

Das DLR im Überblick

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

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

Impressum

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

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

Redaktion: Sabine Hoffmann (ViSdP), Cordula Tegen (Redaktionsleitung)
An dieser Ausgabe haben mitgewirkt: Manuela Braun, Martin Fleischmann, Julia Heil, Bernadette Jung, Fabian Locher und Jens Wücherpennig

DLR-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: 53106-1604-1003



Gedruckt auf umweltfreundlichem,
chlorfrei gebleichtem Papier.

Titelbild

Das TanDEM-X-Höhenmodell zeigt Gletscher auf Spitzbergen. Die Farben repräsentieren unterschiedliche Geländehöhen.

DLR magazin

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt · Nr. 150 · Juni 2016

SEHEN, WIE SICH DIE WELT VERÄNDERT

ZWISCHEN DEN SCHICHTEN: Atmosphärenforschung mit HALO

INS ALL MUSS MAN ERST MAL KOMMEN: Laserzündung von Triebwerken

OTTO LILIENTHAL: Der Mann, der Ordnung in die Aerodynamik brachte



Bild: DLR/Gesine Born

Liebe Leserinnen und Leser,

ob ich an den Klimawandel glaube, wurde ich kürzlich gefragt. Für mich ist der Klimawandel keine Glaubensfrage. Seitdem Menschen in großem Stil fossile Energieträger verbrennen, ist die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre von 280 ppm (Teile einer Million) auf dramatische 400 ppm gestiegen. Innerhalb eines Jahrhunderts hat sich die globale Durchschnittstemperatur um rund 0,8 Grad Celsius erhöht. Das lässt sich nicht mehr mit natürlicher Variabilität erklären. Auch der Weltklimarat ist sich sicher: Menschliches Verhalten hat die Erwärmung des Klimas bewirkt. Die Auswirkungen sind spürbar. Extreme Wetterereignisse wie Dürre, Starkregen und Hochwasser häufen sich. Künftig werden sich Klimazonen verschieben. Der steigende Meeresspiegel wird ganze Küstenstreifen überfluten. Die sicherheitspolitischen Folgen von knappem Trinkwasser und Menschenströmen, die ein neues Zuhause brauchen, sehen wir jetzt schon.

Was können wir also tun? – Mit der Energiewende kommt Deutschland schon jetzt eine Vorreiterrolle zu. Und der nationale Klimaschutzplan verfolgt ehrgeizige Ziele. Die Wissenschaft kann und muss Lösungswege zeigen. Das DLR leistet bereits wertvolle Beiträge, um die Konsequenzen menschlichen Handelns für die Umwelt einzudämmen. Es erarbeitet beispielsweise Leichtbaukonzepte für Flugzeuge und Autos, forscht mit der Industrie an umweltfreundlichen Flugzeugtriebwerken und entschlüsselt gemeinsam mit anderen Klimaforschern die Prozesse in der Atmosphäre. Fernerkundungsdaten helfen, Umweltveränderungen zu belegen.

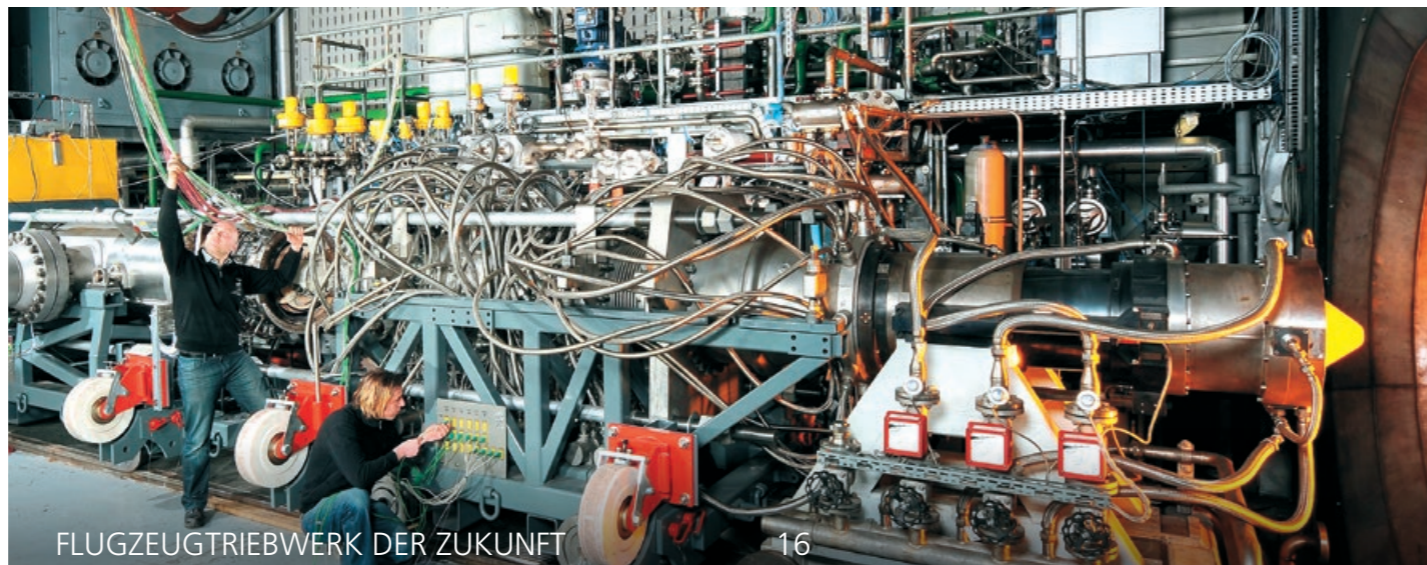
Ergebnisse im Sinne eines ökoeffizienten Fliegens können Sie auch auf der Internationalen Luft- und Raumfahrtausstellung, der ILA 2016 in Berlin, sehen. Wir freuen uns, wenn Sie vorbeischaun und sich selbst ein Bild machen. Alle die, die nicht nach Berlin kommen, informiert unser Magazin.

Sabine Hoffmann
Leiterin DLR-Kommunikation



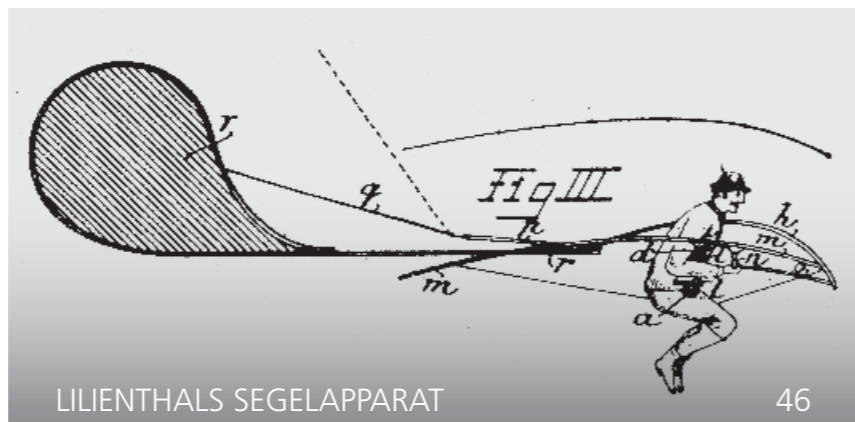
ZWISCHEN DEN SCHICHTEN

8



FLUGZEUGTRIEBWERK DER ZUKUNFT

16



LILIENTHALS SEGELAPPARAT

46



WAS NICHT VERBORGEN BLEIBEN DARF

22



KOMMENTAR

4

KOMMENTAR	4
MELDUNGEN	5
KURZMELDUNGEN	6
ZWISCHEN DEN SCHICHTEN	8
HALO: ideale Plattform für Klimaforscher	
FLUGZEUGTRIEBWERK DER ZUKUNFT	16
Rolls-Royce und DLR kooperieren	
NACH DER WELTKLIMAKONFERENZ	20
Wahrnehmen, wie sich die Welt verändert	
WAS NICHT VERBORGEN BLEIBEN DARF	22
Das Welterbe im Blick von Satelliten	
WENN DIE SONNE PLASMA SPUCKT	28
Vorhersage von Weltraumwetter	
AUTOMATISCH FALTENFREI	34
Blitzschutz für CFK-Flugzeugbauteile	
MIT LEICHTIGKEIT IN DIE SERIE	36
ARENA2036: Autofabrik der Zukunft	
INS ALL MUSS MAN ERST MAL KOMMEN	40
Künftige Trägerraketen zünden mit Lasern	
LILIENTHALS „NORMALSEGELAPPARAT“	46
Interview „125 Jahre Menschenflug“	
EXKLUSIV UND IMPOSANT	50
Teil 10 der Serie „Die Windmaschinen“	
FEUILLETON	
In Museen gesehen	54
Rezensionen	58
Linktipps	59

DER LUFT- UND RAUMFAHRT- STANDORT DEUTSCHLAND IN EINER WELT DES WANDELS

Ein Kommentar von Sigmar Gabriel, Bundesminister für Wirtschaft und Energie

Deutschland ist in der Luft- und Raumfahrt gut aufgestellt – in Forschung und Wissenschaft sowie in der Industrie. Mit zuletzt über 32 Milliarden Euro Umsatz und über 105.000 direkt Beschäftigten ist die Branche ein Garant für Spitzentechnologie, Wertschöpfung und gute Arbeit in Deutschland.

Diesen Erfolg verdanken wir auch dem DLR als starkem Forschungspartner der Industrie. Mit seinen 33 Instituten und mit Einrichtungen wie dem Raumfahrtmanagement oder als Projektträger ist das DLR im In- und Ausland eine renommierte Stimme. Auch neben dem DLR verfügt die deutsche Luft- und Raumfahrt über ein dichtes Netz aus Forschungseinrichtungen mit exzellentem Personal und einer hervorragenden Ausstattung. Diese Forschungsstärke ist für mich ein handfester Standortvorteil.

Doch die Welt bleibt nicht stehen. Neben den etablierten Luft- und Raumfahrtnationen verschaffen sich zunehmend neue Mitspieler mit eigener Industrie und einer aufstrebenden Forschung international Gehör. Hinzu kommt eine Vielzahl von gesellschaftlichen Herausforderungen, die es im Interesse der kommenden Generation zu bewältigen gilt. Umwelt- und Klimaschutz, die Gestaltung des demografischen Wandels und einer nachhaltigen Mobilität sowie der weltweite Kampf gegen Armut und für Entwicklung sind hier nur einige Stichworte.

Ich bin mir sicher: Jede dieser Herausforderungen ist zugleich eine Chance – gerade auch für die deutsche Luft- und Raumfahrt. Denn in Zeiten großer Aufgaben hat sie einmal mehr die Gelegenheit, ihre Stellung als Innovationsmotor zu beweisen. So arbeitet die Luftfahrt schon heute an ihrem Beitrag für ein Verkehrssystem der Zukunft, das globale Mobilität ermöglicht und zugleich natürliche Ressourcen schont. Auf diese Weise erschließen sich nicht nur neue Märkte für innovative Lösungen und Produkte, sondern es entsteht auch ein echter gesellschaftlicher Mehrwert.

In der Raumfahrt ist es unsere erklärte Priorität, Anwendungen für einen Nutzen auf der Erde zu generieren. In der Raumfahrtstrategie der Bundesregierung nennen wir das „Für die Erde ins All“.

Für die Aufgaben der Zukunft ist Partnerschaft nötig. Auf die Partnerschaft zwischen Forschung und Industrie habe ich schon hingewiesen. Aber gerade in Zeiten von Digitalisierung und Industrie 4.0 macht erfolgreiche Zusammenarbeit immer weniger an starren Disziplin- oder Branchengrenzen halt. Es kommt mehr denn je darauf an, übergreifend an den Problemen unserer Zeit zu arbeiten und Kräfte zu bündeln, wie wir dies zum Beispiel mit unseren Partnern im Bündnis für Industrie tun.

Speziell für die Luft- und Raumfahrt bietet zudem die ILA Berlin Air Show auch 2016 wieder eine gute Gelegenheit, sich zu vernetzen. Denn die ILA ist inzwischen viel mehr als eine Verkaufsmesse. Sie ist ein Marktplatz der Ideen und ein Schaufenster für Innovation. Das ist ein hervorragender Ansatz.

In diesem Jahr feiern wir auf der ILA den 125. Jahrestag des ersten Menschenfluges durch Otto Lilienthal. Dabei bin ich mir sicher: Mit Otto Lilienthal hat eine beispiellose Innovationsgeschichte begonnen, die längst nicht zu Ende ist, sondern gerade erst begonnen hat.



Bild: BMWi

Sigmar Gabriel, Bundesminister für Wirtschaft und Energie im Kabinett Merkel und Stellvertreter der Bundeskanzlerin seit 2013, Vorsitzender der SPD seit 2009

FLÜGELHINTERKANTEN, DIE KLAPPEN WIE EINE FLIEGENFALLE

Eine stufenlos verformbare Flügelhinterkante ist Ziel eines DLR-Projekts. Dafür stand die Venusfliegenfalle Modell. Die Neuerung soll die klassischen Landeklappen überflüssig machen. Der neue flexible Bewegungsmechanismus ist inspiriert vom Fangmechanismus der Venusfliegenfalle, einem der schnellsten im Pflanzenreich. Sie ist – damit kein Insekt entwischt – durch Druckänderung in den Blatzellen sowie eine evolutionäre Geometrie der Blattform in der Lage, die Beute in den zuklappenden Fangblättern festzuhalten. Das geschieht, sobald die Fühlborsten auf der Innenseite einen entsprechenden Reiz empfangen. Dieses Prinzip eines dynamischen Zellverbands, der mittels Druckveränderung bestimmte Formen annehmen kann, machen sich Forscher aus dem DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik für die Entwicklung einer neuen Flügelhinterkante zu Nutze.



Bild: J.W. Webb (CC BY-SA 2.0)

Die Wissenschaftler entwickelten einen weltweit einzigartigen Landeklappendemonstrator aus druckluftbetriebenen Kunststoffzellen, der flexibel diverse aerodynamische Formen für den Reise- oder Landeanflug annehmen kann. Der Vorteil einer solchen Flügeltechnologie ist, dass sich im Gegensatz zu den klassischen Landeklappen heutiger Verkehrsflugzeuge beim Ausfahren der Klappen keine Spalten ergeben, die die Aerodynamik beeinträchtigen. Ein Nachteil der klassischen Landeklappen ist zudem die aufwändige Mechanik, mit der sie betrieben werden, und deren Verkleidung, die zusammen mit den Spalten zu einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs sowie des Fluglärms beiträgt. Ihre neue Klappentechnologie wollen die Forscher demnächst im Windkanal testen.

Die Venusfliegenfalle dient mit der Struktur ihrer Fangblätter als Vorbild für die neuartige spaltenlose Landeklappentechnologie

s.DLR.de/9mp6

FLIEGENDE ROBOTER INSPIZIEREN WARTUNGSROBOTER

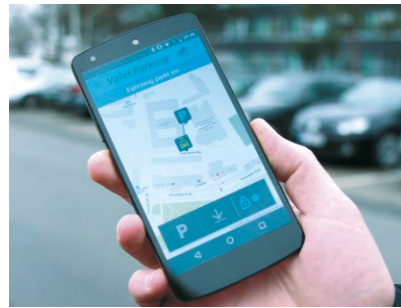
Mobile Inspektionsroboter krabbeln über Pipelines und ermitteln mit speziellen Sensoren kritische Stellen. – Was wie Zukunftsmusik klingt, ist längst Realität. Doch sobald diese Roboter gewartet werden müssen, führt kein Weg am Menschen vorbei. DLR-Wissenschaftler aus dem Institut für Robotik und Mechatronik fanden einen Weg, auch die Wartung in robotische Hände zu geben. Im EU-Projekt ARCAS (Aerial Robotics Cooperative Assembly System) wurde ein industrieller robotischer Greifarm mit sieben Freiheitsgraden in einen autonom fliegenden Hubschrauber integriert. Er ersetzt an schwer erreichbaren Stellen die menschliche Hand und kann ohne Gefahr die Roboter auf den Pipelines inspizieren und auch warten.



Autonomer Flettner-Hubschrauber mit integriertem robotischen Arm

Um die gewünschte Position zu erreichen, navigiert das System autonom mit GPS. Am Zielpunkt wechselt es auf ein präzises Bildverarbeitungssystem, das auf mehreren eingebauten Kameras basiert. So kann der Inspektionsroboter genau geortet und der Greifarm präzise an ihm platziert werden, um den Wartungsroboter zu fassen und an eine sichere Stelle zu transportieren oder ihn in der Zukunft auch über ihm schwebend direkt vor Ort zu reparieren. Solche Systeme könnten künftig auch zur Wartung von Satelliten oder sogar zum Aufbau von Habitaten auf anderen Planeten eingesetzt werden.

s.DLR.de/n9b1



AUTO PARKT ALLEIN

Dem automatisierten Parken wieder ein Stück näher kommen Ingenieure mit einer Anwendung, die dem Fahrzeug eine aktive Rolle zuweist: Es parkt vor dem Supermarkt selbstständig ein und kann nach dem Einkauf wieder zur Ausstiegsposition des Fahrers gerufen werden. Experten vom DLR und von T-Systems entwickelten die Idee des „Connected Valet Parking“.

Per Smartphone kommuniziert das Fahrzeug mit einer Datenplattform, die im Hintergrund Informationen und Services verwaltet und vernetzt, sodass das Auto selbstständig die Schranke passieren und einparken kann. Die Parkgebühr wird über das Mobiltelefon automatisch abgerechnet. Per elektronischem Schlüssel kann autorisiertes Supermarktpersonal sogar das Fahrzeug öffnen und die Ware hinterlegen.



ZUR BESSEREN LUFTRAUMNUTZUNG

Das DLR wird zusammen mit dem Nationalen Luft- und Raumfahrtlabor der Niederlande (NLR) Mitglied des EU-Forschungsprogramms Single European Sky ATM (Air Traffic Management) Research – kurz SESAR 2020. Ziel des Programms ist es, neue Systeme zur Vereinheitlichung des europäischen Luftraums zu entwickeln. Das Luftverkehrsmanagement-System in Europa befördert derzeit 1,6 Milliarden Fluggäste

auf jährlich rund 10 Millionen Flügen. Für das Jahr 2035 wird von 14,4 Millionen Flügen ausgegangen. In Anbetracht der teilweisen Fragmentierung des europäischen Luftraums und der vielen unterschiedlichen am Luftverkehr beteiligten Parteien wird dies für das Luftverkehrsmanagement eine enorme Herausforderung. Neuartige Prozeduren und Technologien sowie eine engere Zusammenarbeit sind deshalb unverzichtbar.

ZUSAMMENARBEIT MIT JAPAN

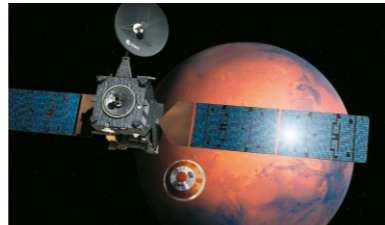
Das DLR und die japanische Raumfahrtbehörde JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) haben eine strategische Partnerschaft vereinbart. In deren Rahmen wollen sie bei der Weltraumnutzung sowie in Forschung und Entwicklung (beispielsweise unter Verwendung von L- und X-Band-Technologien in der radargestützten Erdbeobachtung) sowie beim Katastrophenmanagement zusammenarbeiten. Auch Forschungen an wiederverwendbaren Trägerraketen und gemeinsame Projekte bei der Erforschung unseres Sonnensystems sind geplant: Auf der JAXA-Mission Hayabusa2 fliegt derzeit das

DLR-Labor MASCOT, das auf dem Asteroiden Ryugu landen wird. Deutschland und Japan nutzen darüber hinaus die Internationale Raumstation ISS intensiv, um Fragen der Medizin, Materialentwicklung und Grundlagenforschung zu beantworten.



NÄCHSTER HALT: ROTER PLANET

Zur Suche nach Spuren biologischen Lebens ist seit 14. März ExoMars 2016 unterwegs. Die gemeinsame Mission von Europa und Russland soll im Oktober 2016 den Roten Planeten erreichen. An Bord der Proton-Rakete sind der Trace Gas Orbiter und der Landeroboter Schiaparelli. Während der Lander auf der Marsoberfläche Daten sammeln soll, wird der Orbiter mit vier Instrumenten in 400 Kilometer Höhe über dem Planeten die Atmosphäre untersuchen. Dabei ist besonders das Spurengas Methan interessant. Da es nicht nur durch geologische, sondern auch biologische Prozesse entsteht, kann es Hinweise auf Leben geben. Schiaparelli erprobt für die schwierige Marslandung diverse Technologien wie Hitzeschutzmaterialien, Fallschirm, Höhenradarmesser und ein Triebwerkssystem für die letzte Landephase.



LANDMINEN SCHNELLER AUFSPÜREN

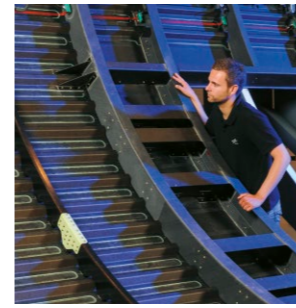
Ein transportables System zur Suche von Landminen wurde von DLR-Radarforschern entwickelt. Es macht deren schnelle, sichere und kostengünstige Detektion möglich. Das Radarsystem findet auf der Ladefläche eines Kleinlastwagens Platz und ist mit mehreren Sende- und Empfangsantennen ausgestattet. Die Antennen arbeiten im Ultrahochfrequenz-Bereich zwischen 500 Megahertz und drei Gigahertz und sind seitwärts schräg nach unten gerichtet. So können sich die Einsatzkräfte mit dem Fahrzeug auf sicherem Terrain fortbewegen, während das Radar ein nahegelegenes kontaminiertes Gebiet abtastet. Jeder Boden reflektiert Radarsignale in unterschiedlicher Intensität. Alle während der Entlangfahrt aufgenommenen Radarechos werden von dem System mit Hilfe ausgeklügelter Algorithmen verarbeitet, sodass schließlich „Intensitätskarten“ entstehen.



SATELLITENDATEN FÜR ERNEUERBARE ENERGIE

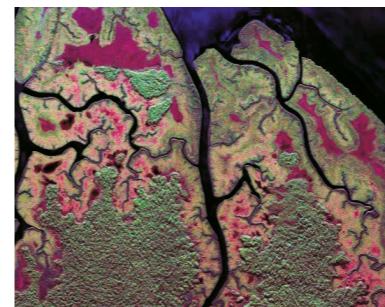
Das vom Raumfahrtmanagement im DLR geförderte Projekt COP4EE steht für Methoden und Dienste, mit denen sich Satellitenbilddaten für Energieplaner aufbereiten lassen. Sie informieren über Flächen für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Die Nutzer können dabei vor allem auf die Daten der „Wächter“-Satelliten des europäischen Copernicus-Programms bauen. Sentinel-1 und -2 überfliegen spezielle Planungsgebiete alle sechs Tage und machen dabei hochauflösende Bilder von der Erdoberfläche. So lassen sich Informationsreihen über Windverhältnisse, Biomasse-Änderungen oder auch Geländeerodationen erstellen. Außerdem können Daten der deutschen Programme RapidEye und TerraSAR-X genutzt werden, wobei die Daten von TerraSAR-X besonders interessant sind, weil dessen Radarstrahlung auch Wolken durchdringt.

NERVENSYSTEM FÜR BAUTEILE



Um Bauteile aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) für Flugzeuge noch sicherer zu machen, hat das DLR ein Flugzeugbauteil aus CFK entwickelt und gebaut, das Auskunft über die Größe und den Ort einer Beschädigung geben kann. So muss das defekte Teil nicht mehr ausgebaut und aufwändig untersucht werden, Wartung und Instandsetzung werden vereinfacht und kein Schaden bleibt unentdeckt. Das CFK-Bauteil wurde mit einer Art Nervenetzwerk ausgestattet. 584 Sensoren sind in einen fünf mal sieben Meter großen Rumpfausschnitt integriert. Nimmt ein Flugzeug Schaden, zum Beispiel dadurch, dass beim Beladen angeeckt wird, muss zukünftig nicht erst ein Techniker kommen, um den Defekt aufzuspüren. Per Knopfdruck gibt die Struktur Auskunft, an welcher Stelle was kaputt ist.

REGENWALD IM RADARBlick



Mit dem zweimotorigen Forschungsflugzeug DO 228-212, das mit hochmoderner Radartechnologie bestückt wurde, flogen DLR-Wissenschaftler im zentralafrikanischen Gabun zahlreiche Messflüge. Sie bestimmten so den Zustand des Regenwaldes. Die Daten helfen, Klimamodelle zu verbessern und die Erderwärmung zu verstehen. Das Klimasystem der Erde ist hochkomplex und abhängig von vielen Faktoren. Circa ein Drittel der Landoberfläche der Welt ist mit Wald bedeckt. Da in seiner Biomasse die Hälfte des gesamten Kohlenstoffs gebunden ist, wirken sich beispielsweise Rodungen oder Windwurf besonders stark aus. Aber auch der Effekt von Wiederaufforstungen auf den Kohlenstoffkreislauf lässt sich noch nicht genau bestimmen. Deshalb ist die globale Bestandsaufnahme des Waldes und der Änderungen besonders wichtig.

STUDENTISCHE RAKETENEXPERIMENTE

Im Rahmen der studentischen Raketenexperimente, die regelmäßig vom Raumfahrtzentrum Esrange im nordschwedischen Kiruna gestartet werden, fand im März 2016 mit REXUS 19 und 20 wieder eine Doppelkampagne statt. 45 Studierende von acht Teams aus fünf Ländern hatten für die Flüge in mehr als 70 Kilometer Höhe selbstständig Experimente entwickelt, gebaut und durchgeführt. Bei den Flügen der sechs Meter langen Forschungsraketen herrschte jeweils für zwei Minuten nahezu Schwerelosigkeit. Bei den Experimenten



REGIONALMELDUNGEN

LAMPOLDSHAUSEN: Welche Raumfahrtantriebe bringen uns zukünftig ins All? Wie sehen die Entwicklungen bei den Raumfahrtantrieben aus? Reichen Europas Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in diesem Bereich aus? – Diese Fragen diskutierten Raumfahrtexperten beim 4. Industrial Day am 9. und 10. März 2016 im DLR Lampoldshausen. Raumfahrtantriebe auf Basis flüssiger chemischer Treibstoffe sind eine Stärke des DLR – seit Jahrzehnten baut das DLR seine Forschung auf diesem Gebiet aus und investiert in entsprechende Prüfstandanlagen. Auch die neue Unterstufe der Ariane 6 erhält ein neues Triebwerk, bei dem unter anderem eine neue Sandwichdüse zum Einsatz kommt. Für die Entwicklungs- und Qualifizierungstests des Vulcain 2.1, die ab 2017 geplant sind, wird der Prüfstand P5 des DLR gegenwärtig an die neuen Anforderungen angepasst.

BRAUNSCHWEIG: Um das Verhalten von Radfahrern und Lkw-Fahrern im Straßenverkehr zu beobachten, haben das DLR und die Jenoptik Traffic Solutions an der Braunschweiger Forschungskreuzung Säulen mit Sensoren aufgestellt. Diese sollen die Bewegungsabläufe der Verkehrsobjekte erfassen. Mit den ermittelten Daten wird erforscht, wie Unfälle bei Abbiegemanövern in Zukunft vermieden werden können.

OBERPFAFFENHOFEN: Zusammen mit dem Gräfelinger Kurt-Huber-Gymnasium führt das DLR_School_Lab in Oberpfaffenhofen ein Schülerprojekt mit der israelischen Ben-Gurion-Universität des Negev in Beer-Sheeva durch. 20 Jugendliche sollen unter Verwendung spezieller Kameras die spezifischen Umweltbedingungen der Partnerregion erforschen, ohne selbst vor Ort zu sein. Sie lernen so die Methoden der Satellitenfernerkundung kennen.

BERLIN: Am 11. Juni 2016 öffnet das DLR in Berlin von 17 bis 0 Uhr wieder seine Türen für die Lange Nacht der Wissenschaften. Interessierte Besucher können sich dann über neue Entwicklungen in der Satellitentechnik, Planetenforschung sowie Verkehrsforschung informieren und auch selbst experimentieren. Ein Publikumsmagnet wird sicher wieder ein 3D-Flug über den Mars sein. Wer nicht zum Roten Planeten reisen will, kann in diesem Jahr erstmals auch Helgoland im 3D-Überflug erleben.

GÖTTINGEN: Die fünf besten deutschen Nachwuchsphysiker treten im Juli bei der Internationalen Physik-Olympiade in Zürich an. Die Bundesrunde, bei der zunächst die 15 besten Schülerinnen und Schüler aus 50 Teilnehmern ermittelt worden waren, hatte im DLR Göttingen stattgefunden. Dort hatten sich die Vertreter aus sächsischen Schulen als überproportional stark erwiesen.

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

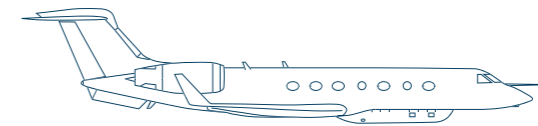
DLR.de/newsletter



HALO auf dem Rollfeld im nordschwedischen Kiruna: Für die Klimaforschung in der Nordpolarregion ist HALO das ideale Allzweck-Werkzeug. Das Forschungsflugzeug ist flexibel einsetzbar, hat eine Reichweite von 8.000 Kilometern, viel Platz für wissenschaftliche Instrumente und kann bis auf 15 Kilometer Höhe aufsteigen. Mit diesen Fähigkeiten ist HALO als eines von wenigen Forschungsflugzeugen in der Lage, bis zum Nordpol zu fliegen.

Bild: DLR/Andreas Milmik

ZWISCHEN DEN SCHICHTEN



HALO: die ideale Plattform für Klimaforscher. Bei den drei jüngsten Messkampagnen stellte das Atmosphärenforschungsflugzeug seine Leistungsfähigkeit unter Beweis.

Von Fabian Locher

Am eisigen Nordpolarkreis erkundeten Wissenschaftler des DLR von Dezember 2015 bis März 2016 den Klimawandel und dessen Auswirkungen auf die polare Atmosphäre. Dabei arbeiteten sie zusammen mit weiteren deutschen Forschungseinrichtungen. Im Verlauf von drei Messkampagnen (POLSTRACC, SALSA, GW-LCYCLE) untersuchten sie mit den Forschungsflugzeugen HALO (High Altitude and Long Range Research Aircraft) und der DLR-Falcon die Veränderung der Zusammensetzungen der Atmosphäre im polaren Winter.

Ein Ziel der Kampagne POLSTRACC (Polar Stratosphere in a Changing Climate) ist die Untersuchung der polaren Ozonchemie. Seit den späten Neunzigerjahren erholt sich die Ozonschicht. Das ist vor allem den strengen Regularien für den Ausstoß der klimaschädlichen Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) zu verdanken. Doch Ozon schützt nicht nur unsere Erde vor gefährlicher Sonnenstrahlung – es ist selbst ein Treibhausgas. Besonders in der Tropopausenregion, der Übergangsschicht zwischen Troposphäre und Stratosphäre in acht bis 16 Kilometer Höhe, hat Ozon eine starke Wirkung auf das Klima. Aufgrund des Anstiegs der Kohlendioxid-Emissionen nimmt die Temperatur am Boden und in der Troposphäre zu – in der Stratosphäre hingegen sinken die Temperaturen. Das kann besonders in der Arktis dazu führen, dass sich mehr polare Stratosphärenwolken bilden. Diese befördern den Abbau der schützenden Ozonschicht. Denn während sich im Frühjahr in der südlichen Hemisphäre regelmäßig ein ausgedehntes Ozonloch über der Antarktis bildet, ist der Ozonabbau in der Nordpolarregion normalerweise weniger stark ausgeprägt. Doch im Winter 2015/2016 war das anders: „Wir hatten in der arktischen Stratosphäre 2015/2016 eine extreme Kälteperiode mit Temperaturen bis zu minus 90 Grad. Dadurch konnten wir über mehrere Wochen ausgedehnte Felder von polaren Stratosphärenwolken beobachten und ihre Wirkung auf das Ozon untersuchen“, erklärt Prof. Christiane Voigt, wissenschaftliche Koordinatorin der DLR-Aktivitäten während der POLSTRACC-Kampagne. Das erhöhte Aufkommen von Stratosphärenwolken trug so bereits Anfang März 2015 dazu bei, dass sich die Ozonschicht im polaren Wirbel um fast 50 Prozent reduzierte.

Aus Messungen in einem einzelnen Winter lässt sich im Allgemeinen noch kein Trend ableiten. Die DLR-Forscher gehen jedoch davon aus, dass bei einer weiteren Abkühlung der Stratosphäre die Anzahl der kalten Winter in der Arktis steigt und sich somit der nordpolare Ozonabbau verstärken wird. Da Ozon einen Teil der solaren Strahlung absorbiert, würde die dünnere Ozonschicht zukünftig besonders im Frühling zu einer erhöhten UV-Belastung der Bevölkerung in nördlichen und mittleren Breiten führen.

Für die jüngste Kampagne wurde das Forschungsflugzeug HALO von Wissenschaftlern des DLR-Instituts für Physik der Atmosphäre mit einem Laserspektrometer zur Messung der Stratosphärenwolken sowie mit einem Stickoxid-Instrument zur Bestimmung der Salpetersäure in den Wolken ausgerüstet. Außerdem sollte ein Massenspektrometer die Chlorverbindungen analysieren. Die Messkampagne POLSTRACC wurde gemeinsam mit der Mission SALSA (Seasonality of Air mass transport and origin in the Lowermost Stratosphere using the HALO Aircraft) unter der Leitung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der Universität Frankfurt durchgeführt.

Der Fokus des GW-LCYCLE-Experiments (Gravity Wave Life Cycle Experiment) wiederum lag auf der Untersuchung der Schwerewellen-Ausbreitung. Diese von der Schwerkraft getriebenen Schwankungen von Luftmassen werden in den unteren Schichten der Atmosphäre angeregt, beispielsweise von Luftströmen über Bergen. Dabei entstehende Wirbel transportieren Energie und Impulse in die höheren Schichten der Atmosphäre, wo sie oberhalb von 50 Kilometer Höhe (Strato- beziehungsweise Mesosphäre) instabil werden und brechen. Das verursacht Wind- und Temperaturschwankungen, beeinflusst den Energiehaushalt und langfristig auch das Klima. Wie sich die Schwerewellen aber genau auf die Erderwärmung auswirken, ist bislang unzureichend erforscht. Studien zum Phänomen Schwerewellen gibt es zwar, allerdings wurden

sie meist entweder in den unteren oder in den oberen Atmosphärenschichten erforscht. Die einzelnen Schichten der Atmosphäre befinden sich aber in einem ständigen Austausch. Deshalb griffen die Wissenschaftler diesmal auf ein zweites Flugzeug der DLR-Forschungsflotte zurück: die Falcon. In einigen kombinierten Flugexperimenten flogen Falcon und HALO übereinander in Formation: HALO richtete seine Messinstrumente in Richtung obere Atmosphäre aus und die Falcon nahm die unteren Atmosphärenschichten in den Blick. „HALO flog dazu in dem spannenden Übergangsbereich der atmosphärischen Schichten. Die Falcon hingegen flog wesentlich tiefer und richtete die Messinstrumente zum Teil nach unten und zum Teil nach oben aus, in bis zu 85 Kilometer Höhe“, erklärt Oliver Brieger, Leiter des DLR-Forschungsflugbetriebs.

Für die Messungen der Schwerewellen wurden verschiedene Instrumente verwendet: Lasergeräte für die Wind-, Spurengas- und Aerosol-detektion, ein abbildendes Infrarotspektrometer zur Fernerkundung der 3D-Verteilung von Temperatur und Spurengasen sowie Geräte für die In-situ(vor Ort)-Messung der Konzentration von Spurengasen in der Atmosphäre. Da Schwerewellen sehr kleinräumige Erscheinungen sind und sich sehr schwer messen lassen, wählten die DLR-Wissenschaftler einen kreativen Ansatz: Sie filmten mit einer speziellen Kamera das Aufeinandertreffen von Schwerewellen im sogenannten „Luftleuchten“, einem Phänomen, das durch chemische Reaktionen in etwa 85 Kilometer Höhe (Ionosphäre) verursacht wird.

„Früher war es nur möglich, Schwerewellen in der unteren oder in der oberen Atmosphäre zu messen. Jetzt konnten wir sie durchgängig erfassen“, freut sich Prof. Markus Rapp, Direktor des DLR-Instituts für Physik der Atmosphäre. „Das ist ein wichtiger Schritt für die Klimaforschung, um atmosphärische Strömungsmuster zu verstehen und Prognosen zu erstellen.“



HALO kurz vor dem Start: Das Atmosphärenforschungsflugzeug basiert auf einem Ultra Long Range Business Jet G 550 der Firma Gulfstream. Die Kombination aus großer Reichweite, Flughöhe, Nutzlast und umfangreicher Instrumentierung macht das Flugzeug zu einer weltweit einzigartigen Forschungsplattform.



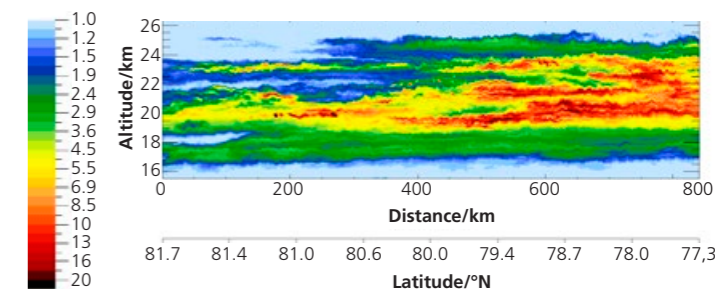
Blick ins Cockpit: Der Übergangsbereich zwischen Troposphäre und Stratosphäre in einer Höhe von bis zu 16 Kilometern ist messtechnisch schwierig zu erschließen. Diese Region beeinflusst jedoch ganz wesentlich den atmosphärischen Energiehaushalt, die Oxidationsfähigkeit und den Vertikaltransport von Impuls- und Spurengasen. Darüber hinaus ist der Einfluss von Eiswolken in großen Höhen (Zirren) auf Klimastörungen von enormer Bedeutung. Der Klimaeffekt kann dadurch verstärkt oder abgeschwächt werden.



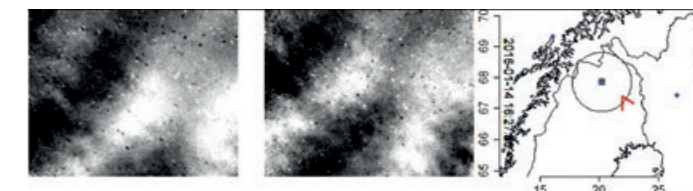
Massenspektrometer AIMS: Um die in der Atmosphäre ablaufenden Prozesse besser zu verstehen, ist es wichtig, dort vorhandene Partikel zu charakterisieren. Dazu muss deren chemische Zusammensetzung bestimmt werden. Mit dem Aerosol-Ionenfallen-Massenspektrometer (AIMS) können die Wissenschaftler organische Partikel analysieren.



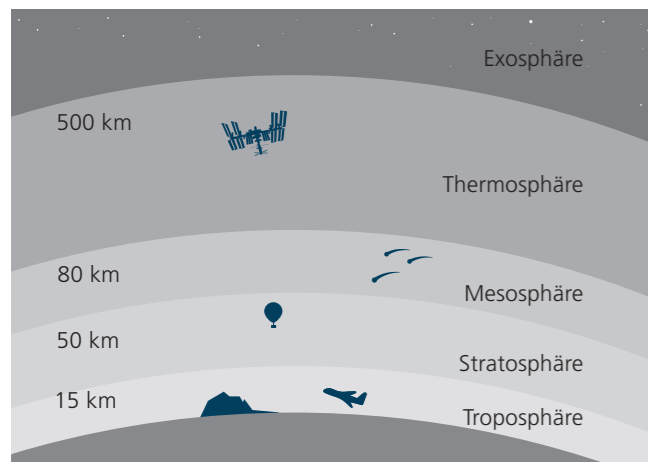
Der Innenraum von HALO: Bis zu 15 Racks für wissenschaftliche Messgeräte passen in die Kabine. Vorne rechts: zwei Messinstrumente zur Bestimmung der Luftfeuchtigkeit (Hygrometer) und ein Ozongerät. Im Hintergrund sieht man das atmosphärische Massenspektrometer AIMS (Aerosol-Ionenfallen-Massenspektrometer). Es misst Halogen- und Stickoxidverbindungen, die den polaren Ozonabbau fördern.



Bei der POLSTRACC-Kampagne haben DLR-Forscher in der Nordpolregion mit dem Lidar-Instrument (Light Detection And Ranging) polare Stratosphärenwolken (PSC) gemessen. Zu sehen ist eine horizontal ausgedehnte PSC in 17 bis 25 Kilometer Höhe. Sie besteht im Kern aus einer Eiswolke, die in Wolkenschichten aus unterkühlten Tröpfchen und salpetersäurehaltigen festen Partikeln eingebettet ist. An der Oberfläche der Wolkenpartikel werden halogenhaltige Verbindungen prozessiert. Im Polarfrühling werden diese Verbindungen aktiviert und führen zum polaren Ozonverlust. Die roten Bereiche zeigen stark rückstreuende Eiswolken an, die den polaren Ozonabbau beschleunigen.



Die Bilder zeigen die Veränderung eines Schwerewellenfelds innerhalb weniger Sekunden. Die schwarz-weißen Punkte sind Reste der Sterne, die nicht gänzlich herausgerechnet und durch das Differenzbild verstärkt wurden. Das Bild ganz rechts zeigt das nördliche Skandinavien. Der rote Pfeil markiert die Position der DLR-Falcon. Die blauen Punkte sind bodengebundene Messstationen.



Die jüngsten Messkampagnen führten in den spannenden Übergangsbereich von der Troposphäre zur Stratosphäre

ZUR MISSION AM NORDPOLARKREIS

Bei der jüngsten Mission erkundeten DLR-Wissenschaftler in Kooperation mit weiteren deutschen Forschungseinrichtungen die komplexen Prozesse des Klimawandels und deren Auswirkungen auf die polare Atmosphäre. Mit dem Forschungsflugzeug HALO (High Altitude and Long Range Research Aircraft) wurden in drei Messkampagnen Veränderungen der Zusammensetzung der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre im Polarwinter untersucht.

HALO – FLAGGSCHIFF DER DEUTSCHEN KLIMAFORSCHER

HALO ist ein Gemeinschaftsprojekt deutscher Umwelt- und Klimaforschungseinrichtungen und wird getragen von Zuwendungen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Das Konsortium setzt sich zusammen aus der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), der Max-Planck-Gesellschaft (MPG), der Leibniz-Gemeinschaft, dem Freistaat Bayern und der Helmholtz-Gemeinschaft mit ihren Mitgliedern Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Deutsches GeoForschungszentrum Potsdam (GFZ), Forschungszentrum Jülich (FZJ) und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Beteiligt sind zudem zahlreiche Universitäten. Seit Januar 2016 regelt ein neuer Rahmenvertrag des HALO-Konsortiums den effizienten Betrieb der Forschungsplattform für die nächsten Jahre.

VERSTEHEN, WAS AM HIMMEL PASSIERT

Herr Gemsa, Ihr Arbeitsplatz als Testpilot im DLR Oberpfaffenhofen sind die Cockpits von Falcon und HALO sowie anderer Forschungsflugzeuge. Wie lange fliegen Sie schon? Nächstes Jahr werden es 30 Jahre.

Und auf wie viele Flugstunden kommen Sie da?
Insgesamt habe ich um die 7.000 Flugstunden absolviert.

Wie kamen Sie zur Fliegerei?

Das Thema Fliegen fasziniert mich, so lange ich denken kann, das fand ich schon immer cool. Natürlich wird man nicht direkt Testpilot. Wo ich aufgewachsen bin, gibt es einen kleinen Flugplatz. Da habe ich als Fünfzehnjähriger mit Segelfliegen angefangen. Seitdem hat mich die Fliegerei nicht mehr losgelassen. Nach dem Abitur zog ich nach Stuttgart, um Luft- und Raumfahrttechnik zu studieren. Dort habe ich im Anschluss noch als Wissenschaftler gearbeitet und an adaptiven Tragflügelssystemen geforscht. Irgendwann habe ich aber das wirkliche Fliegen vermisst ... Deshalb habe ich meinen Pilotenschein gemacht und eine Zeit lang als Fluglehrer gearbeitet.

Und wie wurden Sie Testpilot?

Ich habe zunächst als technischer Flugzeugführer beim DLR gearbeitet und wurde dann ab 2004 zum Testpiloten ausgebildet.

Inzwischen fliegen Sie ja alle Forschungsflugzeuge, die im DLR Oberpfaffenhofen stationiert sind: HALO, Falcon, die DO228 und die Cessna 208B Grand Caravan. Jetzt mal Hand aufs Herz: Haben Sie einen Favoriten?

Ganz ehrlich: Das sind alles tolle Flugzeuge. Jedes ist auf seinen Aufgabenbereich optimal ausgerichtet. HALO ist zum Beispiel ein ausgemachtes Langstreckenflugzeug und für Klimaforschungsmissionen ideal. Die DO228 hingegen wird vor allem für Fernerkundungsmissionen genutzt. Mit ihr kann man auch mal auf einer Schotterpiste landen oder von ganz kurzen Bahnen aus starten. Das hat auch seinen Reiz. Aber mit der DO kann man keine 12.000 Kilometer am Stück fliegen wie mit HALO, der speziell für hohe und lange Flüge deutscher Umwelt- und Klimaforschungseinrichtungen umgebauten Gulfstream 550. Jeder Einsatz hat seinen eigenen speziellen fliegerischen Charme – da kann ich wirklich nicht von einem „Lieblingsflieger“ sprechen. Die Abwechslung macht wohl den Reiz aus.

HALO fliegt ja im Auftrag verschiedenster Forschergruppen. Spüren Sie manchmal den Erwartungsdruck der Wissenschaftler auf Ihren Piloten-Schultern?

Die Erwartungen sind stets hoch. Die Projekte kosten viel Geld und die Wissenschaftler erwarten gute Messungen. Aber: Die Sicherheit hat immer Vorrang. Alle Mitfliegenden sollen am Abend wieder sicher daheim sein. Darauf richte ich als Pilot das Augenmerk bei jeder Mission. Wenn ich das hinkriege und am Ende des Tages auch gute wissenschaftliche Ergebnisse vorliegen, dann war es ein toller Flug.

Sie konzentrieren sich also ausschließlich aufs Fliegen und blenden die wissenschaftlichen Aufgaben in der Zeit in der Luft aus? (Überlegt) Das würde so auch nicht stimmen. Das Flugzeug ist ja für die Wissenschaft unterwegs. Dafür wurde es gebaut und dafür wird es bezahlt. Mein Job als Pilot ist es, so zu fliegen, dass die Missionsziele bestmöglich erreicht werden, ohne dass die Sicherheit infrage gestellt wird.

Bestimmt Stoff für lebhafte Diskussionen ...

Definitiv! Wissenschaftler wägen ja erst mal nicht ab, was fliegerisch möglich ist – das sollen sie auch gar nicht. Sie wissen ja nicht, was vertretbar ist und wo die Maschine an ihre Grenzen kommt. Die Kollegen denken immer groß und haben vielfältige Wünsche. Ich finde, so sollte man als Wissenschaftler auch an das Thema Forschungsflüge herangehen. Unsere Aufgabe ist es wiederum, die Maximalvorstellungen der Wissenschaftler so weit zu filtern, dass wir einen sicher durchführbaren Flug gewährleisten und gleichzeitig das Maximum an Daten sammeln können. Dieses Spannungsfeld ist immer da. Das muss man aushalten können. Aber zum Glück sind Wissenschaftler ja intelligente Menschen, die plausible Argumente verstehen und nachvollziehen können (schmunzelt).

Wie gründlich beschäftigen Sie sich im Vorfeld mit dem wissenschaftlichen Hintergrund der Mission?

Im vollen Umfang kann ich mich natürlich nicht mit den Themen auseinandersetzen. Dafür sind sie zu komplex und zu unterschiedlich. Das kann und muss ich auch gar nicht. Aber: Je besser die Wissenschaftler uns Piloten verständlich machen, wonach sie suchen, umso bessere Ergebnisse kriegen wir aus jedem Messflug. Ich bin auch schon Messkampagnen geflogen, da wusste ich überhaupt nicht, um was es den Wissenschaftlern ging; da war ich reiner Busfahrer. Aber gerade bei der jüngsten HALO-Mission in Kiruna haben wir tolle Ergebnisse erzielt – einfach weil wir wussten, was die Kollegen wirklich untersuchen wollten. Mit uns im Cockpit steht sozusagen eine Datenquelle mehr zur Verfügung – unsere Erfahrung. Die meisten Wissenschaftler wissen diese zu nutzen und viele sehen uns Piloten wie zusätzliches wissenschaftliches Instrumentarium.

Ein erfahrener Pilot als zusätzliches Messinstrument?

Ja, denn wenn mit uns Piloten vorher keiner redet, dann fliegen wir stur die uns vorgegebene Route ab. Wenn wir aber verstanden haben, worum es geht, können wir während des Fluges aus unseren Erfahrungen heraus Hinweise geben, die wertvoll für die Mission sein können. Manchmal können wir noch vor den Messinstrumenten sagen, was im nächsten Moment passieren wird. Wenn Fahrtschwankungen auftreten oder sich die Temperatur verändert oder wir in andere Wolkenformationen hineinfliegen, dann bemerken, spüren und sehen wir Piloten das als Erste. So wissen wir auch, ob wir für die jeweilige Aufgabe an der optimalen Stelle messen oder ob wir besser woanders hinfliegen sollten.

Was war das Besondere an der jüngsten Mission am Nordpolarkreis?

Es war das erste Mal, dass wir mit HALO in einem solch eisigen Klima geflogen sind. Die Temperaturen lagen teils bei unter minus dreißig Grad. Die Landebahn war komplett mit Eis bedeckt. Die Kollegen vor Ort

bestreuten die Bahn mit heißem Sand, der das Eis zum Schmelzen bringt, sodass man dann wie auf Asphalt rollt. Anders könnte man gar nicht gefahrlos starten und landen – das war auch für mich neu und spannend zu erleben.

Sie fliegen ja teilweise in sehr abgelegenen Gegenden der Erde. Gibt es Momente, in denen Sie ehrfürchtig werden vor der Natur?

Auf jeden Fall. In der Polarnacht zum Beispiel gibt es kein Streulicht mehr. Da ist die Nacht nicht grau oder irgendwo noch ein winziges bisschen hell, sondern schwarz und man sieht unendlich viele Sterne am Himmel. Dafür haben wir viele Polarlichter gesehen – das ist jedes Mal ein Spektakel.

Vermissen Sie in der unbewohnten Weite die Zivilisation?

Den normalen zivilisatorischen Wahnsinn vergisst man relativ schnell und vermisst ihn auch nicht. Umso mehr ist man geschockt, wenn man wieder daheim ist (lacht).

30 Jahre werden es bald, in denen Sie über oder in den Wolken arbeiten. Wie lange wollen Sie noch fliegen?

So lange ich Spaß daran hab!

Das Gespräch führte Fabian Locher.



Die DLR-Falcon beim Start im nordschwedischen Kiruna

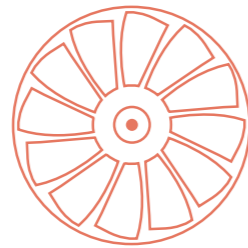




40 JAHRE FALCON

Herzlichen Glückwunsch, Falcon! Am 16. Juli 2016 ist das Forschungsflugzeug mit der Kennung D-CMET seit 40 Jahren für die Atmosphärenforschung im Einsatz. Das immer noch hochmoderne Flugzeug hat sich längst eine Spitzenposition unter den europäischen Forschungsflugzeugen gesichert. Der zweistrahlige Jet fliegt in Höhen von bis zu 12.800 Metern. Seine extrem robuste und wendige Bauart erlaubt sogar Messungen in der Nähe von Gewittern oder in nur 30 Meter Entfernung hinter den Triebwerken eines Verkehrsflugzeugs. Nach dem Ausbruch des Vulkans Eyjafjallajökull auf Island 2010 erlangte die Falcon als „Volcano Ash Hunter“ internationale Berühmtheit.

WIN-WIN-SITUATION FÜR DAS TRIEBWERK DER ZUKUNFT



Seit 20 Jahren arbeiten das DLR und Rolls-Royce in Forschung und Entwicklung für umweltfreundliche Flugtriebwerke zusammen.

Von Patrick Hoeveler

Wie wird die Verkehrsfluffahrt in den kommenden Jahrzehnten aussehen? Und welche Entwicklungen gibt es bei den künftigen Flugantrieben? Um Antworten auf diese Fragen zu finden, arbeiten die DLR-Spezialisten eng mit den Fachleuten in Industrie und Wissenschaft zusammen. Einer der wichtigsten Partner ist das Triebwerkunternehmen Rolls-Royce. Erst im vergangenen November haben DLR und Rolls-Royce einen Kooperationsvertrag unterzeichnet. Sein Ziel: intensivere Forschung. Die gemeinsamen Aktivitäten umfassen letztendlich das gesamte Triebwerk, von der Bauteilintegration über Verdichter und die Brennkammer bis hin zur Turbine.

Trotz aller Fortschritte bei den aktuellen Triebwerken für Zivilflugzeuge müssen die Entwicklungsingenieure für zukünftige Antriebe noch einige Herausforderungen meistern. „Ein ganz großes Thema ist weiterhin die Frage des Klimaschutzes. Das heißt, wir müssen den Ausstoß von Kohlenstoffdioxid reduzieren“, sagt Prof. Dr.-Ing. Manfred Aigner, Direktor des DLR-Instituts für Verbrennungstechnik in Stuttgart. Und dies nicht zu knapp: Bis zum Jahr 2050 soll der Kohlendioxid-Ausstoß pro Passagierkilometer um 75 Prozent sinken. So hat es die Europäische Kommission in ihren Anforderungen an den künftigen Luftverkehr formuliert. Den Ausgangspunkt der „Flightpath-2050“ genannten Initiative bildet der Standard eines Verkehrsflugzeugs aus dem Jahr 2000.

Verstehen, was in der Brennkammer passiert

Um die Vorgabe zu erreichen, werden die Forscher mit dem Wirkungsgrad künftiger Triebwerke in neue Dimensionen vordringen. Die dazu nötigen höheren Druckverhältnisse und Temperaturen machen jedoch den für die Brennkammer zuständigen Ingenieuren das Leben schwer. „Die chemischen Prozesse, die während der Verbrennung ablaufen, führen bei größeren Temperaturen zu mehr Schadstoffen, und das erfolgt bei höheren Drücken auch in höherem Tempo“, erklärt Dr.-Ing. Christoph Hassa vom DLR-Institut für Antriebstechnik in Köln. Dennoch müssen die Stickoxid-Emissionen laut EU-Zielvorgabe um 90 Prozent reduziert werden. Um diesen Widerspruch zu lösen, kommt in neuen Großtriebwerken die sogenannte Mager-Brennkammer zum

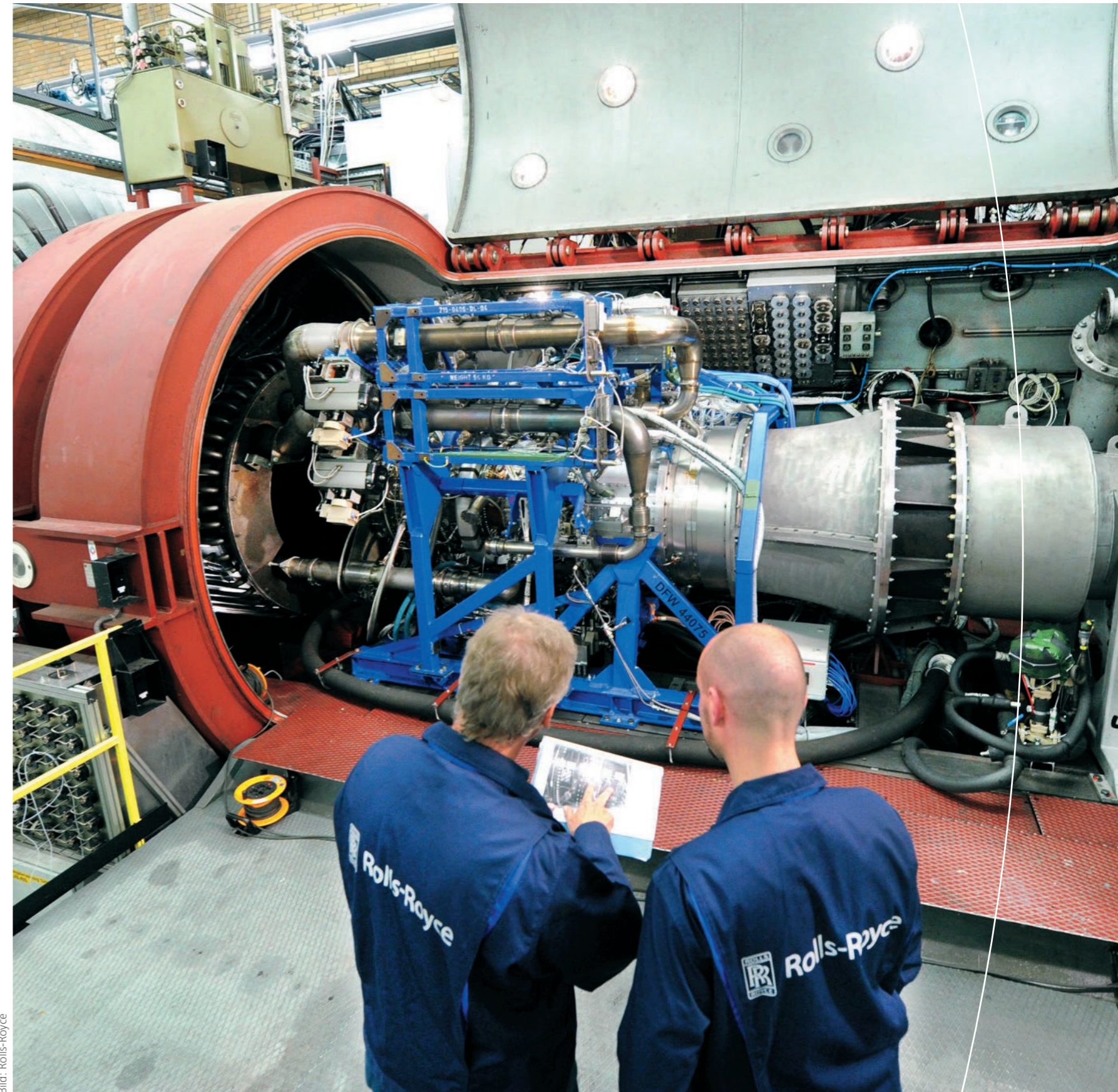
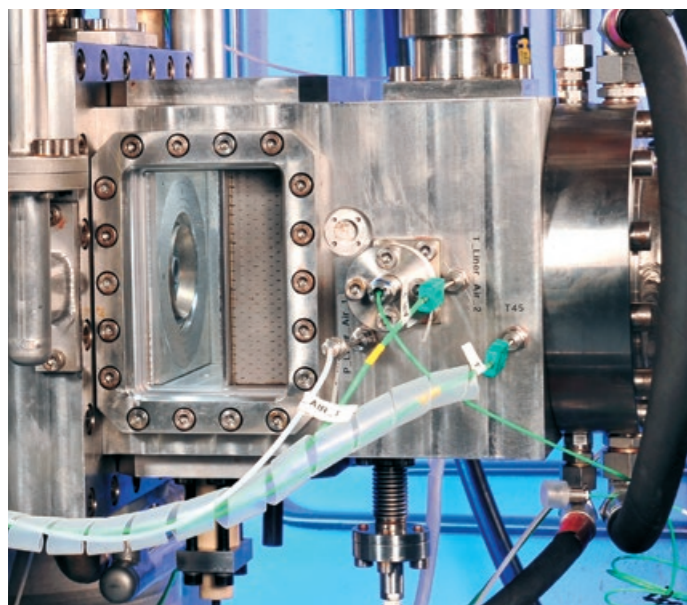


Bild: Rolls-Royce

Test eines Kerntriebwerks mit einer Mager-Brennkammer auf dem Höhenprüfstand der Universität Stuttgart



Auf modernen Prüfständen aller Größenordnungen können das DLR und seine Partner verschiedenste Verbrennungsversuche durchführen. Hier wird auf dem HBK1 in Köln ein optisch zugängliches Brennkomponente getestet.

Einsatz. „Hier erfolgt die Verbrennung mit einem Luftüberschuss, um die lokalen Verbrennungstemperaturen zu verringern und so die Neigung zur Stickoxidbildung zu unterdrücken.“

Rolls-Royce und das DLR arbeiten laut Christoph Hassa auf diesem Gebiet schon seit längerem zusammen. „Die Lösungswege bestehen, was unsere Beteiligung betrifft, in der Erfassung von Strömung und Reaktion in der Brennkammer. Mit dem so gewonnenen Verständnis der Vorgänge wollen wir die Basis für Verbesserungen schaffen.“ Dabei hat die Entwicklung der Verbrennungstechnologie und der entsprechenden Brennkammern mittlerweile deutliche Fortschritte gemacht. Eine große Herausforderung bleibt allerdings die Komplexität des Kraftstoffsystems. Außerdem müssen die Module, wie etwa die komplexen Einspritzdüsen, an die Verwendungen in kleineren Triebwerken angepasst werden.

Bei all diesen Neuerungen haben die Konstrukteure die im Lauf der Jahrzehnte erreichte Zuverlässigkeit der aktuellen Brennkammern auch weiterhin zu gewährleisten. So darf es beim Wiederanlassen in Höhen von bis zu neun Kilometern keine Probleme geben. Und auch die bereits in den Griff bekommenen Emissionen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen und von Kohlenmonoxid dürfen nicht außer Acht gelassen werden. Gleichzeitig rückt der Brennkammerlärm immer mehr in den Fokus der Entwickler. Die anderen Lärmquellen im Triebwerk werden inzwischen immer weiter reduziert, sodass die Ingenieure ihr Augenmerk nun auf die Verbrennung legen. Die Thermoakustik ist grundsätzlich ein wichtiges Thema der schadstoffarmen Verbrennung. Fortschritte hier gleichen einer Gratwanderung zwischen den verschiedenen Anforderungen, denn die Lärmreduzierung in Brennkammern ist schwierig; schließlich wirken sich etwaige Dämpfungsmaßnahmen negativ auf die Komplexität und das Gesamtgewicht aus.

Realitätsnahe Versuche in Brennkammerprüfständen

Bei ihren Vorhaben profitieren die Partner des DLR von den vorhandenen Prüfständen, allen voran dem 2015 eröffneten Hochdruckbrennkammerprüfstand HBK5 im DLR Köln. Hier lassen sich komplette Flugtriebwerk-brennkammern mit einem Durchmesser von bis zu einem Meter unter sehr realitätsnahen Bedingungen erproben. Die Versuchseinrichtung kann eine thermische Leistung von 125 Megawatt erzeugen, was der Leistung von rund 1.000 Mittelklasse-Pkw entspricht.



Bild: Rolls-Royce

Die Ergebnisse der Forschungen kommen den neuesten Triebwerkentwicklungen von Rolls-Royce zugute

Rolls-Royce hat sich die Nutzung des exklusiven Prüfstands für die nächsten 30 Jahre gesichert. „Die Möglichkeiten, die der HBK5 bietet, sind einzigartig. Für uns erfolgt der letzte Test im Vollring, also in einer kompletten Brennkammer, bevor wir eine neue Technologie in Entwicklungstriebwerken einsetzen“, erläutert Dr.-Ing. Thomas Dörr; Gruppenleiter Brennkammer bei Rolls-Royce Deutschland. Der neue Prüfstand ist seiner Aussage zufolge ein weiterer Meilenstein in der Kooperation der beiden Partner: „Wir arbeiten mit dem DLR seit dem ersten Luftfahrtforschungsprogramm der Bundesregierung 1995 zusammen und haben in diesem Rahmen eine spezielle schadstoffarme Brennkammer konzipiert und untersucht. Sie bildete die technische Grundlage für Folgeprogramme, mit denen wir bis heute die Technologie weiterentwickelt haben. So konnten wir unsere Fortschritte hinsichtlich der Mager-Verbrennungstechnologie erarbeiten.“ Ende dieses Jahres plant Rolls-Royce die Flugerprobung dieser Brennkammertechnologie in einem Demonstrator auf der Basis eines Trent 1000, dem Antrieb der Boeing 787 Dreamliner.

Auch das DLR profitiert von der Zusammenarbeit, wie Christoph Hassa ausführt. „Über die industrielle Kooperation erhalten wir aus erster Hand Erkenntnisse über aktuelle Problemstellungen, die uns helfen, unsere Forschung besser an relevanten Themen auszurichten.“ Professor Aigner ergänzt: „Wir bekommen zudem Einblick in die moderne Triebwerktechnik. Außerdem gibt es Fragestellungen, die wir nicht allein lösen können. Hier bringt jeder der Partner sein eigenes Wissen ein, und nur in dieser Kombination kommt man dann zu Lösungen.“ Die Partnerschaft hatte in den Neunzigerjahren mit der Entwicklung der BR700-Triebwerkfamilie in Dahlewitz, damals noch bei der Firma BMW Rolls-Royce, begonnen und dehnte sich im Verbrennungsbereich mittlerweile auf Brennkammern für Triebwerke von Langstreckenverkehrsflugzeugen aus. Zurzeit untersuchen die Spezialisten auch die genaue Verteilung von Austrittstemperatur und -geschwindigkeit am Brennkammeraustritt, weil sich beim Übergang von einer Fett-Mager- auf eine Mager-Brennkammer für die Turbinenentwicklung einige Faktoren ändern.

Interaktionen mit den Turbinen

Hier kommt noch eine Facette der Kooperation zwischen Rolls-Royce und dem DLR zum Tragen. Im Rahmen eines weiteren Luftfahrtforschungsprogramms erproben die Partner eine neue zweistufige Turbine.

„Hier beschäftigen wir uns sehr stark mit den Bereichen Kühlung und Strömung, um dementsprechend effiziente Turbinen hervorzubringen“, sagt Frank Kocian vom Institut für Antriebstechnik, Bereich Turbine, beim DLR in Göttingen. „Die Herausforderung liegt ganz klar in der Interaktion der Komponenten, einerseits von Brennkammer und Hochdruckturbinen, andererseits zwischen Hoch- und Niederdruckturbinen. Da spielen sich Phänomene ab, die bisher in der Form noch nicht im Fokus der Wissenschaftler standen. Nun versucht man, diese stärker zu beleuchten und noch vorhandenes Optimierungspotenzial zu nutzen.“ Im Mittelpunkt des Interesses stehen neue Technologien vor allem auf der Werkstoffseite und bei den Herstellungsmethoden. So dienen die additive Fertigungsverfahren zur Produktion von Komponenten mit komplexen Geometrien zur Innenkühlung. Hier schmilzt ein computergesteuerter Laser Metall in einem Pulverbett und baut so Schicht für Schicht Bauteile auf. Dabei stammt die Definition der Turbinenschaufeln von Rolls-Royce, während die Testturbinen vom DLR konstruiert und gefertigt wurden. Die Integration und Inbetriebnahme erfolgte in gemischten Teams. Die Versuche finden auf dem 2015 fertiggestellten, hochmodernen Turbinenprüfstand NG-Turb im DLR Göttingen statt, der den Ingenieuren die Möglichkeit gibt, äußerst realitätsnah zu prüfen.

Die Zusammenarbeit konzentriert sich aber nicht nur auf anwendungsorientierte Forschung, auch die Grundlagen werden intensiv betrachtet. Bei den Schadstoff-Emissionen ist besonders das Institut für Verbrennungstechnik des DLR gefragt. „Ein ganz großes Thema sind momentan die Rußpartikel und deren Einfluss auf die Atmosphäre“, führt Manfred Aigner aus. Bei der Entstehung der Rußpartikel handelt es sich gemäß den Worten des Institutsleiters „um einen sehr komplexen Vorgang, der sich dementsprechend schwer berechnen und verhindern lässt.“ Die Rußpartikel entstehen immer in einer brennstoffreichen Zone. Dieser Brennstoff liegt in gasförmigen Molekülen vor, die sich treffen, kombinieren und so letztendlich zu einem Feststoffpartikel werden. Dieser Wandel vollzieht sich extrem schnell, etwa in einer Millisekunde – und das bei einer Partikelgröße im Bereich von Nanometern und einer Umgebung, in der mindestens 2.000 Grad Celsius herrschen. „Daher waren die ersten Analysen sehr schwierig, weil wir zuerst eine Messtechnik entwickeln mussten, die lokal und zeitlich so fein auflöst, dass diese Vorgänge überhaupt erst einmal beobachtet werden können. Diese dann in einem Computermodell abzubilden, ist die zweite Herausforderung.“



Auf dem Hochdruckbrennkammerprüfstand HBK5 im DLR Köln können komplette Brennkammern unter realitätsnahen Bedingungen erprobt werden

Flammendiagnose für den Einsatz neuer Treibstoffe

Auch in diesem Bereich profitiert Rolls-Royce vom Know-how der DLR-Spezialisten, wie Dr. Dörr von dem Triebwerksbauer aus Dahlewitz klarstellt. „Das DLR verfügt über modernste, sehr hoch entwickelte Flammendiagnostik mit laserspektroskopischen Verfahren, sowohl was die Messtechnik als auch was die Analytik angeht.“ Die Methoden sind fast alle laserbasiert, weil die optischen Systeme auch bei extremen Temperaturen und Drücken berührungsfrei messen können – keine extra eingeführte Sonde stört dabei den Vorgang. Das LII genannte Verfahren (Laser-Induced Incandescence) beleuchtet beispielsweise die winzig kleinen Partikel an einer Stelle und heizt sie auf. Die Abstrahlung dieser Rußpartikel erlaubt dann Erkenntnisse über deren Anzahl und Größe. Weitere Messtechniken lassen Rückschlüsse auf die Brennstoffverteilung, die Strömungsgeschwindigkeit und die Temperaturen zu. „Die Kombination des ganzen Wissens, der Messverfahren und unserer Hochdruckprüfstände ist schon einmalig in Europa“, meint DLR-Institutsleiter Manfred Aigner. Dieses Know-how ist seiner Meinung nach auch unerlässlich, um ein weiteres wichtiges Thema zu behandeln: die Frage der Treibstoffe. „Die erdölbasierten Treibstoffe werden zumindest zum Teil ersetzt werden müssen, um die Kohlendioxid-Bilanzen zu verbessern und die Abhängigkeit vom Erdöl zu reduzieren.“

Auch die Reduzierung von Schadstoffen wäre hier etwa mit der Anwendung eines sogenannten „Designer Fuel“ möglich, beispielsweise eines alternativen Kraftstoffs, der gegenüber dem Kerosin einen geringeren oder sogar gar keinen Anteil von Aromaten aufweist. Diese chemischen Verbindungen sind wesentlich an der Rußproduktion beteiligt. Inwieweit sich der Einsatz insbesondere bei Fett-Mager-Brennkammern eignet, daran arbeiten die Wissenschaftler und Ingenieure des DLR bereits intensiv. „Das ist echte Grundlagenforschung. Nun zu entscheiden, welchen Treibstoff man wählt, wie man den Temperaturverlauf bei der Verbrennung entsprechend regelt oder die Zuleitung von Luft anpasst, das geht fließend über von der Grundlagenforschung in die Anwendung“, sagt Professor Aigner. „Das ist ein sehr spannendes Gebiet mit großen Auswirkungen auf unsere Umwelt und auch auf die Marktfähigkeit der Produkte.“

Patrick Hoeweler ist Fachjournalist im Bereich der Luftfahrt und arbeitete unter anderem viele Jahre bei der Flug-Revue.



Das DLR verfügt auf dem Gebiet der Verbrennungsforschung nicht nur bei der Messtechnik über umfangreiches Know-how

AUGEN IM ALL NEHMEN WAHR, WIE SICH DIE WELT VERÄNDERT

Zwischen Paris und Marrakesch: ein Beitrag zur Weltklimakonferenz

Von Martin Fleischmann

Malediven und Marshallinseln – eine Unterwasserlandschaft. 70 Prozent des Regenwaldes – verdorrt. 250 Millionen Menschen – auf der Flucht vor Hunger und Durst. So könnte unsere Zukunft im Jahr 2100 aussehen, denn der wachsende Ausstoß von Kohlendioxid verursacht einen weltweiten Temperaturanstieg um zwei bis sechs Grad bis zum Ende des Jahrhunderts. Mit jedem Grad Erwärmung nehmen die tropischen Wirbelstürme um 30 Prozent zu, während zugleich die durchschnittliche Dicke der Eisschicht in der Arktis zurückgeht und schon in 20 bis 30 Jahren im Sommer eisfrei sein soll. Je kleiner die Eisfläche, umso weniger werden Sonnenstrahlen reflektiert. Die Erde erwärmt sich. Dadurch steigt der Meeresspiegel um 3,42 Millimeter pro Jahr an und könnte somit zur nächsten Jahrhundertwende zwischen einem halben und zwei Metern höher liegen als heute. Ein Anstieg um nur einen halben Meter würde 136 Millionenstädte an den Küsten und Vermögenswerte von mehr als 18 Billionen Euro bedrohen.

Damit diese Szenarien nicht Realität werden, hatten sich 195 Staaten am 12. Dezember 2015 in Paris auf den Weltklimavertrag geeinigt. Er beschränkt die Erderwärmung auf deutlich unter zwei Grad – wenn möglich sogar auf 1,5 Grad. Hierfür sollen alle Staaten ihren Treibhausgasausstoß verringern. Wie dies im Einzelnen geschehen kann, auf welcher Wissensbasis man dabei vorgeht und wie sich Veränderungen belegen lassen, untersucht auch das DLR. Seine Forschung in Verkehr, Luftfahrt und Raumfahrt kann dazu wertvolle Beiträge leisten.

Globale Inventur aus der Satellitenperspektive

Ob die Klimaziele erreicht worden sind, darüber sollen nach „bester verfügbarer Wissenschaft“ die einzelnen Staaten ab 2023 alle fünf Jahre Rechenschaft ablegen – eine globale Inventur des Klimawandels. Bei dieser Überwachung kommt die Erdbeobachtung ins Spiel. Aus der Satellitenperspektive können Treibhausgase, Meeresströmungen sowie Rodungen beobachtet werden. Mit den „Wächter“-Satelliten Sentinel-1 und vor allem Sentinel-2 stehen im europäischen Copernicus-Programm dafür „Augen“ aus dem Weltraum zur Verfügung, die Informationen zur nötigen zeitlichen und räumlichen Abdeckung liefern. 3D-Aufnahmen einer künftigen Radarsatelliten-Mission Tandem-L könnten zur flächendeckenden Waldüberwachung eingesetzt werden. Aus der Änderung der Baumhöhen über die Zeit lassen sich Verluste oder Zugewinne an Biomasse und damit auch von gespeichertem Kohlendioxid sehr gut abschätzen.

Das Treibhausgas Methan wird ab dem Jahr 2020 mit einem Lidar-Instrument auf dem deutsch-französischen MERLIN-Satelliten überwacht. Kohlendioxiddaten werden bislang nur von einem amerikanischen und einem japanischen Satelliten aufgenommen. Sie haben allerdings nur Spektrometer an Bord – passive Instrumente mit geringer Auflösung, die die Konzentrationen nur durch Reflexion der Sonnenstrahlen von der Erdoberfläche messen. Wolken und Aerosole in der Atmosphäre stören und verfälschen ihre Messergebnisse. Lidar könnte in einer zukünftigen Satellitenmission auch Kohlendioxid messen.

KOMPETENZEN DER ERDBEOBACHTUNGSSATELLITEN

Der Vorreiter: Mit Daten des Instruments SCIAMACHY auf Envisat haben es Forscher 2008 erstmals geschafft, natürliche Kohlendioxidquellen von vom Menschen gemachten zu unterscheiden. SCIAMACHY ist Pionier für einen neuen europäischen CO₂-Satelliten.

Die Wächter: Sentinel-1 und -2 sowie Sentinel-5 und -5P werden Treibhausgase vom Weltraum aus messen und ab 2016 über einen Zeitraum von über 20 Jahren eine lange Zeitreihe liefern.

Die Radaraugen: Das Satellitenduo TerraSAR-X und TanDEM-X kann zur Überwachung großer Eisschilde und Gletscher eingesetzt werden und über die Zeit deren Abschmelzen dokumentieren.

Der Zauberer: MERLIN soll mit seinem Lidar-Instrument natürliche von vom Menschen gemachte Methanquellen aufspüren und unterscheiden.



Um jährlich 3,42 Millimeter steigt der Meeresspiegel laut einer aktuellen NASA-Studie. Zu 60 Prozent ist der Anstieg auf die Ausdehnung der wärmer werdenden Meere zurückzuführen, das Tauen von Inlandeis macht 40 Prozent aus. – Das TanDEM-X-Höhenmodell zeigt Gletscher auf Spitzbergen. Die Farben repräsentieren unterschiedliche Geländehöhen. Wiederholt man die Datenerfassung mit den DLR-Radarsatelliten in gewissen zeitlichen Abständen, so lassen sich Masseveränderungen deutlich zeigen.

Auch die Schäden durch den Klimawandel und mit ihm verbundene Naturkatastrophen lassen sich aus dem Weltraum beobachten. Im Katastrophenfall können Satelliten dabei helfen, einen schnellen Überblick über die Lage zu bekommen: Welche Orte sind überschwemmt? Welche Straßen sind noch befahrbar? Wo muss evakuiert werden? Welche Region kann nur noch aus der Luft versorgt werden? Die Europäische Weltraumorganisation ESA und das DLR beteiligen sich dafür an der International Charter Space and Major Disasters. Bei Bedarf werden weltweit, schnell und kostenlos Satellitendaten bereitgestellt. DLR-Wissenschaftler sind beispielsweise in der Lage, die Aufnahmeplanung der Satelliten TerraSAR-X und TanDEM-X im Bedarfsfall kurzfristig umzuprogrammieren, um Aufnahmen von einem Katastrophengebiet schnell zu liefern.

Sehen, wie die Welt sich ändert – und handeln

„Was einst undenkbar schien, ist jetzt nicht mehr aufzuhalten. Die Geschichte wird sich dieses Tages erinnern“, hatte UN-Generalsekretär Ban Ki Moon nach der Einigung auf der COP 21 in Paris gesagt und somit der Weltklimakonferenz Erfolg bescheinigt. Die Nachfolgekonferenz COP 22 wird vom 7. bis zum 18. November 2016 in Marrakesch (Marokko) stattfinden. Welche Themen dann im Fokus stehen werden, ist noch nicht sicher. Klar ist aber, dass die Wissenschaft Erkenntnisse über die Veränderungen auf der Erde bereitstellen kann. Und: Das DLR kann mit der Arbeit in seinen Forschungsbereichen wertvolle Beiträge dazu leisten, die in Paris beschlossenen Klimaziele zu erreichen.

www.marrakech-cop22.com/

BEISPIELE KLIMARELEVANTER DLR-FORSCHUNG

Erneuerbare Energie:

Wind- und Solarkraftwerke: Wo lohnt sich welche Anlage? – Das DLR bietet ein frei zugängliches Simulationsprogramm zur Einschätzung von Kraftwerksprojekten auf Basis erneuerbarer Energien.

s.DLR.de/mc81

Ökoeffizientes Fliegen:

Wie kann klimaschonend geflogen werden? – Das DLR untersucht die Klimawirkungen des Luftverkehrs und erarbeitet Strategien für neue Flugzeugkonfigurationen und Betriebsweisen.

s.DLR.de/e745

Elektromobilität:

Elektrische Fahrzeugantriebe verringern die Umweltbelastung durch Autoabgase. DLR-Forscher befassen sich mit Fahrzeugen und Komponenten und analysieren das Verkehrssystem, um zukünftig verstärkt diesen Weg zu gehen.

s.DLR.de/bn06



Bel-Tempel von Palmyra vor seiner Zerstörung. Er gilt als eines der wichtigsten religiösen Bauwerke des ersten Jahrhunderts im Nahen Osten. Die besondere Bauweise und Gestaltung machten den Tempel einzigartig.

Bild: Schmidt-Colinet

SEHEN, WAS NICHT VERBORGEN BLEIBEN DARF

Der Welt Erbe im Blick von Satelliten

Von Bernadette Jung, Gunter Schreier und Prof. Dr. Günter Strunz

Im September 2015 dokumentierten Satellitenbilder, was Beobachter vor Ort in Syrien nach ersten Vermutungen inzwischen auch bestätigten: Der Bel-Tempel, Kernstück der zweitausend Jahre alten syrischen UNESCO-Weltkulturerbestätte Palmyra, die nahegelegene Säulenreihe sowie der Baalshamin-Tempel sind zerstört. Sie wurden von der Terrormiliz „Islamischer Staat“ gesprengt. Die Veränderungen konnten im Vergleich mit älteren Satellitenbildern belegt werden. Erst einige Jahre zuvor hatten Archäologen in Palmyra mit Hilfe der satellitengestützten Fernerkundung spektakuläre Entdeckungen gemacht.

Dank seiner Wasserquelle inmitten der syrischen Wüste und seiner zentralen Lage entlang der Karawanenstraße zwischen Asien und Europa hatte sich Palmyra während der Zeit des Römischen Reichs von einer kleinen Oase zu einem globalen Handelszentrum entwickelt. Dass die Stadt bereits im 3. Jahrhundert vor Christus besiedelt war und weltweite Handelsbeziehungen pflegte, wurde lange vermutet. Prof. Dr. Andreas Schmidt-Colinet vom Institut für Klassische Archäologie der Universität Wien konnte 2008 den Beweis dafür erbringen: Bodenuntersuchungen mit dem Magnetometer und gezielte Grabungen führten sein Team zu einer unter dem Sand verborgenen Siedlung, außerhalb der bekannten Stadt. Daten des deutschen Radarsatelliten TerraSAR-X ergänzten die Auswertung. Dazu erstellten das DLR-Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme und das Earth Observation Center des DLR spezielle hochaufgelöste Radarbilder. So konnten die Archäologen im Wüstensand Bodenstrukturen erkennen, die mit bloßem Auge oder terrestrischer Vermessung nicht sichtbar sind.

Derzeit bereitet Schmidt-Colinet eine Publikation über die antiken Steinbrüche von Palmyra vor. Wieder sollen neueste Satellitenbilder zur Auswertung der Forschungsergebnisse herangezogen werden: „Dies wird umso wichtiger sein, da auch diese Steinbrüche unmittelbar von der Zerstörung durch die kriegerischen Ereignisse in Syrien bedroht sind“, so Schmidt-Colinet.

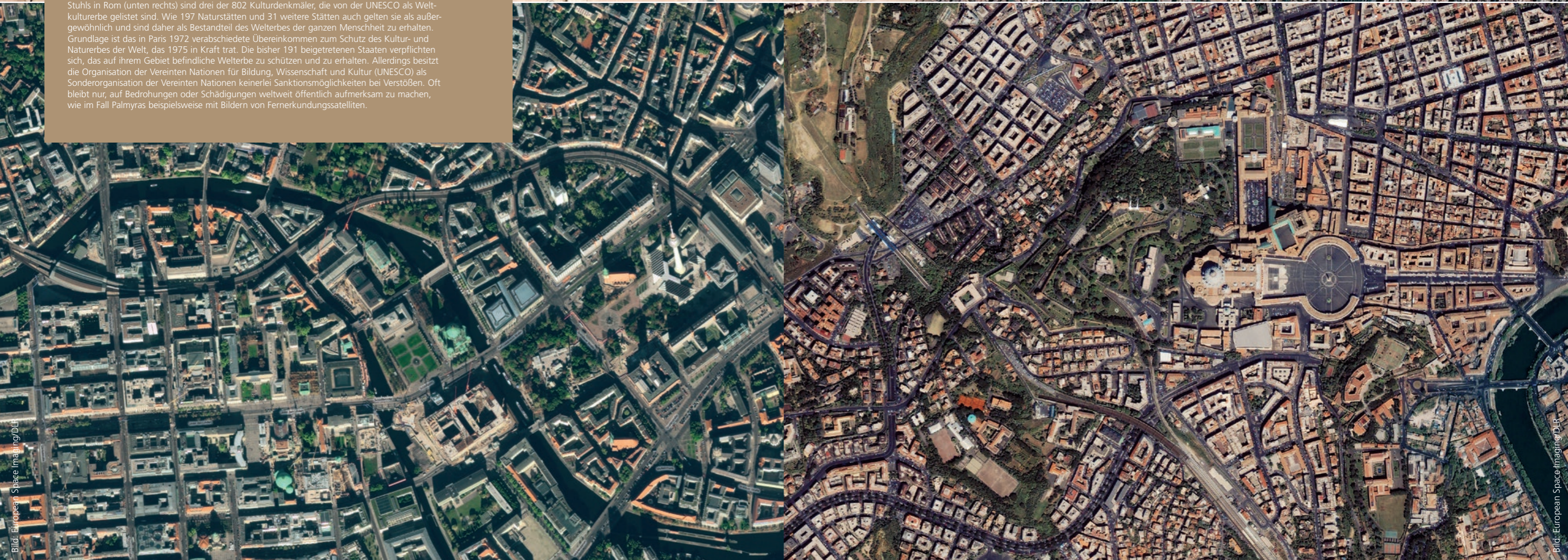
Kulturelles Mandat

Die kulturelle Identität einer Gemeinschaft – ob regional, national oder international – ist mit ihrem kulturellen Erbe verknüpft. Monumente aus längst vergangenen Zeiten liefern der Gesellschaft den historischen Kontext und damit auch Bezugspunkte für aktuelle Herausforderungen. Die Zeugnisse alter Zivilisationen gilt es daher nachhaltig zu sichern: durch Monitoring, Dokumentation, Auswertung und Interpretation archäologischer Stätten. Entsprechende Technologien treibt das DLR in Oberpfaffenhofen voran: Das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum und das Institut für Methodik der Fernerkundung bilden zusammen das Earth Observation Center (EOC) des DLR – und bündeln ihre Kompetenzen im Gewinnen, Auswerten, Verarbeiten und beim Management von Erdbeobachtungsdaten.

Die Unterstützung archäologischer Forschungsarbeiten begann dort vor 13 Jahren – mit der Kartierung der antiken irakischen Stadt Uruk. Allein das DLR war in der Lage, dem Deutschen Archäologischen Institut (DAI) Satellitendaten zu liefern, um die Gefährdung der ältesten Siedlung der Welt durch den damaligen Irak-Konflikt abzuschätzen. Seit 2004 leistet das EOC einen besonderen kulturellen Beitrag: Es liefert Fernerkundungsdaten von DLR-Missionen für wissenschaftliche Arbeiten zur Bewahrung von Welterbestätten der UNESCO, der Organisation der Vereinten Nationen mit einem Mandat im Kulturbereich. Eine Aufgabe mit gewaltigen Dimensionen – mehr als eintausend Natur- und Kulturstätten in 163 Ländern sind derzeit als UNESCO-Welterbe gelistet. Allein in Deutschland sind 40 Stätten von „außergewöhnlichem universellen Wert“ zu schützen – darunter der Kölner Dom, die Museumsinsel in Berlin, die Grenzanlagen des Römischen Reichs (Limes), das Wattenmeer und das Opernhaus in Bayreuth.



Die Pyramiden in Ägypten, die Museumsinsel in Berlin (unten links) und die Stätten des Heiligen Stuhls in Rom (unten rechts) sind drei der 802 Kulturdenkmäler, die von der UNESCO als Weltkulturerbe gelistet sind. Wie 197 Naturstätten und 31 weitere Stätten auch gelten sie als außergewöhnlich und sind daher als Bestandteil des Welterbes der ganzen Menschheit zu erhalten. Grundlage ist das in Paris 1972 verabschiedete Übereinkommen zum Schutz des Kultur- und Naturerbes der Welt, das 1975 in Kraft trat. Die bisher 191 beigetretenen Staaten verpflichten sich, das auf ihrem Gebiet befindliche Welterbe zu schützen und zu erhalten. Allerdings besitzt die Organisation der Vereinten Nationen für Bildung, Wissenschaft und Kultur (UNESCO) als Sonderorganisation der Vereinten Nationen keinerlei Sanktionsmöglichkeiten bei Verstößen. Oft bleibt nur, auf Bedrohungen oder Schädigungen weltweit öffentlich aufmerksam zu machen, wie im Fall Palmyras beispielsweise mit Bildern von Fernerkundungssatelliten.





Maßgeschneiderte Satellitendaten

In der Archäologie und in der Fernerkundung gilt gleichermaßen: Sorgfalt im Detail und Blick auf das Ganze. Welche Erfolge und neuen Möglichkeiten sich dabei eröffnen, wenn die beiden Forschungsbereiche ihre Kompetenzen zusammenführen, zeigt sich bei Großprojekten wie Palmyra besonders deutlich. Die Dokumentation einer historischen Stätte, etwa in Form von Grabungsarbeiten, ist mit hohem personellem, zeitlichem und finanziellem Aufwand verbunden. Solche Orte werden daher üblicherweise auch anhand von Luftbildern und Fotos analysiert. Von Satellitenbildern können die Denkmalschützer und Archäologen dabei besonders profitieren. Aus über 500 Kilometer Höhe gewähren Erdbeobachtungssatelliten freien Blick auf Gebiete, die schwer zugänglich sind oder zu gefährlich für Erkundungsflüge und Arbeiten vor Ort. Nach Bedarf liefern sie aktuelle und hochaufgelöste Aufnahmen von mehreren Quadratkilometer großen Gebieten. Weitflächige Überblicksaufnahmen helfen den Archäologen auch im Feld, schneller zu einem „Befund“ zu gelangen, also den Zusammenhang einzelner Funde zu erschließen und das historische Gesamtbild zu rekonstruieren.

Aufnahmen unabhängig von Bewölkung oder Tages- und Nachtzeiten sind mit Radarsatelliten möglich. Die vom DLR-Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme entwickelte Mission Tandem-L kann mit Hilfe von Radartomografie zukünftig sogar den

Blick durch Baumkronen und Vegetation hindurch – auf und unter die Oberfläche des Erdbodens – ermöglichen. Satelliten können archäologische Stätten auch regelmäßig, mit den exakt gleichen Einstellungen, aufnehmen – perfekt für ein Monitoring. Im Deutschen Satellitendatenarchiv des DLR sind Daten aus rund 30 Jahren griffbereit und täglich kommen neue Aufnahmen hinzu. Vergleichs- und Verlaufsaufnahmen zeigen jede Veränderung auf, seien es die plötzliche Zerstörung oder der langsame Verfall eines antiken Bauwerks oder die Bedrohung eines Naturreservats. Mit dem Betrieb des Datenarchivs stellt das EOC die Verfügbarkeit der Fernerkundungsschätze auch für zukünftige Generationen sicher.

Fernerkundung im Detail

Wenn die UNESCO oder eine archäologische Forschungseinrichtung anfragen, kann das Earth Observation Center umgehend reagieren. Zuerst werden die passenden Satellitendaten eingeholt: Neue Daten können in Nahe-Echtzeit erstellt werden. Empfangsanlagen auf dem EOC-Gebäude sichern den direkten Zugriff auf die hochaufgelösten Daten der optischen Satelliten WorldView-2 und WorldView-3. Radardaten werden im Rahmen der DLR-Mission TerraSAR-X und TanDEM-X bereitgestellt, die von Oberpfaffenhofen aus betrieben werden. Zusätzlich kann das EOC sein Kooperationsnetzwerk aktivieren und Satellitendaten, unter anderem bei der Partnerfirma European Space Imaging, abrufen. Das gilt auch für Archivdaten, um Vergleichsbilder zu haben.

Im nächsten Schritt werten die DLR-Wissenschaftler die Rohdaten aus und bereiten sie auf. Bei besonderem Bedarf werden auch nicht-wissenschaftliche Daten aus sämtlichen Quellen herangezogen, etwa Videos und Fotos aus dem Internet. Damit aus dem Datenfundus ein verständliches Bild wird, bedarf es spezieller Tricks und Kniffe: Winkerverzerrungen werden entfernt, die Geländeinformationen lagegenau angepasst oder es wird die räumliche Auflösung geschärft. Gefragt sind auch Veränderungsanalysen. Hochgenaue Vorher-nachher-Bilder können den Denkmalpflegern und der UNESCO auf einfache Weise helfen, Maßnahmen zum Schutz einer Welterbestätte zu entwickeln oder auf ihre Wirksamkeit hin zu überprüfen.

Bei der Datenauswertung profitiert das EOC insbesondere von seiner Arbeit und Erfahrung aus dem Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation (ZKI). Im Fall von Naturkatastrophen oder Krisenfällen werden am ZKI auf Abruf Satellitenbildkarten und Situationsanalysen erstellt – für nationale, europäische und internationale Behörden und Einrichtungen zum Bevölkerungsschutz. So wurden auch die Palmyra-Satellitendaten durch das ZKI ausgewertet. Die Einrichtung ist rund um

die Uhr einsatzbereit und ergänzt die einzigartige Infrastruktur des EOC in Oberpfaffenhofen. Die Fernerkundungsspezialisten sind so in der Lage, alle Anfragen zuverlässig und routiniert umzusetzen.

Globale Perspektive

Rund 60 Jahre ist es her, dass der Mensch seine Welt zum ersten Mal aus der Distanz des Alls sehen konnte. Diese Bilder veränderten die Perspektive der Menschen für immer. Die satellitengestützte Fernerkundung erweitert diese Perspektive – und das Welterbe-Programm der UNESCO nutzt diese neue Sicht. Dabei haben die Kultur- und Naturstätten nicht nur einen kulturellen Wert. Viele Regionen und Länder leben vom Tourismus rund um die einzelnen Sehenswürdigkeiten. Erdbeobachtungsdaten verschaffen den notwendigen Überblick, um hier planerisch einzugreifen – wie es etwa bei den Pyramiden von Gizeh der Fall ist. Veränderungsanalysen zeigen sehr deutlich, wie die Siedlungen immer dichter an die 4.500 Jahre alten Bauwerke herangerückt sind. Die erhöhte Beanspruchung und veränderte Umwelteinflüsse setzen den Kolossen vor den Toren Kairos zu. Andersorts, in Peru, gefährden Hangrutschungen die Welterbestätte Machu Picchu. Ob Bodenerosionen durch häufiger werdende Überflutungen oder durch Dürre, der Rückzug von Gletschern oder der Anstieg des Meeresspiegels – die Auswirkungen des globalen Klimawandels stellen Archäologen und Denkmalschützer weltweit vor immer größere Herausforderungen.

All diese Stätten zu beobachten und zu schützen gleicht einer Herkules-Aufgabe. Nur die Perspektive aus dem All gewährt den nötigen Überblick und lässt die globalen Zusammenhänge erkennen. Erdbeobachtungssatelliten können Informationen schnell, umfassend und weltweit liefern. Die Fernerkundung schafft dadurch völlig neue Datengrundlagen für Forscher und Entscheidungsträger. Das europäische Erdbeobachtungsprogramm Copernicus treibt bereits den Aufbau grundlegender Geoinformationsdienste voran, insbesondere zur Umweltüberwachung und für die zivile Sicherheit. Die Radarsatellitenmission Tandem-L könnte die Erdoberfläche künftig im Wochenrhythmus kartieren und einzigartige Informationsprodukte bereitstellen. Durch die Vielzahl der Missionen, zielgerichtete Forschung und durch neue Auswertetechnologien ist die Fernerkundung daher prädestiniert, diese globale Herausforderung anzunehmen – dazu gehört auch, wichtige Informationen über das Weltkulturerbe bereitzustellen und so zu helfen, es zu bewahren.

Prof. Dr.-Ing. Günter Strunz leitet am Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum des DLR die Abteilung Georisiken und zivile Sicherheit. **Gunter Schreier** ist am Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum des DLR für die Geschäftsentwicklung und die Koordination von Copernicus verantwortlich. **Bernadette Jung** ist Redakteurin in der DLR-Kommunikation.

WERTVOLLER SATELLITENBLICK AUF DIE KULTURGÜTER DER WELT

Drei Fragen an Dr. Dr. h.c. Margarete van Ess, wissenschaftliche Direktorin des Deutschen Archäologischen Instituts (DAI)



Frau Dr. van Ess, wie verbreitet ist eigentlich die Nutzung von Fernerkundungsmethoden in der Archäologie?

• In der Archäologie sind Fernerkundungsmethoden schon seit vielen Jahren ein wichtiges Thema. Sie werden jedoch noch immer nur zögerlich eingesetzt, hauptsächlich weil der Erwerb von hochauflösenden Bildern teuer ist und Spezialkenntnisse in der Auswertung voraussetzt. Die Bilder werden genutzt, um noch nicht ausgegrabene antike Siedlungsstrukturen zu erkennen, um auf großer Fläche längst verschüttete Überlandstraßen und Kanäle zu verfolgen, aber auch um Zerstörungen durch Raubgrabungen oder durch Infrastrukturmaßnahmen zu erkennen. Gleichzeitig werden die Analyseverfahren verfeinert und damit zu Routineverfahren in der Archäologie weiterentwickelt. Die Fernerkundung ist für uns also von immer größer werdender Bedeutung.

Was ist das Besondere an der Zusammenarbeit des Deutschen Archäologischen Instituts mit dem DLR?

• Die Wissenschaftler im DLR können aus ihrer Alltagsarbeit mit großer Routine und Kenntnis Bewertungen zu Fernerkundungsdaten liefern, die Archäologen ohne dieses Spezialwissen nicht sofort geben können. Archäologen erkennen umgekehrt Details, die anders ausgebildeten Personen nicht auffallen. Die ständige Verfügbarkeit von Experten und die große Erfahrung beider Institutionen erlaubt es, in kürzester Zeit Daten zu evaluieren und Informationen an zuständige Institutionen weiterzugeben. Nur so haben wir eine Chance, gefährdete Stätten zu schützen.

Was wünschen Sie sich von der Fernerkundung für Ihre weitere Forschung?

• Wir wünschen uns, dass die Methoden der Fernerkundung zur Routine in der Archäologie werden – sowohl in den wissenschaftlichen Aspekten als auch im Bereich des Kulturerhalts. Hierzu sind regelmäßige Analysen von Satellitenbildern sehr sinnvoll, die es bisher noch nicht in ausreichendem Maße gibt. Die regelmäßige Analyse wäre eine wichtige Präventionsmaßnahme zum Schutz von Kulturgut, jedoch auch in der Bewertung, beispielsweise von archäologischem Potenzial einer Landschaft oder eines Ortes.



Bild: European Space Imaging

Die Aufnahme des Satelliten WorldView-2 vom 27. August 2015 zeigt den Bel-Tempel von Palmyra, ein einzigartiges Weltkulturerbe



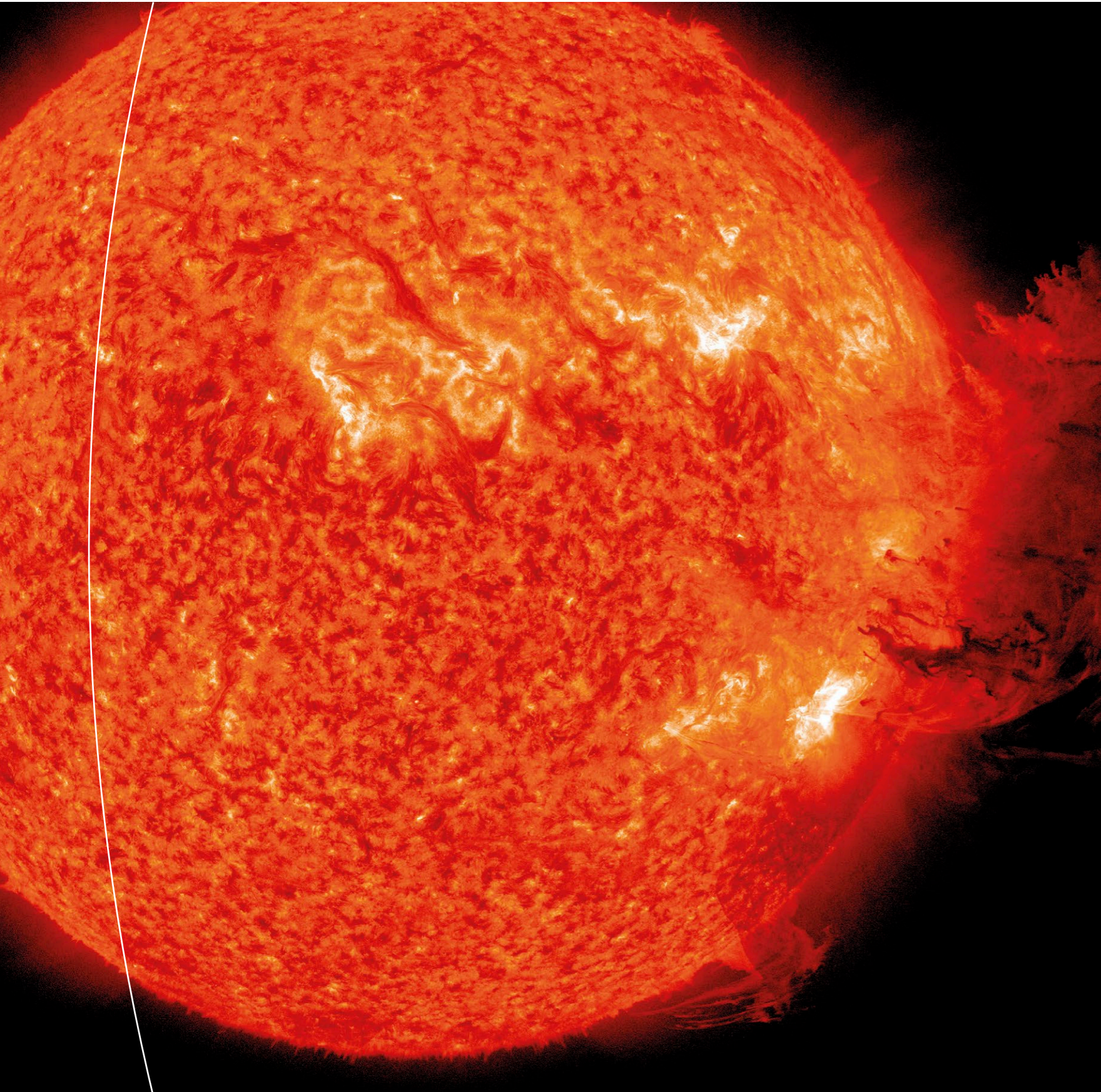
Bild: European Space Imaging

Nur wenige Tage später, am 2. September 2015, belegt das Satellitenbild schlimmste Befürchtungen: Der zweitausend Jahre alte Tempel wurde zerstört.



Bild: European Space Imaging

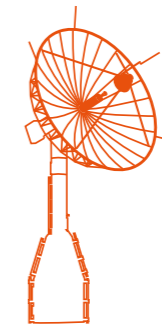
Das antike Palmyra liegt in einer von Palmen umgebenen Oase auf dem Gebiet der modernen syrischen Stadt Tadmur im Zentrum des Hochlands von Aleppo



Ein mittelgroßer sogenannter Flare der Sonne, ein helles Bild des Fixsterns, das durch Reflexionen an einer oder mehreren Linsen im Objektiv entsteht. Es zeigt im extremen Ultraviolett einen spektakulären koronalen Massenauswurf am 7. Juni 2011.

Bild: NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams

WENN DIE SONNE PLASMA SPUCKT



Forscher in Neustrelitz arbeiten an der Vorhersage des Weltraumwetters

Von Fabian Locher

Der Blick ins All: endlose Weite, Stille, Frieden ... Doch halt: Auf der Sonne verursachen gigantische Eruptionen extreme Winde. Energetische Teilchen werden aus der Sonnenkorona ins Weltall geschleudert. Sonnenstürme können ionosphärische Störungen in der Atmosphäre verursachen und so die sensible Infrastruktur unserer Hightech-Gesellschaft gefährden. Denn unsere alltägliche Kommunikation und Navigation ist satellitengestützt. DLR-Wissenschaftler forschen an den Ursachen und Auswirkungen des sogenannten Weltraumwetters. Am Standort Neustrelitz bauen Wissenschaftler des Instituts für Kommunikation und Navigation und des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums zusammen ein „Ionosphere Monitoring and Prediction Center (IMPC)“ auf. Das IMPC wird ein Weltraumwetter-Beobachtungs-, Vorhersage- und Warndienstzentrum für Industrie, Regierung, Wissenschaft und für interessierte Laien.

Eruptionen auf unserem Fixstern

Vor 4,5 Milliarden Jahren entstand unser Sonnensystem aus einer Wolke aus Gas und Staub. Auch heute noch ist die Sonne ein sehr aktiver Stern. Sie sendet nicht nur wärmendes Licht, sondern auch einen ständigen Strom elektrisch geladener Teilchen aus – den Sonnenwind. Auf ihrer 5.500 Grad Celsius heißen Oberfläche können ohne jede Vorwarnung explosionsartige Eruptionen auftreten. Der Teilchenstrom, der ins Weltall geschleudert wird, ist dann in einem begrenzten Gebiet kurzzeitig deutlich stärker als sonst – ein Prozess, den die Forscher als „Sonnensturm“ bezeichnen. Treffen die energiegeladenen Teilchen auf die Erde, können sie technische Systeme in unserem Orbit beschädigen. Eine exakte Vorhersage solcher Eruptionen ist derzeit noch nicht möglich, da die physikalischen Zusammenhänge, die zu ihrem Auftreten führen, teilweise noch unverstanden sind.

Um festzustellen, ob ein Sonnensturm die Erde trifft, wie stark dieser werden wird, und was dagegen getan werden kann, nutzen DLR-Wissenschaftler Daten von Sonnenbeobachtungssatelliten. In 1,5 Millionen Kilometer Entfernung von der Erde funktionieren diese Satelliten wie Warnbojen. Drei Satelliten kreisen in dieser lebensfeindlichen Umgebung: SOHO, ACE und DSCOVR (siehe Glossar, Seite 33). Dabei dient der „Lagrange-Punkt“ L1 als Basis. L1 ist ein stabiler Punkt im System Sonne-Erde, an dem die Satelliten mit geringem Energieaufwand verharren können. Dabei tun ihre „Augen“ genau das, was wir Menschen auf der Erde dringend vermeiden sollten: Sie schauen direkt in die Sonne.

Die Satelliten erfüllen dabei spezielle Beobachtungsaufgaben: SOHO fotografiert die Sonne unter anderem im UV-Bereich. ACE ist seit 1997 aktiv und wurde 2015 durch DSCOVR ergänzt. Beide

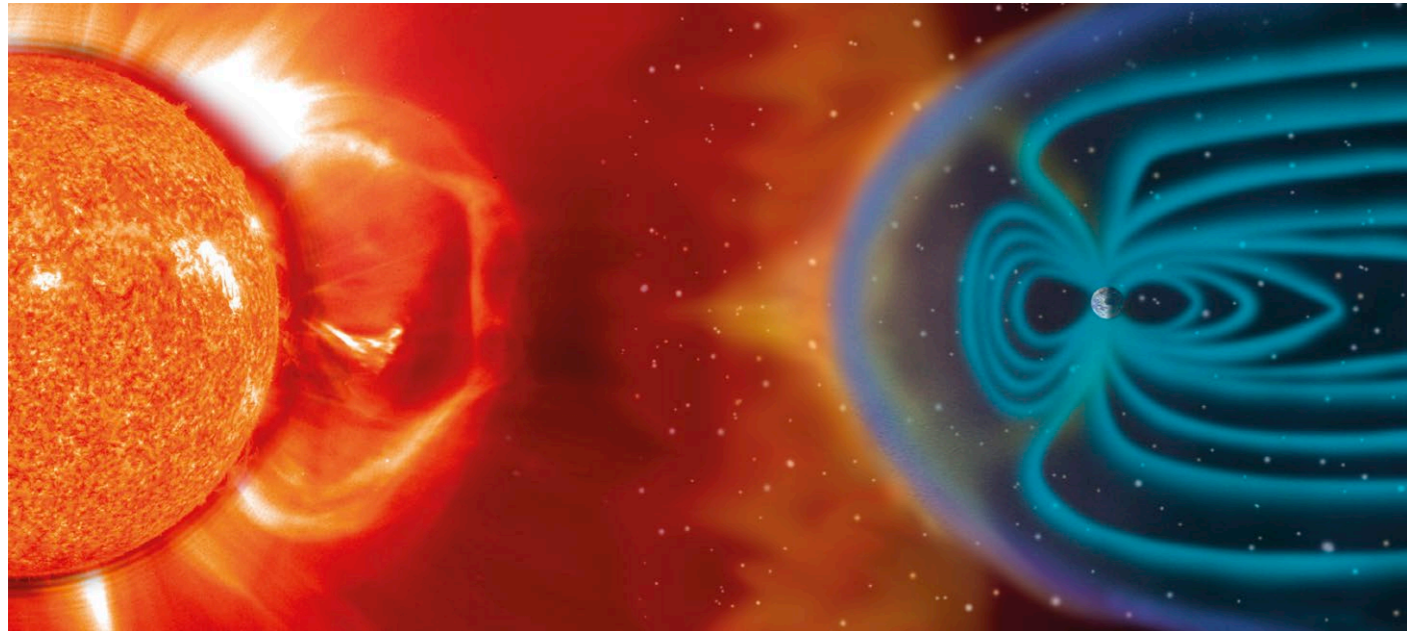


Bild: NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams

Illustration eines koronalen Massenauswurfs der Sonne und dessen Folgen für die Erde

Satelliten messen neben der Temperatur und der Protonendichte auch das interplanetarische Magnetfeld sowie die Geschwindigkeit des Sonnenwindes.

Wolke von Hochenergie-Teilchen

Wenn sich ein Teilchensturm zusammenbraut, werden geladene Teilchen als Plasmawolke in die Weiten des Alls geschleudert. Sobald der extreme Sonnenwind den Lagrange-Punkt L1 passiert, messen die Satelliten ACE und DSCOVR die veränderten Parameter. Mit Lichtgeschwindigkeit wird das Signal zur Empfangsstation gesendet. Der Sturm bewegt sich allerdings deutlich langsamer. Als gigantische Plasmawolke bahnt er sich mit 800 bis 2.000 Kilometern pro Sekunde seinen Weg durch die Heliosphäre, jenen weitreichenden interplanetaren Bereich um die Sonne. Die gewaltigen Antennen in Neustrelitz empfangen das Signal der Satelliten. An diesem Standort des DLR in Mecklenburg-Vorpommern steht die einzige europäische Empfangsstation des Echtzeit-Sonnenwindbeobachtungsnetzwerks – weitere Stationen befinden sich in den USA, in Südkorea und in Japan. DLR-Wissenschaftler werten die Daten aus und können schnell auf erhöhte Sonnenwindparameter reagieren. Die Forscher analysieren das interplanetare Magnetfeld und berechnen den dynamischen Druck des Sonnenwindes am Lagrange-Punkt L1. Dann herrscht Gewissheit: Ja, es ist ein Sonnensturm, ja, er bewegt sich in Richtung Erde, und ja, er wird unsere Erde erreichen. Weltraumwetter-Experten sprechen dann davon, dass sich energetische Plasmateilchen effektiv in die Erdatmosphäre „einkoppeln“.

Von diesem Zeitpunkt an haben die Forscher eine Vorlaufzeit von 30 bis 60 Minuten – je nachdem, wie schnell der Sonnenwind unterwegs ist. Jetzt beginnen die Berechnungen: Wie stark werden die Auswirkungen des Sonnensturms sein? Wie effizient wird er sich in die Erdatmosphäre einkoppeln? Mit diesen Informationen können die Wissenschaftler Vorhersagen machen und eventuelle Störungen von technischen Systemen im Bereich der Kommunikation und Navigation prognostizieren.

Polarlichter und Funkstörungen

Unsere Erde ist vor schwachen Sonnenstürmen durch die Atmosphäre und ihr Magnetfeld weitestgehend geschützt. Letzteres führt die ankommenden geladenen Teilchen in einem Abstand von etwa zehn Erdradien (rund 70.000 Kilometer) entlang der Magnetfeldlinien um die Erde herum. In großen Höhen und in den Polargebieten ist dieser Schutz allerdings schwächer. Denn dort sind die Feldlinien des Magnetfelds stärker gegen die Erdoberfläche geneigt. Das macht diese Regionen anfälliger für die Auswirkungen von Sonnenstürmen.

Die Reflexion von Kurzwellen an der Ionosphäre ermöglicht weltweiten Funkverkehr. Die Ionosphäre besteht aus freien Elektronen und Ionen. Das macht sie zu einer geladenen Schicht und damit anfällig für Ströme geladener Sonnenwindteilchen oder Magnetfeldänderungen. Kurze, aber intensive Störungen werden von sogenannten Flares ausgelöst, intensiven Strahlungsausbrüchen, die in der Gasschicht entstehen, von der die Sonne umgeben ist. Häufig werden bei einem solchen Flare auch geladene Teilchen ausgeworfen, dann spricht man von einem koronalen Massenauswurf. Als riesige Plasmawolke reisen diese Teilchen von der 150 Millionen Kilometer entfernten Sonne zur Erde. In der Folge entstehen nicht nur schöne Polarlichter, sondern die energetischen Teilchen können sich auch auf Raumsonden, technische Systeme im Weltraum und auf der Erde sowie auf das Leben und die Gesundheit der Menschen auswirken. Sie verändern die Anzahl der freien Elektronen und damit die Schichtdicke der Ionosphäre. Das ionosphärische Plasma verursacht Brechung, Beugung, Streuung und Absorption von Radiosignalen und ist die größte Fehlerquelle in den Ein-Frequenz-Positionierungssystemen, die in Navigationsgeräten und Smartphones integriert sind.

Damit die genaue Positionsangabe auch bei extremen Sonnenstürmen möglich wird, ist eine Korrektur des ionosphärischen Ausbreitungsfehlers sehr wichtig. Dieser Fehler (englisch „Range Error“) entsteht bei der Signalausbreitung vom Satelliten zur Bodenstation und hat seine Ursache in den Verzögerungen der Signallaufzeit in der Ionosphäre. Bei starken geomagnetischen Stürmen ist aber nicht nur die Navigation, sondern auch der Hochfrequenz-Funkverkehr gestört. Zu spüren bekommt das unter anderem die zivile Luftfahrt. Beim modernen, schnell getakteten Aufeinanderfolgen von Starts und Landeanflügen spielen satellitenbasierte Ergänzungssysteme („SBAS“, Space Based Augmentation System) eine entscheidende Rolle. Diese unterstützen bereits vorhandene Satellitennavigationssysteme und erhöhen deren Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. Sobald die für die Sicherheit nötige Genauigkeit nicht mehr gewährleistet werden kann, dürfen die Unterstützungssysteme nicht mehr verwendet werden. Verzögerungen im Flugverkehr sind die Folge.

Folgen auch für Ackerbau und Stromversorgung

Aber nicht nur die Luftfahrt ist von Störungen durch das Weltraumwetter betroffen. Schneeräumfahrzeuge in Norwegen beispielsweise benötigen hochgenaue Positionsdaten, um sich durchs blickdichte Schneegestöber zu manövrieren. Landwirte, die sich dem „Präzisionsackerbau“ verschrieben haben, benutzen automatisierte Düngefahrzeuge, die dank GPS-Daten den Einsatz von Düngemitteln deutlich reduzieren

können. Auch im Schiffsverkehr werden präzise Navigationsdaten verwendet, um eine genaue Positionierung im Hafengebiet zu ermöglichen oder um den optimalen Seeweg zu berechnen. Bei sehr starken geomagnetischen Stürmen müssen auch Stromnetzbetreiber mit induzierten Strömen rechnen, die zu technischen Problemen und damit zu Stromausfällen führen können. Die Elektronik von TV- oder Mobilfunk-Satelliten könnte durch energiereiche Partikelstrahlung in einem extremen Sonnensturm zerstört werden. Für Astronauten stellen die erhöhten Strahlendosen sogar eine lebensbedrohliche Gefahr dar. Außerhalb der schützenden Atmosphäre sind sie bei Weltraumspaziergängen der gefährlichen hochenergetischen Teilchenstrahlung direkt ausgesetzt.

„Normale“ Flugreisende hingegen sind in der typischen Reiseflughöhe von elf Kilometern durch die Atmosphäre weitestgehend vor einer deutlich erhöhten Strahlendosis geschützt. Da dieser natürliche Schutz in den Polarregionen schwächer wird, werden bei starken Sonnenstürmen die Polarregionen vermieden beziehungsweise es wird etwas tiefer geflogen, um die Schutzzone der Atmosphäre größer zu halten.

Beobachten, warnen, schützen

Auch wenn Stärke und Verlauf eines Sonnensturms nicht exakt vorhersehbar sind, so kann man sich dennoch (ganz ähnlich wie bei einem Hurrikan) auf das Ereignis einstellen. Weltraumwetter-Experten sind in der Lage, anhand veränderter Elektronenzahlen in der Ionosphäre zu berechnen, welche Störungen im Informationsaustausch des Systems Bodenstation-Satellit zu erwarten sind. „Eine zuverlässige und exakte Vorhersage des Weltraumwetters ist von entscheidender Bedeutung, um geeignete Schutzmaßnahmen ergreifen zu können“, sagt Dr. Jens Berdermann vom DLR-Institut für Kommunikation und Navigation. Die aus Ionosphärenmodellen errechneten Korrekturen können dann an die Nutzer eines Frühwarnservices weitergegeben werden. Die Informationen der ACE/DSCOVR-Satelliten ermöglichen es beispielsweise Betreibern von Satelliten, bei sehr starken Ereignissen die empfindlichen Mess- und Kommunikationsbereiche der Satelliten rechtzeitig aus dem Sonnenwind zu drehen oder Satelliten komplett abzuschalten. So kann ein elektrisches Aufladen der sensiblen elektronischen Systeme in Folge von Sonnenwinden vermieden werden.

Damit durch eine bessere Vorhersage von Weltraumwetter-Effekten unsere hoch technisierte Gesellschaft vor den vielfältigen Gefahren bis hin zu einem Blackout bewahrt wird, arbeiten die Wissenschaftler am Aufbau eines erweiterten Beobachtungs- und Vorhersagezentrums: dem „Ionosphere Monitoring and Prediction Center (IMPC)“. Bereits mit dem „Space Weather Application Center (SWACI)“ haben die DLR-Forscher bewiesen, dass sie eine Vielzahl erd- und weltraumbasierender Ionosphären-Daten in Echtzeit analysieren und auswerten können. Der nächste Schritt ist der Aufbau des IMPC: „Wir wollen im IMPC das bereits aufgestellte automatische Warnsystem noch besser an die Bedürfnisse der diversen Nutzer anpassen“, erklärt Dr. Jens Berdermann, Gruppenleiter im DLR Neustrelitz. Das Warnsystem ist sowohl für Wissenschaftler interessant als auch für die Betreiber von Systemen im Bereich satelliten-gestützter Kommunikation und Navigation.

Service für unterschiedliche Nutzergruppen

Je nach Notwendigkeit und Bedarf können sich die Nutzer für einzelne oder mehrere Serviceleistungen („Stufen“) registrieren.

Stufe eins – Früherkennung: Auf Basis von Echtzeit-Beobachtungsdaten des Royal Observatory of Belgium (ROB) und Daten des gerade entstehenden globalen Flare-Detection-Systems (GIFDS) werden Flares und koronale Massenauswürfe detektiert und Ankunfts wahrscheinlichkeiten berechnet. Damit ist eine ungefähre Vorhersage (zwei bis drei Tage) schon möglich, die genaue Stunde lässt sich jedoch noch nicht bestimmen. Interessant ist diese erste Stufe vor allem für die Forschung, weniger für industrielle Nutzer.

Stufe zwei – Lagrange-Punkt L1: Messen die Satelliten ACE und DSCOVR auf L1 einen Sonnensturm, so wird dieser auch die Erde erreichen. Wie stark der Sturm ausfallen wird, hängt allerdings von vielen Faktoren ab,

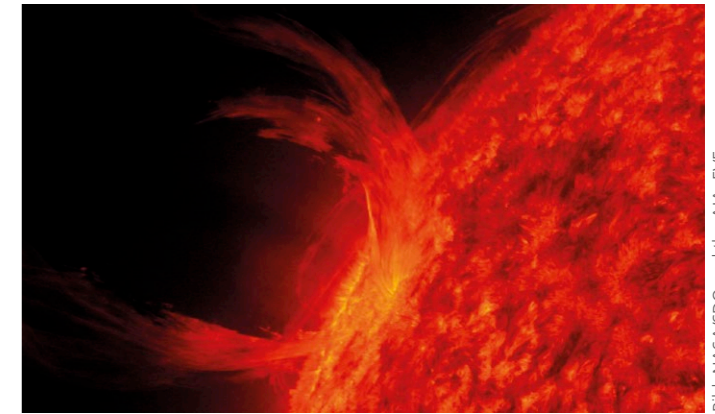


Bild: NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams

KURZE GESCHICHTE DES WELTRAUMWETTERS

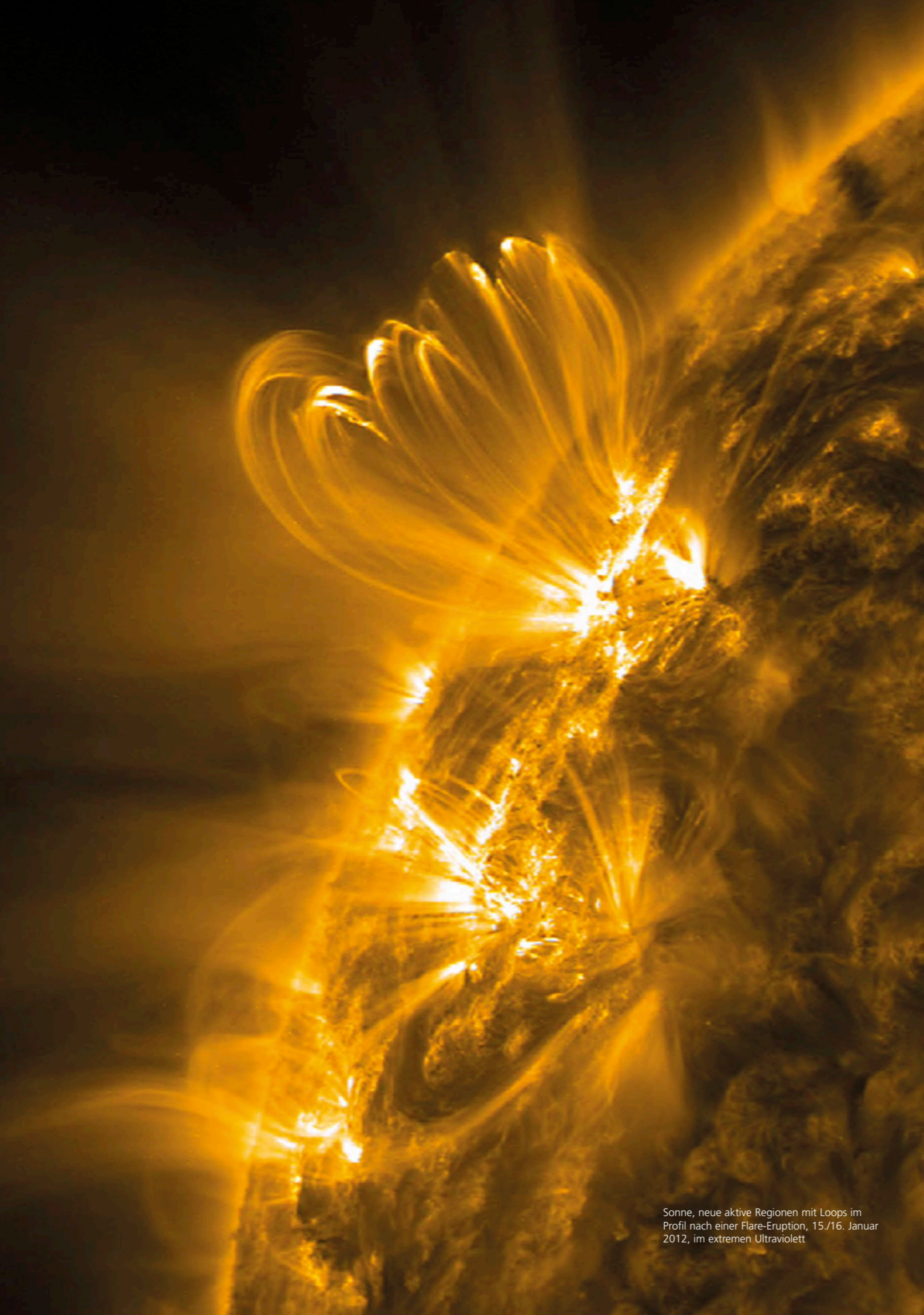
1859 – Carrington-Event: Beim Nachzeichnen von Sonnenflecken entdeckte der Hobbyastronom Richard Carrington eine gewaltige Eruption auf der Sonne. Dieses Ereignis gilt als bisher größter wissenschaftlich beobachteter magnetischer Sturm und wird als Beginn der Weltraumwetter-Forschung angesehen. An den Telegrafienstationen sollen die Mitarbeiter Stromschläge erlitten haben. Heute hätte ein ähnlich starkes Ereignis katastrophale Auswirkungen. Wissenschaftler schätzen, dass ein Sturm solcher Größenordnung im statistischen Mittel alle 500 Jahre auftritt.

1921 – Mai-Sturm: Einer der stärksten Sonnenstürme des 20. Jahrhunderts erzeugt in Überlandleitungen extrem hohe Ströme. Die nördliche Hemisphäre ist bis nach Mexiko und Puerto Rico betroffen, die südliche bis in die Breiten von Samoa. Ein ähnlicher Sturm würde heute die Hälfte der Stromnetze in Nordamerika kollabieren lassen.

1989 – Québec, Kanada: Ein heftiger geomagnetischer Sturm führt zu einem neunstündigen Stromausfall in der Region um Montreal. Verkehrsleitsysteme, Flughäfen und Fernwärmeversorgung fallen aus. Rund sechs Millionen Menschen sind betroffen.

2003 – Halloween-Sturm: Innerhalb von zwei Wochen werden siebzehn größere Flares beobachtet, kurzzeitig ist der Funkverkehr gestört. Im schwedischen Malmö fällt ein Teil des Stromnetzes aus. Luftkorridore in Nord-Kanada werden für Passagierflugzeuge geschlossen. Signale von Satelliten- und Navigationssystemen fallen zeitweise aus. Die Partikelwolke ist bis zu dreizehnmal so groß wie die Erde und bewegt sich mit 1,6 Millionen Kilometern pro Stunde. Ein Satellit wird komplett zerstört, 27 Satelliten weisen Anomalien in ihrer Funktionstüchtigkeit auf.

Ausblick: Zerstörte Kommunikations- und Positionierungssysteme, Einschränkungen des Luft- und Schiffsverkehrs und ökonomische Schäden in Milliardenhöhe – ein extremer geomagnetischer Sturm ist ein seltenes, aber folgenschweres Ereignis. Eine Vorhersage des Weltraumwetters gäbe Satellitenbetreibern Vorlauf, um entsprechend zu reagieren und Folgekosten von Sonnenstürmen zu reduzieren. Seit Anfang des Jahres 2000 richtet das DLR nationale Weltraumwetter-Workshops aus, um Entscheidungsträger zusammenzubringen und für das Thema zu sensibilisieren. Die Gruppe „Ionosphärische Effekte und Korrekturen“ des Instituts für Kommunikation und Navigation arbeitet am Aufbau eines permanenten Weltraumwetter-Service, dem „Ionosphere Monitoring and Prediction Service“ (IMPC).



Sonne, neue aktive Regionen mit Loops im Profil nach einer Flare-Eruption, 15./16. Januar 2012, im extremen Ultraviolett

Bild: NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams



Antennenanlage am DLR Neustrelitz für den Empfang von Weltraumwetter-Daten

insbesondere vom interplanetaren Magnetfeld und davon, ob sich die Teilchen des Sonnensturms gut in die Erdatmosphäre einkoppeln. Zu diesem Zeitpunkt kann bereits eine genaue Vorhersage gemacht und eine Warnung herausgegeben werden. Ab der Messung am L1-Punkt erreicht der Sonnensturm (abhängig von der Sonnenwindgeschwindigkeit) die Erdatmosphäre mit einem Zeitverzug von 30 bis 60 Minuten. Dort angekommen, breiten sich die Störungen in der Ionosphäre in zwei bis drei Stunden von den Polarregionen bis in mittlere Breiten aus. Dadurch, dass der Einfluss des Sonnenwindes zeitlich eingegrenzt werden kann, öffnet sich für die Industrie ein hilfreiches Zeitfenster. Dieses bietet genügend Vorwarnzeit für viele Anwendungen, sodass technische Systeme zeitnah angepasst oder abgeschaltet werden können.

Stufe drei – Vorhersage: Mit empirischen und zukünftig auch physikalischen Modellen wird prognostiziert, wann und wo welche Störung zu erwarten ist.

Stufe vier – Echtzeit-Verfolgung: Die Rechenmodelle werden durch Echtzeitmessungen der Ionosphäre stetig kontrolliert und angepasst. Dadurch können die Wissenschaftler akkurat bestimmen, ob die Gefahr vorbei ist, und entsprechend Entwarnung geben.

DLR-Know-how zum Weltraumwetter

Seit der Jahrtausendwende veranstaltet das DLR nationale Weltraumwetter-Workshops und schafft so eine Bühne für dieses immer wichtiger werdende Thema. Im 4. Workshop wurde 2015 ein gemeinsames Positionspapier vorgeschlagen, an dem zurzeit noch gearbeitet wird. Das Dokument soll nationalen Entscheidungsträgern helfen, aktuelle Gesichtspunkte der vielschichtigen Weltraumwetter-Thematik in ihren Entscheidungen angemessen zu berücksichtigen und vorhandene nationale Ressourcen entsprechend zu nutzen.

Die stille, lebensspendende Kraft der Sonne macht Leben auf der Erde erst möglich. Die zerstörerischen Energien der gigantischen Eruptionen auf ihrer Oberfläche lassen sich im Alltag kaum erahnen. Doch die energetischen Teilchen des Sonnenwindes sind real und treffen unsere Gesellschaft an ihrem empfindlichsten Punkt: ihrer Vernetzung.

Wann wieder ein großer Sonnensturm kommt, kann niemand sagen. Dass er kommen wird, ist gewiss. Das DLR arbeitet daran, dass die Gesellschaft sich bestmöglich darauf einstellen kann.



Bild: DLR/Manuel Tennert

Dr. Jens Berdermann, theoretischer Physiker. Promotion in Astroteilchenphysik, Thema: Zustandsgleichung und Neutrino-Transport für supraleitende Quarkmaterie in Neutronensternen. Seit 2011 ist er am DLR-Institut für Kommunikation und Navigation in Neustrelitz. Er leitet die Gruppe Ionosphärische Effekte und Korrekturen und arbeitet am Aufbau des Ionosphere Monitoring and Prediction Center (IMPC).

Fünf Fragen an Dr. Jens Berdermann

1. „Mein Job bedeutet für mich ...“

• ... täglich neue Herausforderungen und interessante Forschungsarbeit. Aber auch anwendungsorientierte Wissenschaft.

2. „Wenn ich eine Antwort auf eine wissenschaftliche Frage bekommen könnte, dann wäre meine Frage ...“

• Hm, schwierig ... (überlegt). Allgemein vielleicht: Woraus besteht das Universum? Was war vor dem Urknall? Schwer, sich hier auf eine Frage begrenzen zu müssen. In meinem Arbeitsumfeld würde mich interessieren, wie stark ein Sonnensturm maximal werden kann und worauf wir uns im Extremfall einstellen müssen.

3. „Wenn ich in den Himmel schaue, sehe ich ...“

• ... Wolken? (lacht) Nein, ich bewege mich im Alltag (noch) ganz normal, ohne dass ich den Kopf ständig in den Himmel gerichtet habe ...

4. „Wenn ich mich nicht mit Weltraumwetter beschäftigen würde, dann würde ...?“

• ... ich mir bestimmt ein anderes spannendes Gebiet der Physik erschließen.

5. „In 30 Jahren ist die Weltraumwetter-Forschung so weit, dass ...?“

• ... das Weltraumwetter wie das Erdwetter verstanden wird. Die größten Fortschritte sehe ich im Bereich der physikalischen Modellierung mit Datenassimilation und Vorhersage. Ich hoffe, dass wir noch mehr direkte Beobachtungsdaten haben werden und all diese satelliten-, aber auch bodengestützten Daten in ein physikalisches Modell integrieren können. Dadurch wird es möglich, zeitlich und räumlich präzisere Vorhersagen über den Zustand der Ionosphäre zu treffen und Störungen viel genauer vorherzusagen.

GLOSSAR

SOHO – Solar and Heliospheric Observatory: Europäisch-amerikanisches Sonnenobservatorium, das Daten über das Sonneninnere, die Sonnenatmosphäre, die Korona und den Sonnenwind liefert.

ACE – Advanced Composition Explorer: NASA-Satellit, der den Sonnenwind sowie solare, interplanetare und kosmische Partikel analysiert und die Daten in die USA, nach Japan und zum DLR nach Neustrelitz übermittelt.

DISCOVR – Deep Space Climate Observatory: Misst die Stärke des Sonnenwindes sowie des interplanetaren Magnetfelds und bestimmt dessen Orientierung. Zusätzlich wird die rückgestreute Strahlung auf der sonnenbeschienenen Seite der Erde untersucht.

GPS – Global Positioning System: Weltweites Satellitensystem, das in 20.000 Kilometer Höhe stationiert ist und der Ortung und Navigation auf der Erde dient.

AUTOMATISCH FALTENFREI

Wie nichtmetallische Flugzeugbauteile zu ihrer Blitzschutzfunktion kommen

Von Nicole Waibel

Flugzeuge werden im Durchschnitt alle 3.000 Flugstunden von einem Blitz getroffen. Von den Passagieren bleibt das unbemerkt. Denn wie beim Auto wird der Blitz an der metallischen Außenhaut des Flugzeugs weitergeleitet; das Innere ist vor den elektrischen Entladungen geschützt. Grund dafür ist die abschirmende Wirkung des sogenannten „Faradayschen Käfigs“.

Zunehmend werden Faserverbundwerkstoffe wie carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) für den Flugzeugrumpf eingesetzt. Damit auch solche Bauteile einen Faradayschen Käfig bilden wie die bisherigen aus Metall, ist ein extra Blitzschutz notwendig. Die Lösung liegt in einer zusätzlichen Blitzschutzschicht. Diese muss bisher allerdings von Hand auf die kompletten Außenflächen des Rumpfes aufgetragen werden. Doch um die kommende Flugzeuggeneration wirtschaftlich produzieren zu können, ist dieser Prozess zu aufwändig und damit auch zu kostenintensiv. Gemeinsam mit Industriepartnern hat das DLR-Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) in Augsburg nun eine Lösung entwickelt und getestet, mit der sich das Blitzschutzmaterial vollständig automatisiert aufbringen lässt.

Ziel ist es, den Prozess schneller und wirtschaftlicher zu machen und das bei einem ebenso faltenfreien Ergebnis wie bisher bei der manuellen Feinarbeit. „Dazu soll der Blitzschutz in einem automatisierten, robusten Prozess aufgetragen werden, mit wiederholbaren Ergebnissen und bei gleichbleibender Qualität. Zudem wollen wir die Materialausnutzung verbessern und engere Toleranzen ermöglichen“, sagt Dr. Marcin Malecha, Projektleiter beim ZLP Augsburg. „Dafür haben wir zusammen mit Industriepartnern eine ganzheitliche Automatisierungslösung entwickelt, die über den Ablage- und Drapierprozess hinaus auch Ablagestrategien und die Prozessplanung einschließt.“

Von einem Roboter geführter Legekopf führt die Prozessschritte zusammen

Gemeinsam mit der Firma Emil Bucher GmbH und Co. KG wurde dazu ein automatisierter Legekopf konzipiert, entwickelt und umgesetzt. Insbesondere im hinteren, schmaler werdenden Bereich des Flugzeugrumpfes ist das Aufbringen des Blitzschutzes kompliziert. „Man kann sich die Problematik leicht vorstellen, wenn man versucht, ein Blatt Papier auf einen Ball aufzukleben“, schildert Patrick Kaufmann, wissenschaftlicher Mitarbeiter beim ZLP Augsburg, die Schwierigkeiten beim flächigen Aufbringen auf die gekrümmte Rumpfschale. Das

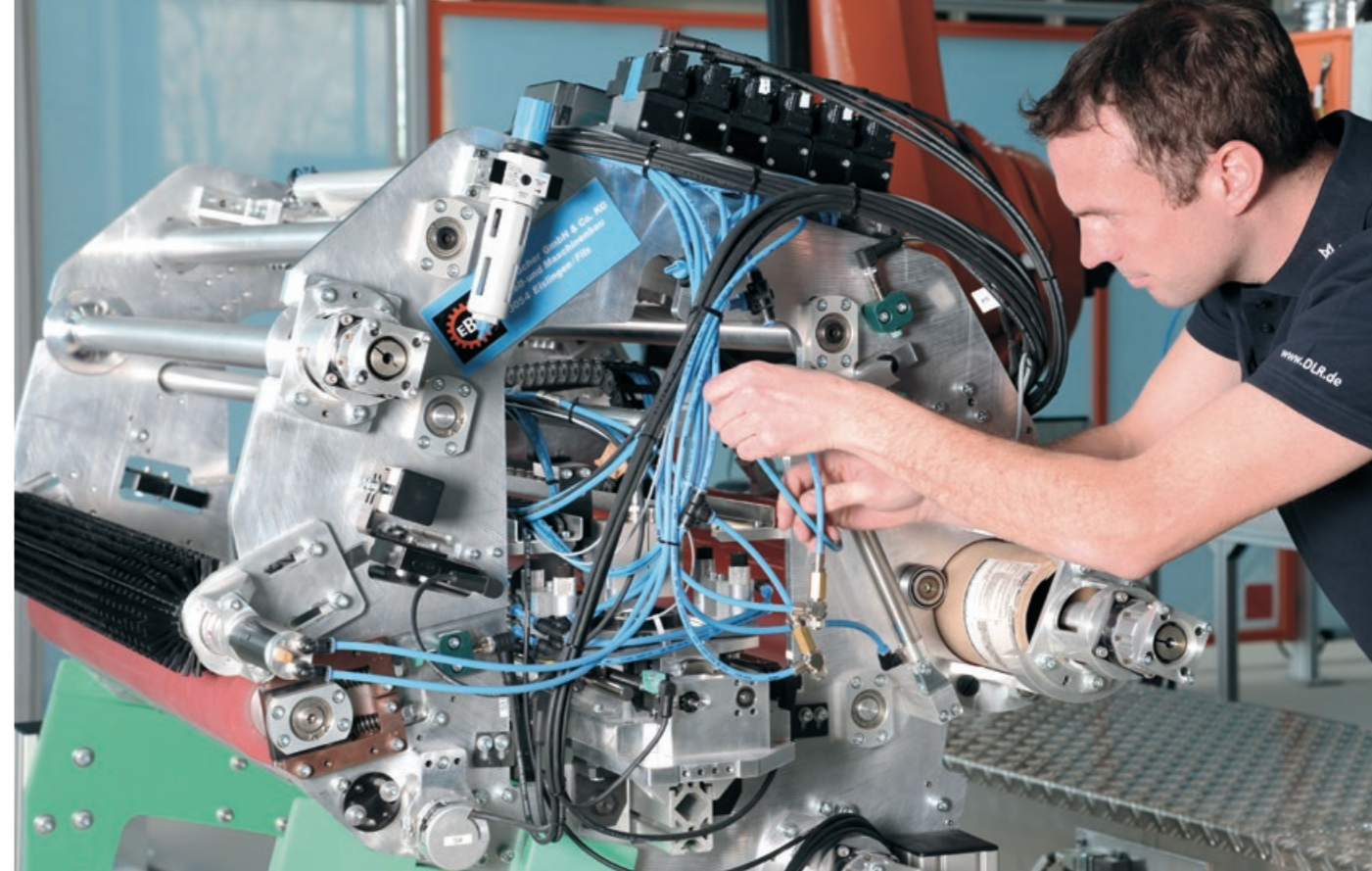
Material muss sorgfältig zugeschnitten, angedrückt und gleichmäßig glattgestrichen werden, um Faltenwurf zu vermeiden. „Wir haben alle in den jeweiligen Prozessschritten benötigten Funktionen berücksichtigt“, erklärt Kaufmann die Vorgehensweise bei der Entwicklung des automatisierten Ablagesystems. „Besonders hilfreich war in der ersten Entwicklungsphase ein Versuchswagen, mit dem wir den Materialfluss nachgebildet und die einzelnen Funktionsmodule wie Schneideeinheit, Andrückwalze oder Drapierereinheit verbessert haben.“

Anschließend wurde alles in ein kompaktes Gesamtsystem integriert. Einmal mit Material bestückt, führt der Legekopf den Ablageprozess bis zum Leeren der 90 Zentimeter breiten Materialrolle automatisiert aus: Er stellt das Material bereit, beschneidet es, legt es ab, drapiert es und sammelt anschließend Schutzfolie, Trägerpapier und Verschnitt wieder auf, alles in nur einem Arbeitsschritt. Ein Roboter führt Position und Orientierung des Legekopfes und steuert sämtliche Antriebe.

FARADAYSCHER KÄFIG

Der Begriff „Faradayscher Käfig“ geht auf den englischen Physiker Michael Faraday (1791–1867) zurück. Er fand in Experimenten heraus, dass das Innere von metallumgebenen Räumen von äußeren elektrischen Feldern und elektromagnetischen Wellen abgeschirmt ist, ähnlich wie bei einem Käfig. Die Ladung konzentriert sich bei elektrischen Leitern an der Außenseite. Autos, Züge und Flugzeuge stellen solche „Faradayschen Käfige“ dar. Werden diese bei einem Gewitter vom Blitz getroffen, leitet das Metall die Energie an der Außenseite weiter und die Insassen sind geschützt. Auch Blitzableiter nutzen den von Faraday entdeckten Effekt.

Die Versuche, das Metallgeflecht optimal zu drapieren, erfolgten im Originalmaßstab auf einer doppelt gekrümmten Werkzeugoberfläche. Der Blitzschutz bildet immer die äußerste Schicht des Flugzeugs. Es ist jedoch möglich, je nach Reihenfolge, in der die Einzelschichten abgelegt werden, auf einer konkaven Schale mit dem Blitzschutz als erste Schicht zu beginnen oder auf einer konvexen Schale mit dem Blitzschutz abzuschließen. „Zuerst gelang es uns, das Material auf eine konvexe Werkzeugoberfläche zu legen. Danach haben wir den Legekopf für eine konkave Geometrie erweitert. Da diese sich in Form und Kraftverteilung unterscheiden, mussten wir die Geometrie der Andrückwalze ändern“, erklärt Kaufmann. Eine weitere wichtige Maßnahme führte dann zu einer optimierten Prozesssteuerung. In einer abschließenden Versuchsreihe wurde die geforderte Ablagequalität für drei Bahnen auf einer konkaven Geometrie in Originalgröße erfolgreich verifiziert.

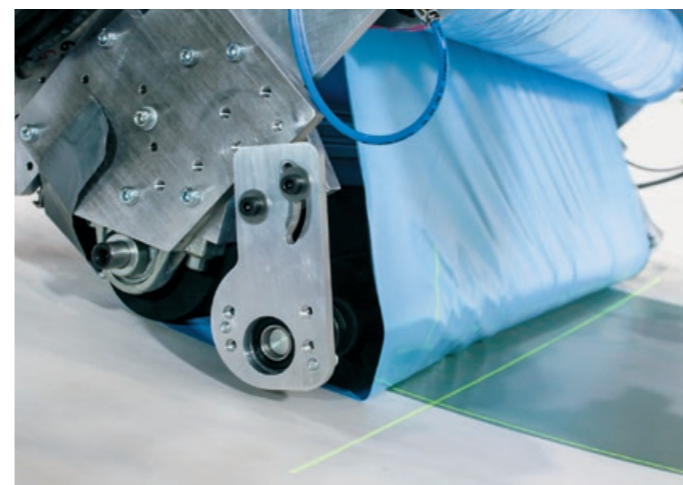


Der entwickelte Legekopf führt den Ablageprozess vollständig automatisiert aus. Lediglich das Bestücken der Materialrolle muss noch manuell ausgeführt werden.

Faltenfreie Ablage und bessere Materialausnutzung

„Neben der faltenfreien Ablage eines fast verzugsfreien Materials liegt eine weitere Schwierigkeit im Finden der optimalen Ablagebahn“, ergänzt Malecha. Die Bahnplanung für den Roboter beschreibt den Bewegungsverlauf des Legekopfes, wie er von der Roboteranlage positioniert und orientiert wird. „Im manuellen Prozess teilt man das nach hinten schmaler werdende Heck des Flugzeugs in parallele Scheiben, um dem Mitarbeiter die Ablage zu vereinfachen. So werden bisher Ablagebahnen erzeugt, die stark gekrümmt sind und in ihrer Form einer Banane ähneln. Dadurch kann derzeit nur ein Teil der Materialbreite ausgenutzt werden.“

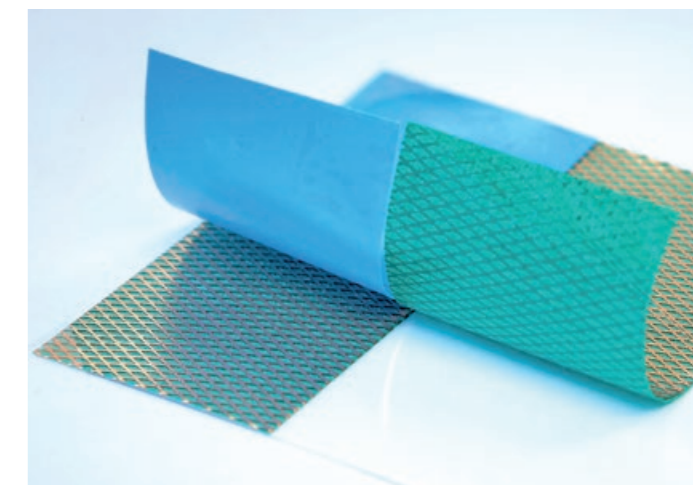
Die nun entwickelte Bahnplanung ist deutlich materialsparender, da nahezu die volle Breite der Materialrolle abgelegt werden kann. Mit



Optimale Ablagebahnen und ein faltenfreies Ergebnis sind zwei wichtige Kriterien beim automatisierten Auftrag von Blitzschutz

Hilfe eines von den Wissenschaftlern entwickelten Algorithmus lassen sich die Roboterbahnen optimal an die unterschiedlichen Krümmungen der Oberfläche anpassen. „Wir können breitere Bahnen legen, wodurch Überlappungen eingespart und der Materialverschnitt reduziert wird. Zudem lässt sich mehr Material in kürzerer Zeit ablegen“, zählt Malecha einige Vorteile der Automatisierungslösung auf. Diese wurde zusammen mit den Industriepartnern Premium AEROTEC GmbH und Emil Bucher GmbH und Co. KG umgesetzt und erfolgreich validiert. Malecha fasst zusammen: „Wir haben es erstmals geschafft, die Ablage von Blitzschutzmaterial auf großflächigen, doppelt gekrümmten Luftfahrtbauteilen in einen vollständig automatisierten Prozess zu überführen.“

Nicole Waibel ist beim Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) in Augsburg für Öffentlichkeitsarbeit zuständig.



Ein zusätzliches Kupfergitter sorgt dafür, dass auch Flugzeugrumpfe aus Faserverbundmaterialien elektrisch leitfähig und so sicher vor Blitzschlag sind

MIT LEICHTIGKEIT IN DIE SERIE

Fabrik der Zukunft: Das Auto wird leichter und besteht aus funktionsintegrierten Bauteilen

Von Nicole Waibel

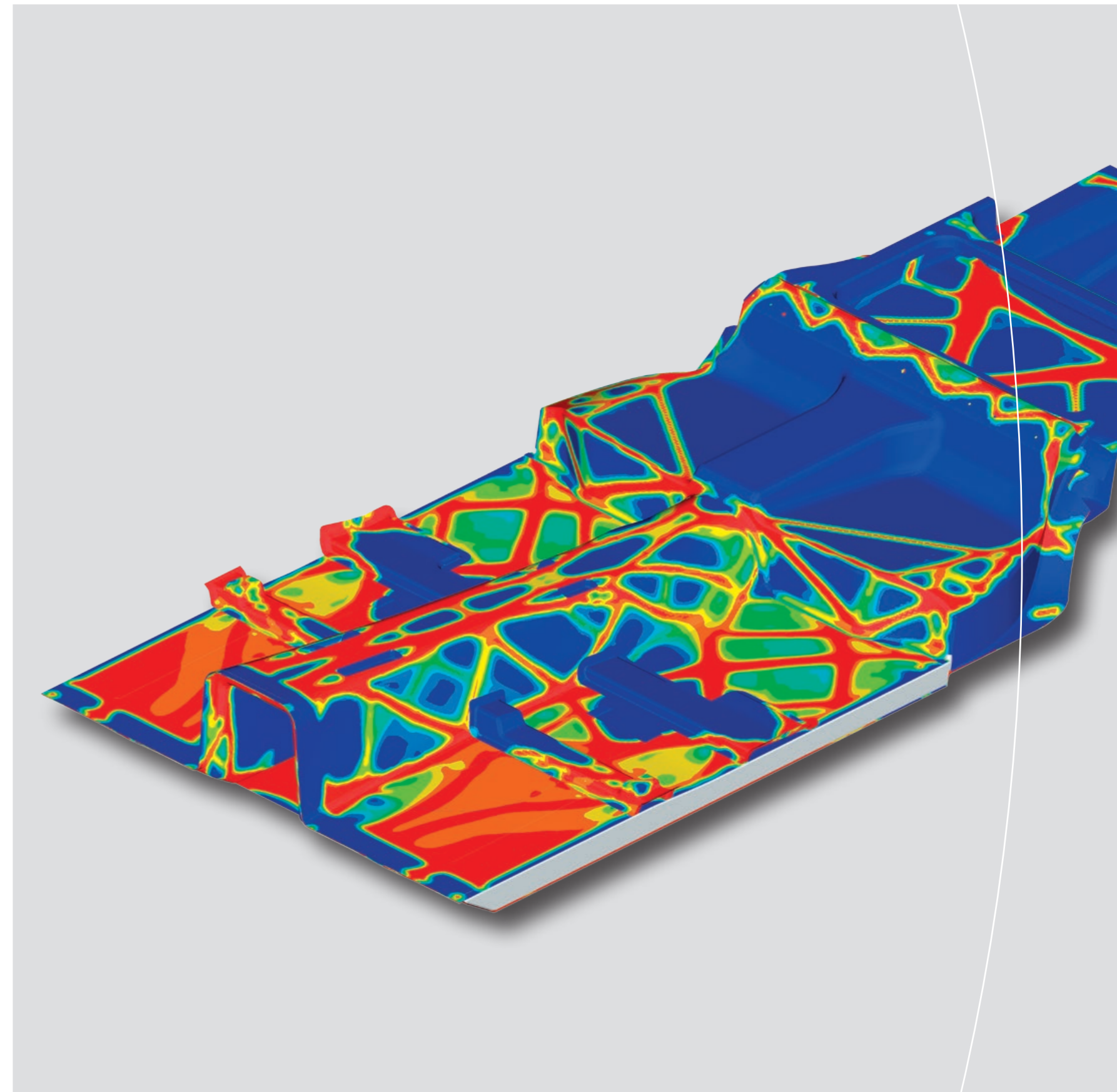
Als die Kutsche zum Automobil avancierte, glich das einer Revolution. Allerdings nicht, was die Werkstoffe betraf. Man baute im Wesentlichen mit Holz, Leder und Eisen. Gewalzter und geschmiedeter Stahl kam erst später ins Spiel. Bis Mitte des 20. Jahrhunderts war Holz kombiniert mit Blech der häufigste Bestandteil von Karosserien. Holz wurde lackiert oder mit Leder überzogen. Trotz des Einsatzes des Faserverbundwerkstoffs Holz lag das Hauptaugenmerk der Karosserieentwicklung nicht auf dem Leichtbau.

Heute liegt das Geheimnis erfolgreicher Automobil-Produzenten auf dem zielgerichteten und wirtschaftlichen Einsatz von Materialien. Ziel ist es, das Auto möglichst leicht zu bauen, denn je weniger es wiegt, desto geringer sind Kraftstoffverbrauch und Emissionsausstoß bei verbrennungsmotorischen Antrieben. Immer häufiger finden deshalb carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) Anwendung im automobilen Leichtbau. Sie rosten nicht, weisen eine höhere Steifigkeit und Festigkeit bei geringerem Gewicht als Stahl oder Aluminium auf und eignen sich so für crashrelevante Strukturen.

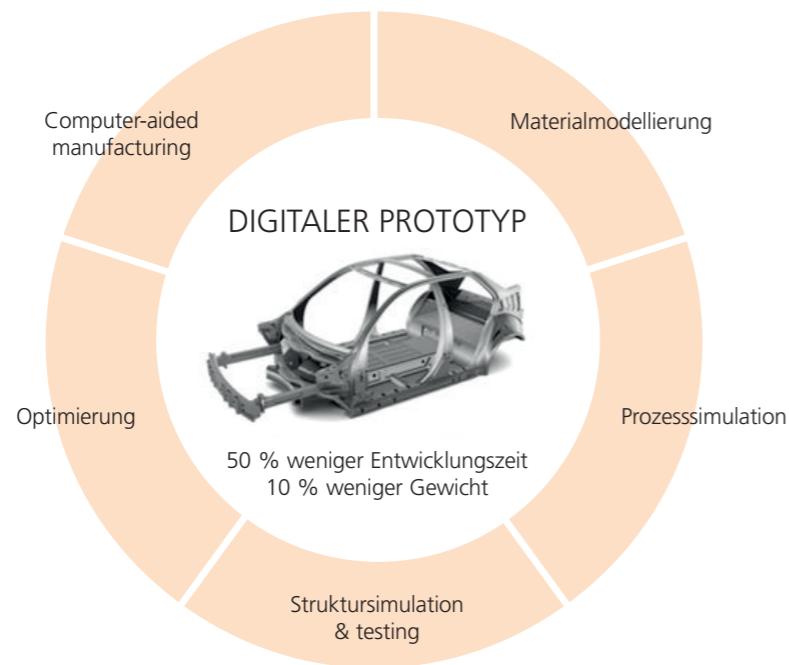
Neben dem Einsatz neuartiger Leichtbaumaterialien lässt sich zusätzliches Gewicht einsparen, indem möglichst viele technische Funktionen in eine Struktur integriert werden. Dafür bieten Faserverbundkunststoffe sehr gute Möglichkeiten. Doch die sogenannten funktionsintegrierten Strukturen kommen in der automobilen Serienfertigung bisher kaum zum Einsatz. Um deren Einführung in die Serie zu unterstützen, arbeitet das DLR im Forschungscampus ARENA2036 gemeinsam mit Partnern an neuen Ansätzen für den Leichtbau mit integrierten Funktionen und an der Entwicklung digitaler Prototypen.

ARENA2036

Im Forschungscampus ARENA2036 (Active Research Environment for the Next Generation of Automobiles) forschen Experten aus Wirtschaft und Wissenschaft gemeinsam an Leichtbautechnologien und Produktionsmodellen für das Auto der Zukunft. Als Gründungsmitglied bringt das DLR mit den beiden Stuttgarter Instituten für Fahrzeugkonzepte sowie für Bauweisen und Strukturtechnologie seine Kompetenzen in den Bereichen Fahrzeugkonzeption, Fahrzeugleichtbau, Crashsimulation und Versuch ein.



DLR-Forscher untersuchen, welchen Belastungen das Bodenmodul im Betrieb und auch im Falle eines Zusammenstoßes ausgesetzt ist. Mit dem Wissen, wo die Struktur am meisten Last aufnehmen muss, um möglichst leicht ausgelegt werden zu können, verstärken die Wissenschaftler gezielt diese Bereiche (rot). Das Ergebnis ist eine Gesamtstruktur, die bei minimalem Einsatz von Material trotzdem stabil ist.



Leichtere Karosserieteile mit mehreren Aufgaben

„Das Gewicht lässt sich durch Bauteile aus hochfestem Stahl, Aluminium oder eben CFK reduzieren. Durch die richtige Kombination in Multi-Material-Bauweise ergeben sich weitere Potenziale. Das Ziel ist, das Maximum aus dem Werkstoff und der Leichtbauweise herauszuholen. Ein funktionsintegriertes Bauteil ist in der Regel leichter als die Summe der Einzelfunktionsbauteile. Durch die richtige Kombination der Materialien und durch Funktionsintegration lässt sich das Gewicht um 20 bis 30 Prozent senken, das zeigen Erfahrungen aus Verkehrsprojekten“, so Gundolf Kopp, Leiter des Forschungsfelds Leichtbau und Hybridbauweisen am DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte in Stuttgart. „Mit einer höheren Funktionsintegration und weniger Einzelbauteilen können wir in Zukunft zudem den Aufwand für Montage und Logistik senken.“

Im Projekt LeiFu (Intelligenter Leichtbau mit Funktionsintegration) erforschen die ARENA2036-Partner die Grundlagen zur Integration ausgewählter Einzelfunktionen. Als Anwendungsbeispiel dient ein multifunktionales Bodenmodul für ein Fahrzeug der Oberklasse. Statt wie bisher überwiegend aus Metall fertigen die Forscher die Bodenstruktur aus Faserverbundkunststoffen und integrieren zusätzliche Funktionen direkt in den Unterboden. Der Fahrzeugboden der Zukunft dient nicht mehr nur als Fundament, um Elemente wie Fahrzeugