeld der beiden baugleichen Ka- meras rückte. Die Erwartungen waren groß, denn viel war es nicht, was man über diesen Kleinplaneten wusste. Entdeckt wurde Vesta 1807 als vierter Asteroid von Heinrich Olbers, einem Arzt und Astronomen aus Bremen. In jenen Jahren waren die Astronomen auf der Suche nach einem Planeten, den sie in der 500 Millionen Kilometer breiten Lücke zwischen Mars und Jupiter vermuteten. An der Wende zum 19. Jahr- hundert war von den Astronomen Franz Xaver von Zach und Johann Hieronymus Schroeter zur Suche nach dem „Lückenbüßer“ eigens eine „Himmelspolizey“ gegründet worden. 24 europäische Sternwarten bekamen je einen Quadranten in der Ekliptik, der Bahnebene der Pla- neten, zur Durchmusterung zugeteilt. Schon 1801 war die Suche scheinbar von Erfolg gekrönt, als Giuseppe Piazzi im Observatorium von Palermo einen großen Körper entdeckte, vermutlich allerdings eher zufällig. Er erhielt den Namen Ceres. Doch bald wurde klar, dass in der großen Bahn- lücke kein Planet, sondern Dutzende, wie wir heute wis- sen sogar Hunderttausende Brocken, auf Bahnen ähnlich denen der Planeten um die Sonne kreisen. Jupiter, der massereichste Planet und mit seiner Anziehungskraft so etwas wie der „Hüter“ des inneren Son- nensystems, verhinderte, dass sich aus diesen wenige dutzend Meter bis zu mehrere hundert Kilometer großen Körpern ein Planet bildete.

Von Vesta existierte bis zur Ankunft von Dawn nur ein Bild des Hubble- Weltraumteleskops von wenigen Pixeln Durchmesser. Außerdem spektrale Messungen, die das Reflexionsverhalten der Oberfläche im sichtbaren Licht und nahen Infrarot zeigten. Erstaunlicherweise glichen diese Verläufe den Messungen an einigen Meteoriten in den irdischen Sammlungen, sodass zu vermuten war, dass von Vesta durch Kollisionen mit anderen Asteroiden Material abgesprengt worden war, und ein kleiner Bruchteil davon als Meteorite auf der Erde landete. Sollte sich dies durch spektrale Messungen aus der unmittelbaren Nähe bestätigen, so würde dies bedeuten, dass wir Proben dieses Asteroiden in unseren Laboren hätten, ein enorm wichtiges Referenz- material: Denn weil die Asteroiden so etwas wie „verhinderte“ Plane- ten darstellen, lässt sich an ihnen die Frühzeit der Planetenentstehung zu einem guten Stück rekonstruieren.

Die Kameras zeigen eine „neue Welt“

Und in der Tat: Die Spektren von Vesta bestätigen, dass die Howardite, Eukrite und Diogenite – so die klangvollen Namen der Meteoriten – von Vesta und deren Bruchstücken, den „Vestoiden“ kommen. Wir wissen heute auch mit einiger Sicherheit, woher sie stammen. Denn die beiden Kameras an Bord von Dawn zeigten eine Struktur, wie sie so an noch keinem anderen Himmelskörper entdeckt wurde: Mit seinem Durchmesser von etwa 500 Kilometern bildete sich Vesta zunächst als kugelförmiger Körper aus, er erreichte ein, wie man in der Geophysik sagt, isostatisches Gleichgewicht. Doch am Südpol „fehlt“ ein be- trächtliches Stück Vesta. Es wurde bei zwei gigantischen Kollisionen

Messungen mit den Spektrometern auf der Dawn-Sonde bestätigten, dass die Meteoritensorten Howardit, Eukrit und Diogenit vom Asteroiden Vesta stammen. Im Labor lässt sich nun anhand von Analysen im polarisierten Licht der Mineral- bestand ganz genau bestimmen.



Bild: NASA/University of Tennessee

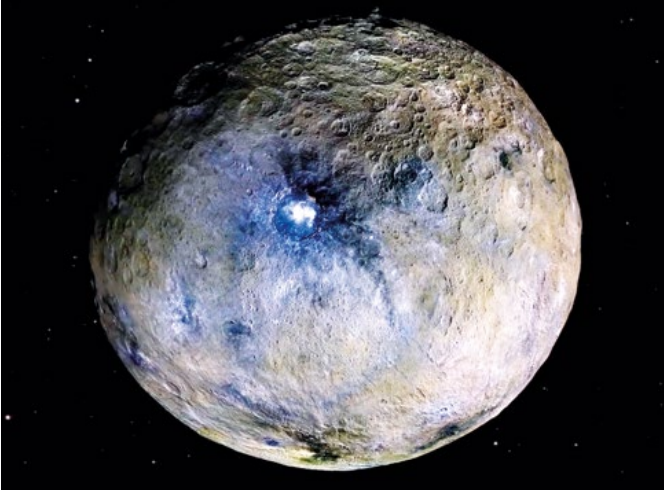


Bild: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA

Krater mit seltsamer Füllung: Im Zentrum der 90 Kilometer großen Einschlagstruk- tur Occator befindet sich das größte Vorkommen der ominösen weißen Ablagerun- gen auf Ceres. Hauptsächlich handelt es sich um Karbonate, Salze der Kohlensäure. Auch die blauen Falschfarben zeigen das Vorhandensein von hellen Ablagerungen und werden mit Schwefelsalzen in Verbindung gebracht, volkstümlich: Gips.

weggerissen. Davon zeugt unter anderem ein 450 Kilometer großer Ringwall, der eine beckenförmige, acht Kilometer tiefe Senke umgibt, in deren Zentrum sich durch das Zurückfedern der bei den hohen Einschlagenergien elastisch reagierenden Gesteinskruste ein gigan- tischer Berg gebildet hat. Ein 22 Kilometer hohes Massiv, fast dreimal so hoch wie der Mount Everest!

Ein „Planetchen“, aus Stein und Eisen ...

Über ein Jahr umkreiste die Sonde Dawn ihr erstes Ziel. Das Wissen- schaftlerteam war überwältigt von der Vielfalt an komplexen geolo- gischen und tektonischen Strukturen. Vesta befindet sich näher am inneren Rand des Asteroidenbandes. Dort war es im jungen Sonnen- system, in den ersten paar Millionen Jahren, als sich zunächst die Planetenkeime, die Planetesimale, bildeten und rasch zu großen Körpern heranwuchsen, recht heiß. Flüchtige Stoffe wie Wasser und Gase konnten nicht in die Planetesimale eingebaut werden und wur- den stattdessen in der rotierenden Scheibe aus Staub und Gas weiter nach außen getrieben. Vesta müsste ein Körper sein, der mit den vier erdähnlichen Planeten des inneren Sonnensystems vergleichbar ist: kaum Wasser, dafür Stein und Metalle in seinem Inneren. Auch die Meteoriten von Vesta enthalten diese Stoffe. Vesta ist offensichtlich die Miniaturausgabe eines „echten“, großen Planeten – mit einem Kern aus Eisen und Nickel in seinem Zentrum und einem Mantel aus schweren Silikatgesteinen, reich an Magnesium und Eisen, und schließlich einer leichteren Kruste. Möglicherweise kam es auf Vesta einst sogar zu Vulkanausbrüchen.

... und ein salziger Zwerg aus Eis und Stein

Begeistert von der reichen Ausbeute wurde ab September 2012 das zweite Missionsziel angesteuert: der Zwergplanet Ceres, fast am äu- ßeren Rand des Asteroidengürtels gelegen. Hier erwarteten die For- scher einen ganz anderen Typ von „Kleinkörper“ – Ceres ist dort schließlich der größte und massereichste Körper. Hierfür überschritt die Sonde eine unsichtbare Trennlinie, von den Wissenschaftlern auch als „Schneegrenze“ bezeichnet. In der protoplanetaren Staub- und Gasscheibe war es jenseits dieser hypothetischen Linie kalt genug, dass auch Gase kondensieren und Eingang in das stoffliche Repertoire der hier entstehenden Körper finden konnten. Auch von Ceres war nicht viel bekannt. Die besten Teleskope lösten gerade so viel auf, dass sehr grobe regionale Strukturen erkennbar waren. Aus der Masse und der Umlaufbahn des Planetenzwerges konnte geschlossen werden, dass Ceres zu einem beträchtlichen Anteil aus Eis bestehen müsse.

Die langsame Annäherung an Ceres zu Beginn des Jahres 2015 war eine harte Geduldprobe für das Team. Als die Bildauflösung endlich Details in den großen Kratern erkennen ließ, gab es eine kleine Sensation: In einigen Gegenden waren sehr helle, fast schneeweiße Flecken zu sehen. Was war das? Ceres reflektiert nicht einmal ein Zehntel des Sonnenlichts, hat also eine viel dunklere Oberfläche als Vesta, und blankes Eis hatten die Wissenschaftler an der Oberfläche

nicht erwartet. Aus der noch zu großen Entfernung des ersten Kartier- orbits in 13.000 Kilometer Höhe war das Rätsel nicht zu lösen. Weite- re Geduld war gefragt, bis die Sonde aus den beiden tieferen Umlauf- bahnen, die bis auf 375 Kilometer an die Oberfläche heranführten, Bilder mit höherer Auflösung und vor allem auch genauere Spektral- daten liefern konnte.

Das Ergebnis ist spektakulär: Die weißen Flächen bestehen vermutlich aus Ablagerungen von Salzen, beispielsweise Soda (Natriumkarbonat), Magnesiumsulfat oder sogar ammoniakhaltigen Tonmineralen, neben weiteren Schwefel- und Chlorsalzen. Das bedeutet, dass es einen Pro- zess geben muss, der das zweifelsfrei im Inneren von Ceres vorhan- dene Wassereis teilweise schmilzt und mit Mineralsalzen anreichert. Als Sole wird es an die Oberfläche gedrückt, dort gefriert die Lauge sofort und das Wasser verdampft. Die dafür erforderliche Wärme könnte vom Zerfall radioaktiver Elemente im Innern von Ceres stam- men, aber diese Frage ist noch nicht abschließend geklärt. Auch gilt es heute als erwiesen, dass es in geologisch jüngerer Vergangenheit zu sogenannten kryovulkanischen Vorgängen auf Ceres gekommen sein muss, ein Vulkanismus, bei dem keine glutheißen, geschmolzenen Gesteine an die Oberfläche gepresst werden, sondern warme, „hydro- thermale“ Mineralwässer mit gelösten Salzen. Nach dem Verdampfen des Wasseranteils bleiben Salzkrusten zurück.

Dass Ceres einen hohen Wasseranteil von bis zu einem Viertel seiner Masse haben muss, geht schon aus seiner geringen globalen Dichte von knapp zwei Gramm pro Kubikzentimeter hervor. Und wie Vesta dürfte auch Ceres zu einem gewissen Grad differenziert sein, mit den eisenreichen Gesteinsbestandteilen, vielleicht reinen Metallen in einem Kern, umgeben von einem Mantel aus Eis, und alles über- deckt von einer Kruste aus Wassereis und leichten, teilweise hydra- tisierten, aber auch „trockenen“ (Ton-)Mineralen mit einem Anteil von Ammoniak. Da die hellen Ablagerungen zumeist in Kratern zu finden sind, ist es auch vorstellbar, dass die Energie für die unter der Oberfläche stattfindenden hydrothermalen Vorgänge von den Ein- schlägen herrührt, die zu diesen Kratern führten.

Und noch ein wissenschaftlicher wie auch ästhetischer Aufreger: Das ungewöhnlichste Landschaftsmerkmal auf Ceres ist ein Berg, der auf den ersten Blick an die Abraumhalden im Kalibergbau erinnert: Der Ahuna Mons hat einen Basisdurchmesser von 20 Kilometern und erhebt sich beeindruckende fünf Kilometer über seine Umgebung. Ein Mont Blanc auf Ceres, allerdings mit sehr ebenförmigen Abhän- gen und Rinnen, die durch abrutschende Silikate und Karbonate ent- standen sein dürften. Insgesamt hat der Ahuna Mons eine Ähnlich- keit mit vulkanischen Domen auf der Erde. Ist er also ein Kryovulkan? Ein Konstrukt aus Eis, Salz, Karbonaten und hydratisierten Mineralen, die von Wärme und Dichteunterschieden den erforderlichen Auftrieb erhalten haben, um aufzuringen und einen Berg bilden zu können? Das liegt nahe. Vermutlich ist das Eis im Berg längst verdampft, sodass nur die trockenen Minerale zurückblieben. Einen zweiten Berg dieser Art gibt es jedenfalls nicht auf Ceres.

Spannendes Finale in Sonnennähe

Dawn umkreist und umkreist den Zwergplaneten. Noch Jahre wäre dies möglich. Die Bahn lässt sich an diesem Körper mit homogener Massenverteilung und folglich kaum Schwankungen in seinem Schwerefeld fast ohne Treibstoff stabil halten. Bis 2019 soll die Sonde durchhalten. Dann nämlich wird Ceres sein Perihel erreichen, den kürzesten Abstand zur Sonne. Es besteht Anlass zur Hoffnung, dass die dann stärkeren Sonnenstrahlen ein wenig Eis in der Kruste des Zwergplaneten verdampfen lassen und sogar aktiver Kryovulkanismus beobachtet werden kann. Es wäre ein letzter Höhepunkt dieser an Erkenntnissen reichen Mission.

Ulrich Köhler ist Planetengeologe am DLR-Institut für Planetenforschung in Berlin-Adlershof und koordiniert dort die Öffentlichkeitsarbeit.

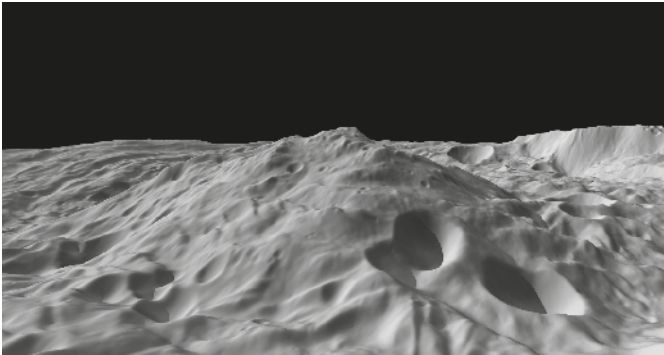


Bild: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA

Mit 22 Kilometern fast dreimal so hoch wie der Mount Everest erhebt sich ein noch namenloser Berg inmitten eines 450 Kilometer großen Einschlagbeckens am Südpol des Asteroiden Vesta

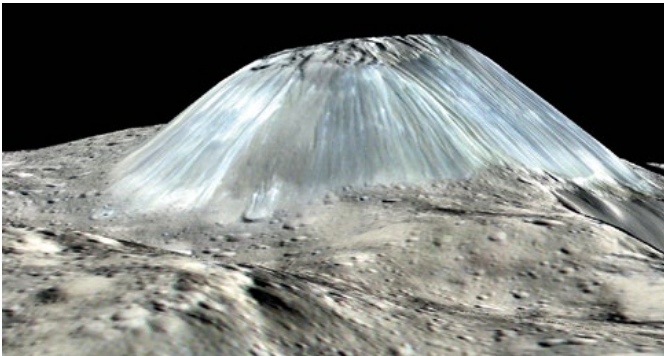


Bild: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA

Der Ahuna Mons auf Ceres, mit kraterfreien, also geologisch ganz jungen Abhängen, erhebt sich etwa 5.000 Meter über die ansonsten von Kratern über- säte Umgebung. Ein Kryovulkan, aus dessen Schlot neben Lava auch Eis dringt? – Die Forscher halten das für möglich.

Dawn ist eine Mission der NASA. Der Name – Morgendämme- rung – steht für das Ziel, Erkenntnisse über die Frühzeit des Sonnensystems zu erlangen. An Bord der vom Jet Propulsion Laboratory (JPL) gesteuerten Sonde befinden sich ein Spektrome- ter für das sichtbare Licht und das nahe Infrarot, ein Gammastrah- len- und Neutronenspektrometer und zwei baugleiche Kameras.

Framing Camera: Sie wurde vom Max-Planck-Institut für Son- nensystemforschung, dem DLR-Institut für Planetenforschung und dem Institut für Datentechnik und Kommunikationsnetze der Universität Braunschweig entwickelt. Das DLR ist verantwortlich für die Auswertung der Aufnahmen, für die Verarbeitung der Stereobild- daten zu globalen Kartenwerken und für digitale Geländemodelle der Oberflächen, aus denen die Topografie beider Körper abgeleitet wird.

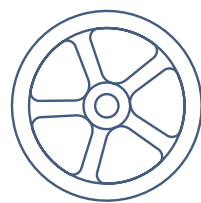
Vesta umkreist die Sonne in 3,6 Jahren auf einer elliptischen Umlaufbahn zwischen 322 und 385 Millionen Kilometern. Der mittlere Durchmesser des drittgrößten (und nach Ceres masse- reichsten) Asteroiden beträgt 516 Kilometer. Der Asteroid ist nach der römischen Göttin des Heims und des Herdfeuers benannt, der Schwester von Ceres.

Ceres, benannt nach der römischen Göttin der Fruchtbarkeit und der Landwirtschaft, ist mit einem mittleren Durchmesser von etwa 950 Kilometern der größte Körper des Asteroidengürtels. Ceres wird seit 2006 als Zwergplanet bezeichnet. Er umkreist die Sonne in 4,6 Jahren auf einer Umlaufbahn zwischen 384 und knapp 450 Millionen Kilometern.

www.DLR.de/dawn

dawn.jpl.nasa.gov

BLICK INS FEUER



Teil 4 der Serie Großgeräte: Der Hochdruck-Brennkammerprüfstand im DLR Köln verrät, was im Turbinen-Inneren passiert

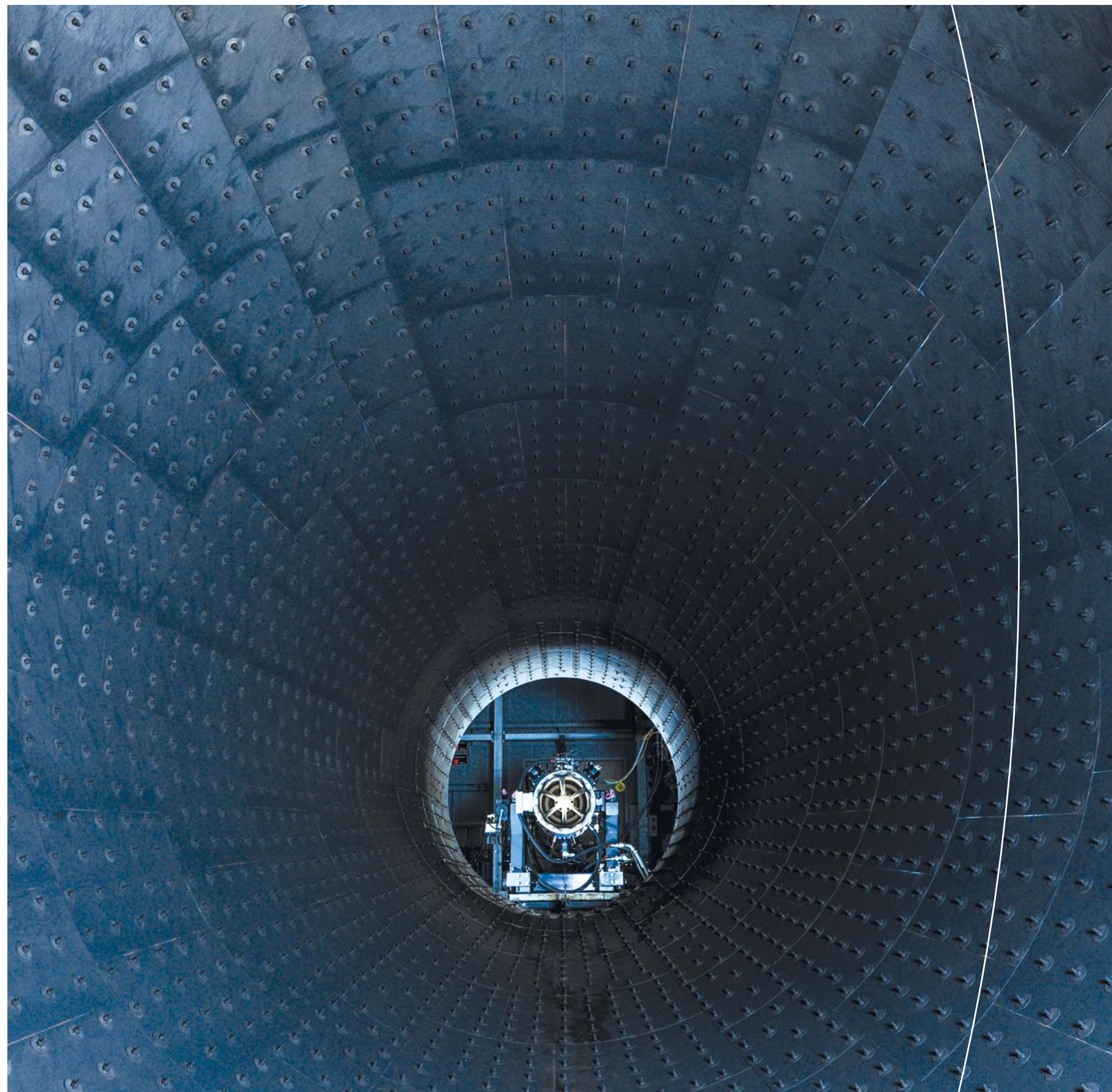
Von Julia Heil

Sie ist das Herz jeder Turbine: die Brennkammer. Hier wird die Energie des Kraftstoffs freigesetzt. Ob in der Gasturbine eines Kraftwerks oder in der Flugzeugturbine. Im DLR in Köln kommen die Brennkammern auf den Prüfstand.

„Das DLR hat schon in den Achtzigerjahren damit begonnen, Brennkammerprüfstände zu bauen. Der erste war der HBK-1“, erzählt Christian Fleing, Leiter der DLR-Abteilung Brennkammertest. Die Anforderung war damals, eine Anlage zu haben, in der man Brennkammern für die Luftfahrt- und die Kraftwerkforschung unter realitätsnahen Bedingungen testen kann. Das heißt, Druck, Temperatur, Kühlung, Massenstrom und Vibration sind so wie später in der Praxis. „In ein Flugzeug, dessen Brennkammer nicht richtig validiert wurde, möchten Sie sich nicht reinsetzen, weder über die Emissionsentstehung noch über die Verbrennungsstabilität könnte eine Aussage getroffen werden“, merkt Fleing an.

Heute gruppieren sich fünf Hochdruck-Brennkammerprüfstände wie übergroße Schiffscontainer auf dem Gelände der Abteilung Brennkammertest im DLR Köln. Was diese riesigen Metallquader beherbergen, zeigt die Evolution in der Prüfstandtechnik. Die Brennkammern von heute laufen bei immer höheren Betriebstemperaturen, dann sind sie leistungsfähiger. Gleichzeitig sollen sie möglichst umweltfreundlich sein. Mit der Technologie-Entwicklung wuchsen auch die Anforderungen an die Prüfstände. Deren Schalldämpfer ragen wie riesige Schornsteine in die Höhe. Dunkel metallisch glänzend und 25 Meter hoch ist der Turm des HBK-5, der Nummer Eins unter ihnen. Nicht nur in der Größe ist er seinen Vorgängern überlegen. Seine Spitzenleistung liegt bei 125 Megawatt, so viel Power, wie eintausend Audi Q5 auf die Straße bringen und dreimal mehr als sein Vorgänger, der HBK-4.

Im Inneren der zwölf Meter hohen Testhalle steht, wie ein großes Fass, die Brennkammer. Vor dem Versuch wurde sie über ein Schienensystem von der Montagehalle in die Testhalle des Prüfstands gefahren. Das ist neu gegenüber den anderen Prüfständen, in denen die Montage viel der teuren Versuchszeit kostet. Hier, im HBK-5, sind die Experimente schon bis zu einem gewissen Grad fertig montiert, bevor man sie hinüberrollt. Auch der separate Versorgungsraum neben der Testzelle war eine der „Lessons learned“ von Christian Fleing: „Jetzt können wir kleinere Korrekturen oder Reparaturen durchführen, ohne gleich den ganzen Versuch stoppen zu müssen. Ein Versuchsabbruch mit dem anschließenden Wiederanfahren kann Kosten bis zu 10.000 Euro verursachen“, weiß der Ingenieur.



Blick durch den unteren Teil des Schalldämpfers in die Testzelle des Brennkammerprüfstands



Der Hochdruck-Brennkammerprüfstand HBK-5 des DLR in Köln wurde im November 2014 nach nur einjähriger Bauzeit in Betrieb genommen



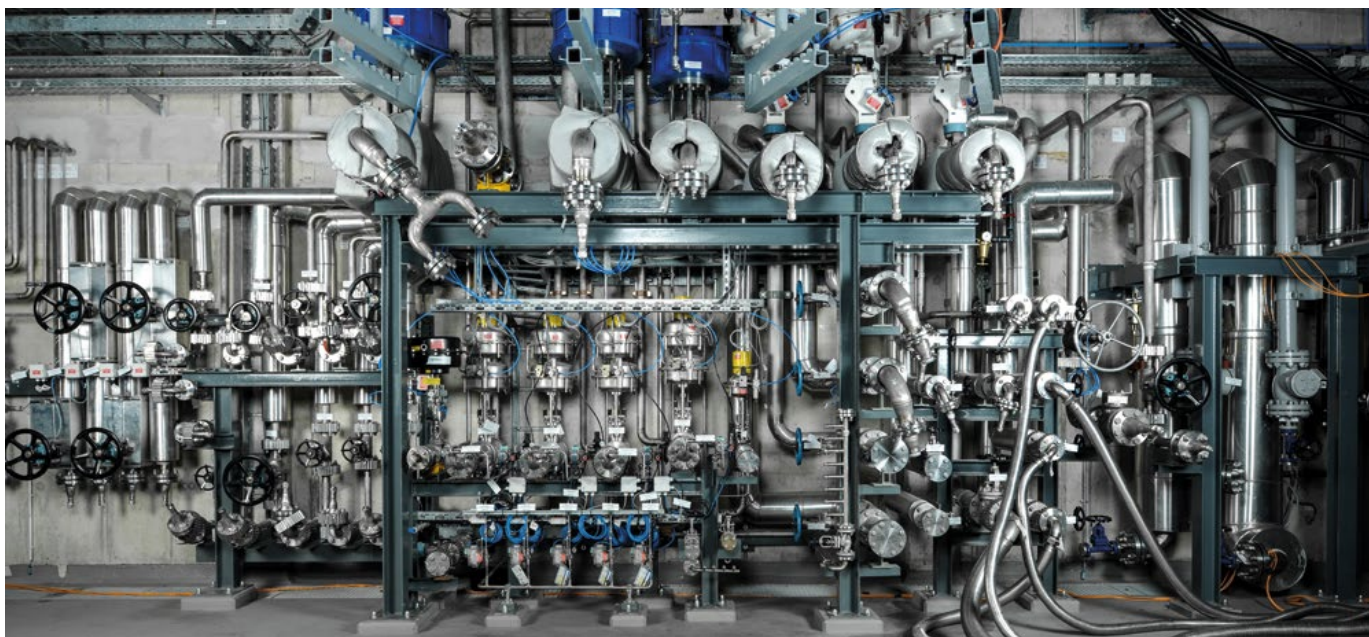
Große Pufferbehälter dienen dazu, Druckschwankungen im Kühlwassersystem des Prüfstands auszugleichen

Sensibler Kraftprotz

Hunderte Messinstrumente überwachen die Vorgänge in der Brennkammer. Wie Tentakeln ragen deren Kabel und Schläuche aus dem Versuchsaufbau. 250 Temperatursensoren und 50 Drucksensoren liefern detaillierte Informationen. Diese fließen über Leitungs- und Kabelknoten im Zentralrechner zusammen. An mehreren Entnahmestellen werden die Abgase der Brennkammer gemessen. Sie geben Hinweise auf die Emissionen von Stickoxiden, Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Schwefeldioxid und Ruß. 25 Kolleginnen und Kollegen arbeiten im Schichtbetrieb an einem Versuch, von der Vorbereitung um 6 Uhr morgens bis zum Abkühlen um Mitternacht. „Einen Versuch kann man nach acht Stunden nicht einfach unterbrechen und abschalten, das würde zu viel Zeit, Ressourcen und Geld kosten“, sagt Carsten Kotthaus, der stellvertretende Prüfstandverantwortliche.

Er sitzt zusammen mit seinen Kollegen sowie den Wissenschaftlern und Ingenieuren des jeweiligen Kunden in der Steuerzentrale neben der Testzelle. Von hier aus überwachen sie Luftdruck, Kühlwasser und die Brennstoffzufuhr in die Brennkammer. Während Flugzeugturbinen Kerosin verbrauchen, verbrennen Gasturbinen in Kraftwerken hauptsächlich Erdgas. Das Gas, was in diese Turbinen fließt, unterscheidet sich in seiner Herkunft. Es ist kein reines Methan, sondern häufig ein Gemisch. Dessen Zusammensetzung hat Einfluss auf die Stabilität des Verbrennungsprozesses. Die Kraftwerksturbine soll mit jedem Brennstoff den geringsten Verbrauch und minimale Emissionen möglich machen. Deshalb untersuchen Wissenschaftler und Ingenieure beim Test im HBK-5 verschiedene Brennstoffzusammensetzungen unter diversen Druckverhältnissen.

Aktuell geht der Trend zu einem immer höheren Wasserstoffanteil im Brenngas, denn dies bedeutet auch ein sauberes Abgas. Durch ein



Im Prüfstand wird nichts dem Zufall überlassen: 50 Sensoren für die Durchflussmessung, 200 für den Druck, 100 Temperatur-Messsensoren und Stellungsrückmeldungen von allen 300 Ventilen sowie acht Sensoren für die Raumlüftung sorgen dafür, dass die Wissenschaftler über alle Parameter ständig informiert sind



Frank Neuwinger, einer der Spezialisten für Emissionen von Brennkammern, ist für die Abgasmessungen zuständig. Er hat die Entwicklung der Luftfahrt- und Kraftwerksturbinen über die Jahre mitverfolgt.

neues System zur Wasserstoffversorgung und einen modernen Hochdruckverdichter können im HBK-5 verschiedene Brennstoffe wie Erdgas, Heizöl oder synthetische Gase, wie eben Wasserstoff, in einen Versuch „eingedüst“ werden. So ermitteln die Ingenieure, bei welchem Wasserstoffanteil die Flamme in der Brennkammer noch stabil brennen kann. Das alles muss gut koordiniert sein, weshalb die Abteilung Brennkammertest eng mit der „Medienversorgung“ des Standorts zusammenarbeitet. Von dort bekommt der HBK Druckluft, Erdgas, Heizöl, Kerosin, Wasserstoff, Propan und auch das Kühlwasser. Bis zu 38 Tonnen Erdgas und fünf Tonnen Wasserstoff können für die Tests pro Tag verbrannt werden. Ist der Bedarf noch höher, werden zusätzliche Kontingente angefordert, die per LKW anrollen.

Stürmen, Dröhnen und Vibrieren

Sobald der Versuch läuft, geben die Wissenschaftler, die ihre Technologie-Entwicklung überprüfen, verschiedene Werte für die Brennstoffmischung oder den Luftdruck an. Auf mehreren Bildschirmen lässt sich beobachten, wie sich die Flammen in der Brennkammer verhalten. Bekommt die Flamme zu viel Brennstoff, wird sie „fett“ und brennt nicht mehr in ihrer optimalen Kernzone, erhält sie zu wenig, wird sie „mager“ und klein. Nach dem Start ist der Zugang zur Testzelle für jeden strengstens verboten. „Wenn der Versuch läuft, kann es heiß werden: Bis zu 2.100 Grad Celsius werden im Versuchsaufbau in der Testzelle erreicht“, erläutert Kotthaus. Außerdem entsteht wegen der hohen Luftdurchströmung ein sogenannter Jet-Effekt: Damit Gegenstände wie Werkzeuge nicht erfasst werden, wenn bis zu 70 Kilogramm Luft pro Sekunde durch die Brennkammer strömen, muss alles, was nicht niet- und nagelfest ist, an den Wänden befestigt werden.

Optisch ist, bis auf flimmernde Luft um die Brennkammer, kaum zu bemerken, dass der Versuch läuft. Akustisch ist es nicht zu überhören. Im ganzen Gebäude dröhnt es und der Boden unter den Füßen zittert wie ein nervöses Segelboot im Sturm. Wenn Carsten Kotthaus die schwere Tür im Erdgeschoss öffnet, um nach draußen zu gehen, wird aus dem ohrenbetäubenden Dröhnen ein monotones Rauschen. Das Kitzeln unter seinen Fußsohlen vergeht, der Boden vibriert nicht mehr. „Für den HBK-5 haben wir unsere gesammelten Erfahrungen im Bereich Prüfstandtechnik vereint“, erzählt er. Das ganze Gebäude ist von außen isoliert und die Brennkammer steht auf einer separaten Betonplatte. Diese verhindert, dass sich die Vibrationen, die während der Verbrennungsprozesse entstehen, als Geräusche weiter in die Umgebung verteilen können. Die Testzelle ist auf 170 Dezibel ausgelegt. So laut kann es werden, wenn die Versuche auf Hochtouren



In der Steuerzentrale neben der Testzelle beobachten Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker ganz genau Emissionen und Stabilität des Verbrennungsprozesses

laufen. Ab 160 Dezibel kann das menschliche Trommelfell reißen, wenn das Ohr nicht geschützt wird. Sollte jemand die Testzelle verbotenerweise betreten, wird der Versuch sofort abgebrochen. Die angeschlossenen Überwachungsräume sind so gut gedämpft, dass dort wie in einem Büro gearbeitet werden kann.

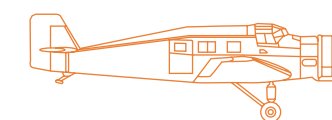
Der HBK-5 läuft seit fast drei Jahren. Vor Ort arbeiten Ingenieure, Maschinenbauer, Techniker und Mechaniker. Zu den Anforderungen gehören Kenntnisse in Physik und Chemie, vor allem umfassendes Wissen über das Werkstoffverhalten, das Vermischen von Brennstoffen sowie über deren chemische Reaktionen. Neben der Fachkenntnis sind aber auch Faszination vom Anlagenbau und Kreativität gefragt. „Mittlerweile kommen wir an das Ende der Einlaufphase“, merkt Carsten Kotthaus an. „Am Anfang hat es einige Zeit gedauert, bis wir die auftretenden Fragen und Probleme lösen konnten, aber nun läuft alles reibungslos, wie ein Uhrwerk.“

ANFANG UND ZUKUNFT DES HBK-5

Initiiert wurde der Bau des Hochdruck-Brennkammerprüfstands schon im Jahr 2006. Damals begann das DLR-Institut für Antriebstechnik damit, sein Portfolio zu modifizieren: Die Druckluft-Kompressoren und die Synthesegas-Anlage wurden erweitert, die elektrische Versorgung gelegt sowie die Vorwärm-Kapazität erhöht. Insgesamt investierte das DLR über 60 Millionen Euro in diese Maßnahmen. Als das Institut 2009 das Gespräch mit den Unternehmen Alstom Power (heute General Electric) und Rolls-Royce suchte, war schon alles bereit für den neuen Prüfstand. Die beiden Parteien waren von der guten Infrastruktur des Standorts und von der Erfahrung des Teams überzeugt und übernahmen 50 Millionen Euro für den Bau des Prüfstands, sodass der HBK-5 im November 2014, nur ein Jahr nach Baubeginn, eröffnet werden konnte. Der Prüfstand ist die Grundlage für eine langjährige Kooperation der drei Parteien DLR, General Electric und Rolls-Royce.



TRÄUMEN IM COCKPIT UND STAUNEN IN DER LAGERHALLE



Im schwedischen Arlanda schläft man im Jumbo und entdeckt Luftfahrtgeschichte in der Flygsamlingar

Von Hans-Leo Richter

Flughafenhotels tauchen selten in einschlägigen Hotel-Rankings auf – wie auch. Sie sind nun mal einem einzigen Zweck verpflichtet, einem durchreisenden Gast eine möglichst zweckmäßige Unterkunft, eventuell auch Tagungsgästen einen passenden Rahmen zu bieten. Für Originalität bleibt da nicht viel Raum. Umso erfrischender die seltenen Ausnahmen. Zum Beispiel am internationalen Flughafen Stockholm Arlanda, knapp 40 Kilometer nördlich der wunderschönen schwedischen Hauptstadt gelegen. Dort bietet ein ausgesprochen unkonventionelles Hostel durchreisenden Gästen ein Quartier. Origineller und musealer zugleich kann es wirklich nicht sein.

Der Ankömmling erblickt zunächst, auf einem Podest platziert, einen leibhaftigen Jumbo-Jet, eine ausrangierte Boeing 747. Allerdings hat sie hier eine völlig neue Bestimmung gefunden. Denn in diesem ehemaligen Langstrecken-Flugzeug befindet sich ein Hostel, welches seine Gäste mit einem wirklich einzigartigen Ambiente empfängt: Der Jumbo – ursprünglich gebaut für Singapore Airlines, dann in Diensten der legendären PanAm – fand schließlich das Ende seiner Laufbahn bei Transjet, einem vergleichsweise kleinen schwedischen Carrier, der auch längst Geschichte ist. Nun verfügt das Flugzeug über 33 Schlaf-„Räume“. Der absolute Clou ist die – allerdings auch nicht gerade preisgünstige – Zweibett-Suite im Cockpit. Hier schaut der Hotelgast beim Aufwachen nicht etwa auf einen handelsüblichen Radiowecker, sondern auf Steuerhorn („Yoke“), künstlichen Horizont, Höhenmesser, Variometer, Kreiselkompass und andere Rundinstrumente. Das hat schon was! Nahezu sämtliche Bedienelemente und Anzeigen sind noch im Original vorhanden, an der Stelle des früheren Head-Panels allerdings befindet sich jetzt ein schöner TV-Bildschirm – den Gästen soll es ja an nichts fehlen.



Normalerweise sieht ein Hotel anders aus: Am Flughafen Stockholm-Arlanda schläft man im Boeing 747-Hostel und die Suite ist im Cockpit.



Wie wäre es mit einem Cocktail auf dem Flugzeugflügel? Hier wird zum „wing walk“ ausdrücklich eingeladen. Dafür sollte sich allerdings auch das Wetter von seiner freundlichen Seite zeigen.

Weitere Übernachtungsmöglichkeiten bestehen in den vier Triebwerk gondeln, im ehemaligen Fahrwerkschacht sowie – im Heck der Boeing – im Compartment, welches üblicherweise den Datenaufzeichnungsgeräten („Black Box“) vorbehalten ist. Selbstverständlich verfügen sämtliche Schlafplätze über Fenster, Klima- sowie sanitäre Anlagen. Im Bereich der früheren Passagierkabine blickt man heute, wie in normalen Hotels auch, in einen Hotelflur, Kabinentüren zu Ein- oder Zweibett-Zimmerchen zu beiden Seiten. Auf dem Oberdeck – früher genossen hier Business- und First-Class-Passagiere die Flugzeugbar – ist ein kleiner Konferenzraum eingerichtet, mit Ledersesseln und allerlei Konferenz-Equipment.

Im Bugbereich schließlich, einst der First-Class vorbehalten, ist eine kleine Bar eingerichtet. Hier wird das Frühstück serviert, wenngleich die dürrtigen Plastik-Hocker nicht gerade zu längerem Verweilen einladen. Abends trifft man sich hier auch zum letzten Absackerchen, welches man bei schönem Wetter sogar zünftig auf dem linken Tragflügel einnehmen kann; zu einem kleinen „wing walk“ wird ausdrücklich eingeladen.

Wer am nächsten Morgen noch ein bisschen Zeit bis zu seinem Anschlussflug hat, umrundet das Jumbo-Hotel und steht nach wenigen hundert Metern vor einem unauffällig wirkenden ehemaligen Lagergebäude, welches es aber buchstäblich in sich hat.

Nur ein kleines Schild weist auf die „Arlanda Flygsamlingar“ hin, auf eine überaus beachtliche Sammlung von Flugzeug-Oldies, Motoren,

Große Luftfahrt-Tradition: In der Bildmitte die mit großer Sorgfalt fast fertig restaurierte Junkers W 34, wenn auch leider noch ohne Tragflügel.

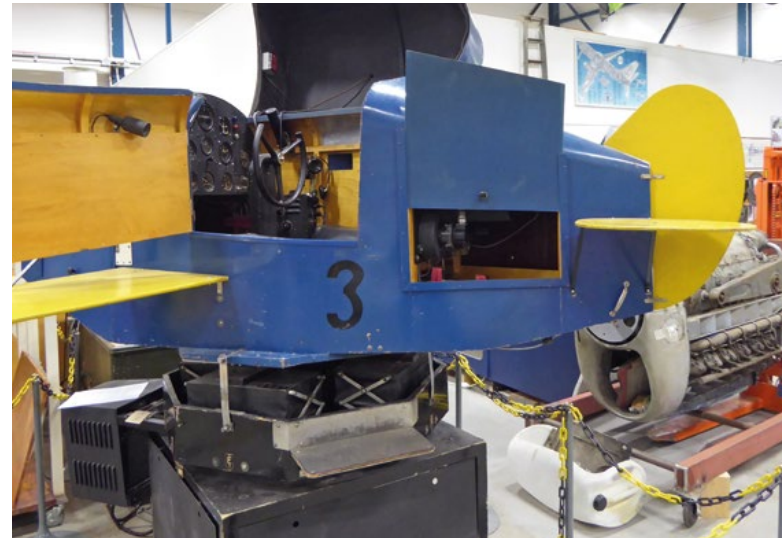
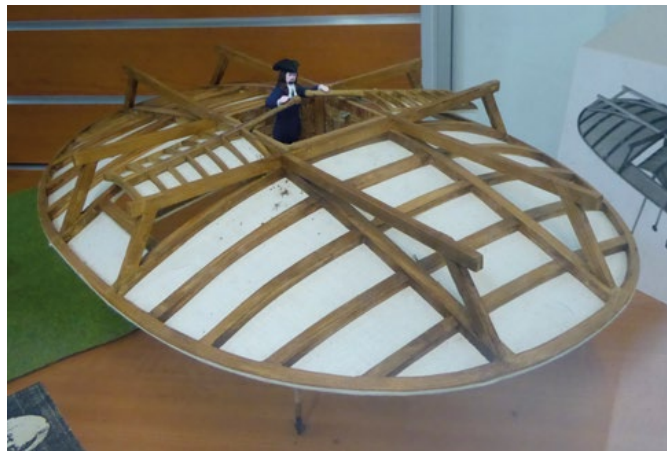


Statt First-Class-Abteil eine nette Bar für das Frühstück und ein abendliches „Absackerchen“

Einzelkomponenten und vielem mehr. Der Name ist sehr zutreffend, denn hier geht es nicht etwa um ein offizielles Luftfahrtmuseum, sondern eine seit dem Herbst 2001 existierende private Sammlung, die ausschließlich von der ehrenamtlichen Arbeit ihrer Gönner und Freunde lebt. Ihr historisch bedeutsamstes Luftfahrzeug ist zweifellos eine sehr plakativ an der Hallendecke „schwebende“ Junkers W 34. Dieser Typ ist eine etwas leistungsstärkere Variante der berühmten W 33, die am 12. April 1928 unter Hermann Köhl, James Fitzmaurice und Freiherr von Hünefeld erstmals den Atlantik in Ost-West-Richtung überflog. Die W 33/34 ist ein einmotoriger Tiefdecker in der typischen Leichtmetall-Wellblech-Bauweise, wie sie für die frühen Junkers-Typen so charakteristisch war. Während des Besuchs im letzten Sommer hing die W 34 leider flügellos an der Decke, die Tragflügel ruhten zu weiteren Restaurationsarbeiten in der unmittelbar angeschlossenen Werkstatt. Das hier ausgestellte Exemplar wurde 1935 gebaut, als Lizenzbau im schwedischen Limhamn. Es ist mit einem Bristol-Mercury-Sternmotor ausgerüstet, zudem mit der damals hochmodernen NACA-Haube, einer speziellen, aerodynamisch günstigen Verkleidung für Sternmotoren. An der Seite erkennt man noch das Logo der „Laplandsflyg“, einer innerschwedischen Gesellschaft, bei welcher der Tiefdecker von 1956 bis 1961 seine letzte Verwendung fand.

Die Junkers W 34 ist allerdings nicht das einzige ursprünglich aus Deutschland stammende Luftfahrzeug. Ebenso sehenswert wie heute auch selten sind der Doppeldecker Bücker „Jungmann“, der Klemm-Tiefdecker KL 35, ein Rieseler RIII Kleinflugzeug von 1923 sowie eine Albatros BII von 1917. Nicht minder interessant sind mehrere frühe

Emanuel Swedenborg, schwedischer Visionär, entwarf 1716 diese „Maschine, zum Fliegen in der Luft“. Zur Erprobung im Flug dürfte es wohl nicht gekommen sein.



Der klassische Link-Trainer – Urvater aller Flugsimulatoren aus den frühen Dreißigerjahren

Verkehrsflugzeuge aus der Kolbenmotor-Ära, beispielsweise eine Lockheed Electra aus dem Jahr 1942 (für bis zu acht Passagiere) und eine Lockheed Lodestar aus dem gleichen Zeitraum (für bis zu 14 Passagiere). Speziell der elegante, zweimotorige Tiefdecker Lockheed Electra gelangte in den Vorkriegsjahren vor allem in den USA zu einiger Berühmtheit, da er ein gern genutztes Flugzeug der amerikanischen Rekordpilotin Amelia Earhart war. Mit diesem Typ brach sie 1937 auch zu ihrem letzten Rekordflug auf, der schließlich über dem Pazifik ein bis heute nicht geklärtes, spurloses Ende fand.

In die Reihe der kleinen Kolbenmotor-Verkehrsflugzeuge passt eine frühe Entwicklung von de Havilland, die „Dove“, ebenfalls ein Kurzstreckenverkehrsflugzeug für bis zu neun Passagiere. An der Decke der langgestreckten Halle schweben einige sehr schöne Segelflugzeuge aus der „Sperrholz-Ära“, zum Beispiel eine Weihe A3 und das bekannte „Grunau-Baby“. Und noch eine gute Bekannte grüßt da von der Hallendecke – die auch in dänischen Luftfahrtmuseen ausgestellte „Himmelslaus“, ein minimalistisches Ultralight-Gerät mit interessantem Tragwerk (siehe auch DLR-Magazin 150 vom Juni 2016).

Mehrere Cockpit-Sektionen ziehen die Blicke auf sich, so das Cockpit des französischen Mittelstrecken-Verkehrsflugzeugs Sud Aviation „Caravelle“ oder ein Simulator-Cockpit des zweimotorigen Verkehrsflugzeugs Convair 440 „Metropolitan“ – beides typische „Uhrenladen“-Cockpits aus der Zeit lange vor den heutigen Flachbildschirm-Displays. Eine weitere, erkennbar zerknitterte, Cockpitsektion erinnert an einen Flugunfall aus dem Dezember 1991, als eine vollbesetzte McDonnell-Douglas MD 81 kurz nach dem Start in Arlanda aufgrund von unzureichender Enteisung beide Triebwerke „verlor“ und dennoch von der Crew meisterhaft auf einem Feld notgelandet werden konnte. Der Rumpf zerbrach dabei in drei Teile. Doch sämtliche Insassen überlebten, lediglich einige Verletzte waren zu beklagen. Und jetzt hat diese Cockpit-Sektion nach langen Gammeljahren auf einem Schrottplatz ihr Domizil in der Flygsamlingar gefunden – die Instrumente sind allerdings nur noch im Fotoformat aufs nackte Blech geklebt ...

Zahlreiche Einzelkomponenten, darunter diverse Propeller in allen Größen sowie eine Vielzahl von Kolbenmotoren und Strahltriebwerken ergänzen die Sammlung. Sehenswert sind auch mehrere Dioramen mit der Darstellung historischer Luftfahrtszenen wie die Startvorbereitungen an einem Farman-Voisin-Doppeldecker von 1907. Abgerundet wird die Flygsamlingar last but not least durch einen kleinen Modellwindkanal sowie mehrere Flugsimulatoren, darunter auch der bekannte Link-Trainer, sozusagen der Urvater aller späteren Simulator-Cockpits.

Auch wenn man so etwas wie ein museumsdidaktisches Konzept vielleicht vermisst: Diese private Sammlung bietet überaus interessante Einblicke in die vielfältige, nicht nur schwedische Luftfahrtgeschichte. Und sollte sich angesichts der vielen Luftfahrtveteranen doch eine gewisse Müdigkeit eingestellt haben – vielleicht ist ja im Jumbo-Hotel noch das Cockpit frei für ein Träumchen ...

www.jumbostay.com
www.arlandaflygsamlingar.se



Windkanal der Königlich Technischen Hochschule: Hier wurden schon in den Dreißigerjahren Messungen bei einer Windschwindigkeit von bis zu 40 Metern pro Sekunde durchgeführt.



Eine Lockheed L 18-56 Lodestar aus dem Jahr 1943 wird für eine Neulackierung präpariert: Der Dummy eines Mechanikers auf dem Tragflügel verkörpert plakativ die Arbeitsweise.

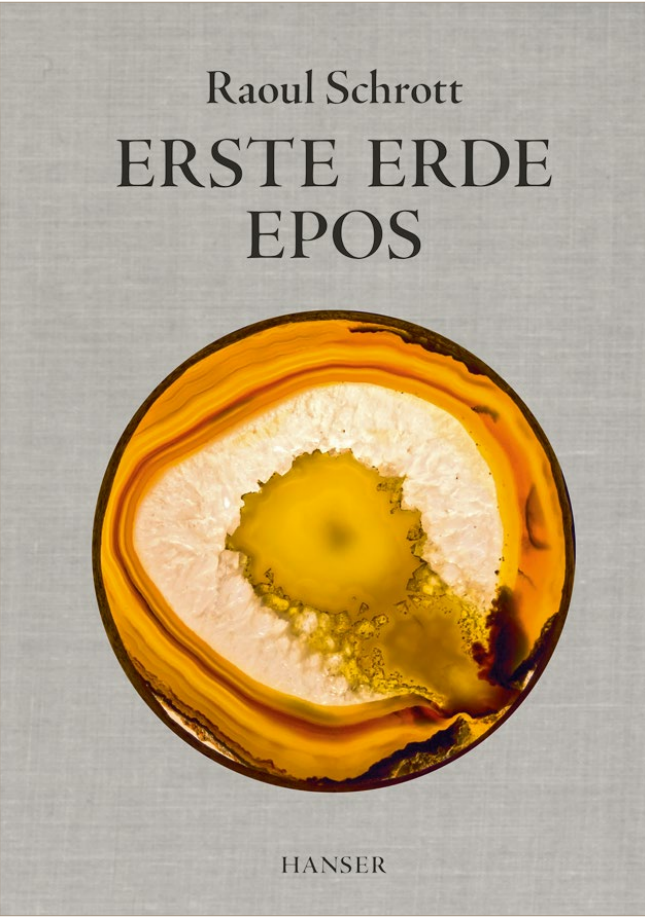


Cockpit des kleinen Verkehrsflugzeugs Lockheed Electra 12-26 von 1942: Interessant der weiß markierte Instrumentenbereich für den künstlichen Horizont, den Höhenmesser, die Geschwindigkeitsanzeige, den Kompass und den Wendezeiger.



Zahlreiche Kolbenmotoren und Strahltriebwerke zeigen einen repräsentativen Querschnitt historischer Flugzeugantriebe

DER KOSMOS ALS ROMAN



Die Raumfahrt hat uns einen neuen Blick auf den Kosmos wie auf unseren Planeten vermittelt, durch spektrale Messdaten und Satellitenbilder wie auch die unmittelbare Beobachtung durch Astronauten. Der Titel von Raoul Schrotts neuestem Buch **Erste Erde. Epos (Hanser)** lässt vermuten, dass hier ein Schriftsteller versucht hat, diese Perspektive um die erzählerische Dimension zu bereichern.

Also die Geschichte der Erde als eine fortlaufende Handlung über 4,6 Milliarden Jahre? Vielleicht mit dem löblichen Nutzeffekt populärwissenschaftlicher Vermittlung? Der quantitative Umfang jedenfalls scheint diesem Anspruch gerecht zu werden: Ein Ziegelstein von einem Buch mit mehr als 840 Seiten! Tatsächlich wird ein kosmologischer beziehungsweise erdgeschichtlicher Überblick vom Urknall bis zur kulturellen Evolution des Menschen mit Schwerpunkt auf der Evolution des Lebens und seiner Bausteine geboten, und zwar als Anhang: ein Kompendium von 158 Seiten in Kleindruck, mit detaillierten Daten und Fakten sowie vielfachen wissenschafts- und philosophiegeschichtlichen Bezügen, im Stil lehrbuchartig-apodiktisch und weitestgehend ohne Literaturbelege.

Gemäß dem Anspruch des Autors liefert der Anhang einen übersichtlichen und gut lesbaren Leitfaden durch „Unser Wissen von der Entstehung des Universums, der Erde, des Lebens, seiner unterschiedlichen Formen, und des Menschen“, gestützt auf „diverse Argumente aus Fachbüchern, akademischen Diskussionen und Rückfragen an einzelne Wissenschaftler...ein Zeitdokument...ein umfassender Querschnitt jener Erkenntnisse, die ein neugieriger Mensch sich zu erwerben vermag.“

Davor nun steht das im Titel angekündigte „Epos“, eine wesentlich komplexere Erzählung in 28 episodischen Kapiteln, die ausgewählte kosmologische und erdgeschichtliche Meilensteine thematisieren und überwiegend von Wissenschaftlern, auch von Künstlern oder vom Autor selbst vorgetragen werden. Dessen Kommentar dazu im Vorwort: „Einige geben Portraits von Wissenschaftlern wieder, die ich kennenlernte, andere Figuren, deren Lebensgeschichten sich aus ihren Arbeitsfeldern ergaben.“

Der Text bietet demnach keinen durchgängigen Erzählduktus, sondern eine abwechslungsreiche Folge von persönlichen Erinnerungen, faktenreichen inneren Monologen, kritischen Reflexionen, Expeditionsberichten, Zitaten, Reiseeindrücken, lyrischen Miniaturen und mythologischen Reminiszenzen mit großer kultureller Spannbreite. Den jeweiligen Bezug zur kosmologischen Storyline liefern knapp gefasste Marginalien. Vielfältig sind auch die zahlreichen Schauplätze, ihr Spektrum reicht beispielsweise von den Waitomo Glowworm Caves in Neuseeland und dem Standort des Hexapod-Spiegelteleskops in der chilenischen Atacama über das CERN und das Essener Folkwang-Museum bis in die alpine Landschaft der Tiroler Heimat des Autors.

Dem entspricht auch eine extreme stilistische Bandbreite: Strophische Lyrik in freien Rhythmen oder mit zum Teil sehr komplexen Reimstrukturen, konkrete Lyrikpassagen in figurativem Druckbild, Prosa mit Anklängen an den „Hohen Ton“ klassischer Epik, sachlicher Bericht, Telefonprotokoll und umgangssprachlicher E-Mail-Chat. All das wirkt überraschenderweise nicht maniert, sondern in Resonanz mit dem jeweiligen Inhalt. Der gesamte Text, außer dem Anhang und den Marginalien, ist in gewöhnungsbedürftiger Kleinschreibung gesetzt. Der Leser wird aber mit diesem eindrucksvollen und detailreichen „Metakosmos“ nicht allein gelassen, einen hilfreichen roten Faden bietet das vorangestellte erweiterte Inhaltsverzeichnis mit gut lesbaren Zusammenfassungen zu jedem Kapitel.

Gemessen an anderen (nebenbei nicht sehr zahlreichen) literarischen Annäherungsversuchen an naturwissenschaftlich-technische Themen kann das Werk von Raoul Schrott – zumindest nach Anspruch und Ansatz – als monumental bezeichnet werden.

In einem Vortrag, den Raoul Schrott zielsicher zitiert, hat sich der Physiker Richard Feynman beklagt: „Wird denn keiner von unserem heutigen Bild des Universums inspiriert? ... Dies ist noch keine wissenschaftliche Zeit.“

Er konnte „Erste Erde. Epos“ noch nicht kennen.

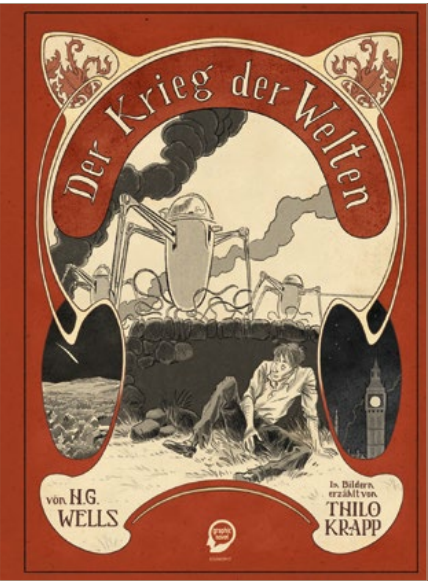
Dr. Robert Backhaus

DER ANGRIFF DER MARSIANER – MIT BLEISTIFT FESTGEHALTEN

Wer vom Krieg der Welten spricht, denkt als Erstes wahrscheinlich an das legendäre Hörspiel, mit dem 1938 die Amerikaner in Angst und Schrecken versetzt wurden –, weil manchen Radiohörern der Angriff der Marsmännchen allzu realistisch erschien. Auch Steven Spielberg bastelte sich aus dem „War of the World“ 2005 einen Film, in dem Tom Cruise vor den aggressiven Marsianern flüchten muss. Allerdings: Das Original spielt im viktorianischen Großbritannien und wurde 1898 von Schriftsteller H.G. Wells geschrieben. Und diesem fühlte sich Thilo Krapp verpflichtet, als er die Geschichte zur Graphic Novel **Der Krieg der Welten (Egmont)**, also zum anspruchsvollen Erwachsenen-Comic machte. Der Illustrator und Comiczeichner hat damit zwar der Vielzahl an Umsetzungen ein neues Genre hinzugefügt, sich dabei aber löblicherweise an das britische Original aus dem 19. Jahrhundert gehalten.

Düster und bedrückend ist der mit Bleistift in Grau- und Schwarztönen gezeichnete Comic, in dem der Angriff der marsianischen Zerstörungsmaschinen erzählt wird. Zunächst verspüren die Menschen des wissenschaftsbegeisterten, industriellen Zeitalters Neugierde, als die ersten außerirdischen Raumschiffe landen. Doch die Marsianer sind nicht in friedlicher Absicht gekommen, sondern um die Ressourcen der Erde rücksichtslos auszubeuten – und erinnern damit sehr deutlich an die Kolonialpolitik der Briten, die H.G. Wells mit seinem Roman kritisierte. Robert, der Protagonist der Geschichte, kämpft sich auf der Suche nach seiner Frau Emma durch Chaos und Verwüstung. Krapp nutzt Hell und Dunkel, zoomt dicht an seine Helden heran oder nutzt die gesamte Seite, um ein Bild in seiner Gesamtheit wirken zu lassen. So ist **Der Krieg der Welten** spannend, nimmt den Leser und Betrachter mit und vermittelt Angst, Schrecken und Verzweiflung. Wie sorgfältig Krapp recherchiert hat, um ein authentisches Bild zu zeichnen, zeigen die Skizzen im Anhang: Winzige Details wie Türkäufe, Stuhllehnen oder auch Regenrinnen hat er studiert, Einrichtungs- und Kunstmagazine des 19. Jahrhunderts gewälzt, Varianten der marsianischen dreibeinigen Kampfmaschinen entwickelt und die Charaktere interpretiert. Und so merkt man auch auf allen 144 Seiten: In dieser Graphic Novel wurde H.G. Wells' Roman mit viel Liebe und Nostalgie umgesetzt.

Manuela Braun



MIT TÖDLICHEN KONSEQUENZEN

Henri, Klimatechniker und Einzelgänger, hat einen Job, der ihn täglich tief in die Schweizer Alpen führt. Seine Firma sichert dort Daten für Firmen. Daten, die nicht tief genug vergraben sein können. Sein Kontakt zur Außenwelt ist Marie, die ihrem Verlangen nach einer besseren Welt als Enthüllungsjournalistin nachgeht. Eines Tages fordert sie eine alte Schuld bei Henri ein. Er soll Daten „organisieren“. Wie es sich für solch eine Geschichte gehört, folgen Ereignisse, deren Verlauf und tödliche Konsequenzen keine der handelnden Personen mehr im Griff hat. Mit dem Willen, das Richtige zu tun, werden die Probleme für Henri nur noch größer. Bis zum Showdown auf Spitzbergen ...

Die Handlung des Wissenschaftskrimis **Kalte Saat (CreateSpace Independent Publishing Platform)**, geschickt rund um die Signalworte Datensicherheit und Genmanipulation inszeniert, treibt den Leser vor sich her. Man möchte auf die nächste Seite blättern, ohne die aktuelle zu Ende gelesen zu haben. Aus den Alpen runter nach Zürich, dann ab in die Arktis. Die Geschichte ist logisch, überrascht mit geschickten Verwicklungen und Wendungen, die Figuren und ihre Handlungen sind glaubhaft. Und dass der Autor ein preisgekrönter Wissenschaftsjournalist von Spiegel online ist, erweist sich als ein absolutes Plus für das Buch. Christoph Seidler weiß, worüber er schreibt, denn er hat mehrfach die Orte der Handlung besucht. Für den Leser wird aus der Fiktion Wirklichkeit. Und so ganz nebenbei vermittelt der Autor auch noch nützliches Wissen, zum Beispiel darüber, wie man einem unterkühlten Menschen das Leben rettet und was einen gefährlichen Skorpion ausmacht.

Andreas Schütz





BLITZABLEITER, KARLSTHRON UND RAUMANZUG

Der Sarotti-Mohr, mit dem ab 1918 für Schokolade geworben wurde, gehört ebenso dazu wie der älteste erhaltene Blitzableiter Deutschlands, eine Pestarztkappe oder Gutenbergs bewegliche Lettern. Die Gegenstände, die Autor Hermann Schäfer in **Deutsche Geschichte in 100 Objekten (Piper)** auf jeweils vier, fünf Seiten vorstellt, können nie und nimmer 2.000 Jahre Geschichte darstellen – und das sollen sie auch nicht. Mit dem gebundenen 650-Seiten-Werk auf schönem Papier will Schäfer keine Geschichtsbücher ersetzen, sondern Neugierde wecken und einen konkreten Zugang zur Vergangenheit schaffen. Der Historiker hat in Bonn das „Haus der Geschichte“ aufgebaut und viele Jahre geleitet – Geschichte anhand von Objekten zu erzählen, ist ihm also mehr als vertraut.

So unterschiedlich die ausgewählten Objekte sind, so unterhaltsam ist das Buch. Wer der Tabakdose Friedrichs des Großen nichts abgewinnen kann, lässt dieses Kapitel halt aus und widmet sich dem Volksempfänger oder dem Karlsthron in Aachen. Auch ist es nicht notwendig, das Buch Seite für Seite wie einen Roman zu lesen. Jedes Objekt kann auch gut für sich stehen. Dabei ist nicht zu unterschätzen, wie viel Inhalt Hermann Schäfer in jedem Kapitel untergebracht hat. Manchmal liefert der Historiker ein paar Details zu viel, aber immer gelingt es ihm, vom einzelnen Objekt auf den geschichtlichen Zusammenhang zu schließen. So wird Sigmund Jähns Raumanzug nicht ausführlich beschrieben – vielmehr geht der Autor zügig zum Wettlauf ins All über, bringt den ersten künstlichen Erdsatelliten Sputnik, etwas Biografisches zu Jahn und auch noch den Kinofilm „Good Bye, Lenin!“ unter. Das geschieht nicht wahl- und lieblos, sondern lässt sich gut lesen und ordnet die Bedeutung dieses Objekts geschickt in einen Kontext ein. Der Sarotti-Mohr ist Symbol für die Kolonialpolitik Deutschlands, und der Blitzableiter zeigt, wie Wissenschaft und Aufklärung ineinandergreifen. 2.000 Jahre, verpackt zu 100 Geschichten – da könnte man ewig und drei Tage über die Auswahl diskutieren. Man kann aber auch einfach genießen, dass mit 100 Geschichten zum einen viel Wissen, zum anderen Spaß an Geschichte vermittelt wird.

Das Konzept ist nicht neu – so hat bereits der Direktor des British Museum, Neil MacGregor, mit 100 Objekten aus seinem Museum erfolgreich die Weltgeschichte erläutert –, aber es funktioniert.

Manuela Braun



DAS LEBEN EINES AUSNAHMEWISSENSCHAFTLERS

Sechs Jahre bevor der britische Schauspieler Benedict Cumberbatch als Sherlock Holmes Kultstatus erreichte, heimste er bereits eine Nominierung als bester Schauspieler bei den British Academy Film and Television Awards (BAFTA) ein – für seine Rolle in **Hawking – Die Suche nach dem Anfang der Zeit (polyband)**. Und so ist es auch Cumberbatch, der werbewirksam auf der DVD-Hülle zu sehen ist und der als einziger Mitwirkender genannt wird. 90 Minuten lang zeigt die BBC-Produktion von 2004 die wissenschaftlichen Anfänge des britischen Physikers Stephen Hawking, die Beziehung zu seiner ersten Ehefrau Jane Wilde und das Fortschreiten der Krankheit ALS, die das motorische Nervensystem zerstört. So ganz kann sich die BBC dabei leider nicht entscheiden: Soll der Film die wissenschaftliche Leistung würdigen oder eher die emotionale Geschichte einer zerstörerischen Krankheit erzählen? Der Text auf der DVD-Hülle konzentriert sich auf die Liebesgeschichte.

Der Film soll also alles auf einmal – und kann dem gar nicht gerecht werden. Die wissenschaftliche Leistung bleibt dem Laien daher unklar. Die Filmemacher haben stattdessen vor allem Wert darauf gelegt, dass der Zuschauer emotional erfasst, wie revolutionär Hawkings Forschung ist. Die Liebesgeschichte ist präsent, aber erstaunlich unspektakulär. So beeindruckt am meisten, wie dramatisch die Erkrankung bereits für den jungen Hawking verläuft. Und das spielt Benedict Cumberbatch in der insgesamt soliden BBC-Verfilmung extrem gut.

Manuela Braun

ASTRONAUTEN MIT BODENHAFTUNG



zogen acht Teilnehmer in die „Biosphere 2“ in Arizona, um gemeinsam mit Tieren und Pflanzen für zwei Jahre unter der Glaskuppel ohne Austausch mit der Außenwelt zu leben.

T.C. Boyle hat gewissenhaft recherchiert und nutzt diese historische Begebenheit als Blaupause. Damals geriet das Experiment ziemlich in die Kritik: Nach einem Arztbesuch „draußen“ in das eigentlich geschlossene Ökosystem mitgebrachte vollgepackte Taschen, eine Kakerlakenplage und ein Kohlendioxid-Absorber machten die Idee des autarken Lebens zur Illusion. So wurde das von Milliardär Edward Bass finanzierte Projekt zu einer Soap Opera und entfernte sich in der Wahrnehmung immer mehr von einem ernst zu nehmenden wissenschaftlichen Vorhaben. Immerhin ist die Anlage heute im Besitz der Universität von Arizona, die die kontrollierbaren Bedingungen im Inneren schätzt und die verschiedenen Ökosysteme für ihre Forschung verwendet.

Boyle lässt nun eine fiktive zweite Mannschaft in die Glaskuppel ziehen, die vom Misserfolg der ersten Mannschaft durchaus weiß – und besessen davon ist, dieses Mal keine Fehler zu begehen und zwei Jahre konsequent als Selbsternährer zu leben. Allerdings: Dieses Mal wird eine Terranautin schwanger. Nur konsequent weitergedacht von Boyle, denn auch damals – in der Realität – fand sich in der „Biosphere 2“ ein Liebespaar, das kurz nach dem Ausstieg auch heiratete.

Bissig in alle Richtungen

Boyle vermischt in seinem 604-Seiten-Wälzer eine ganze Menge und verteilt ironische Seitenhiebe in alle Richtungen. Castingshows, bei denen Akteure nicht immer mit fairen Mitteln herausgefiltert werden, sind Vorbild für den Auswahlprozess für die „Ecosphere 2“-Mannschaft. Eifrig werden Hoffnungen geschürt und ebenso rücksichtslos zerstört. Dann gibt es noch die PR-Leute, die aus dem wissenschaftlichen Projekt manipulativ eine Show für die Journalisten machen –, die sich wiederum nur zu gerne angesichts des Spektakels amüsieren und einspannen lassen. Dazu kommt die kleine Gesellschaft der Terranauten, die für Jahre auf engem Raum und unter schwierigen Bedingungen wie im Big-Brother-Container zusammenlebt und sich zudem – auch da bleibt sich Boyle recht treu – mit individuellen Begierden auseinandersetzen muss. Boyle hat – und das ist sowohl Vor- als auch Nachteil – einen Rundumschlag vorgenommen.

Ohne Sympathieträger

Erzählt wird die Geschichte aus drei Perspektiven: Linda Ryu, die es leider nicht in die „Ecosphere 2“ geschafft hat und nun von außen als Angestellte des Projekts die scheinbar Glücklichen auf ihrer Mission beobachtet, erzählt ihre Version. Dawn Chapman und Ramsay Roothoorpe, Mitglieder des Terranauten-Teams, geben aus dem Inneren der Glaskuppel ihre Sicht wieder. Die Wahrheit liegt meist irgendwo zwischen den Perspektiven – oder auch schon mal ganz woanders. Für einige Längen im Buch entschädigt den Leser dann aber das überraschende Ende des Romans. Allerdings: Sympathisch wird einem auf den 600 Seiten des Romans niemand. Eigentlich auch kein Wunder, denn Boyle stellt seinem Werk ein Zitat von Jean-Paul Sartre voran: „Die Hölle, das sind die anderen.“

Manuela Braun

LINKTIPPS

FÜR SKEPTIKER

www.hoaxilla.com

Außerirdische im Weltall? Ist die Psychologie eine reine Fake-Wissenschaft? Die Moderatoren von Hoaxilla, dem kritischen Podcast aus Hamburg, betrachten, wie viel Wahrheit in Mythen und Verschwörungstheorien steckt oder von den Medien zu den verschiedensten Phänomenen verbreitet wird. Der Podcast ist wissenschaftlich fundiert und eine gute Adresse für Skeptiker.

BUNTE SAMMLUNG

www.futilitycloset.com

Futility Closet ist eine Sammlung von skurrilen, aber wahren Anekdoten aus unterschiedlichen Genres. Bei diesem Podcast dürfen eine Prise schwarzer Humor und kleine Denkspiele nicht fehlen. (Englisch)

AHNENGALERIE

<https://www.jpl.nasa.gov/missions>

Was flog nicht schon alles ins All, um die Weiten des Kosmos zu erkunden! Von AcrimSat bis WIRE weist die Website des Jet Propulsion Laboratory der NASA, besser bekannt unter JPL, eine wahre Ahnengalerie aus. Hinter jedem Steckbrief in Bild und Kurztext warten Hintergrundinformationen zur jeweiligen Explorationsmission darauf, entdeckt zu werden. (Englisch)

ASTEROIDENREISE

dawnblog.jpl.nasa.gov

Wie erreiche ich mit einer Raumsonde einen Asteroiden? Wie muss sie gesteuert werden, damit sie in einer idealen Umlaufbahn fliegt? Was ist bei der Aufnahmeplanung für eine Kamera zu beachten? Seit zwölf Jahren erklärt Dr. Marc Rayman, leitender Ingenieur und Missionsdirektor für die Asteroidenmission Dawn, in seinem ausgezeichneten und bestens verständlichen Blog „Dawn Journal“ humorvoll die technischen und wissenschaftlichen Hintergründe dieser komplexen NASA-Mission. (Englisch)

BEST OF HUBBLE

go.nasa.gov/2o20Xt1

Phänomenale Bilder des Weltraumteleskops Hubble, die seit 1990 in einer gemeinsamen Mission von NASA und ESA die Erde erreichen, zeigt die NASA in einer Sammlung der Besten. Eine faszinierende Reise durch fremde Galaxien. (Englisch)

VERLASSEN

bit.ly/2pR7maz

Wie das Raumfahrtkontrollzentrum für den Flug Juri Gagarins 1961 ins All heute aussieht? Auf der Website kann man durch das verlassene Raumfahrtgelände wandern. Einstiger Fortschritt zeigt sich von seiner morbiden Seite – Staunen programmiert.

Das DLR im Überblick

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

In den 20 Standorten Köln (Sitz des Vorstands), Augsburg, Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Bremerhaven, Dresden, Göttingen, Hamburg, Jena, Jülich, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Oldenburg, Stade, Stuttgart, Trauen und Weilheim beschäftigt das DLR circa 8.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Das DLR unterhält Büros in Brüssel, Paris, Tokio und Washington D.C.

Impressum

DLR-Magazin – Das Magazin des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt

Herausgeber: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Redaktion: Matthias Ruchser (ViSdP), Cordula Tegen (Redaktionsleitung)
An dieser Ausgabe haben mitgewirkt: Manuela Braun, Philipp Burtscheidt, Falk Dambowsky, Julia Heil, Denise Nüssle, Elisabeth Schreier, Andreas Schütz und Melanie-Konstanze Wiese

DLR-Abteilung Politikbeziehungen und Kommunikation
Linder Höhe, 51147 Köln
Telefon 02203 601-2116
Telefax 02203 601-3249
E-Mail kommunikation@dlr.de

Druck: AZ Druck und Datentechnik GmbH, 87437 Kempten
Gestaltung: CD Werbeagentur GmbH, 53842 Troisdorf, www.cdonline.de

ISSN 2190-0094

Online:
DLR.de/dlr-magazin

Onlinebestellung:
DLR.de/magazin-abo

Die in den Texten verwendeten weiblichen oder männlichen Bezeichnungen für Personengruppen gelten für alle Geschlechter.

Nachdruck nur mit Zustimmung des Herausgebers und Quellenangabe. Die fachliche Richtigkeit der Namensbeiträge verantworten die Autoren. Hinweis gemäß § 33 Bundesdatenschutzgesetz: Die Anschriften der Postbezieher des DLR-Magazins sind in einer Adressdatei gespeichert, die mit Hilfe der automatischen Datenverarbeitung geführt wird.

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

ClimatePartner°
klimaneutral
Druck | ID 53106-1704-1001



Gedruckt auf umweltfreundlichem, chlorfrei gebleichtem Papier.

Titelbild

Der Stadtwald von Traunstein, mit Radaraugen gesehen (Beitrag ab Seite 8)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages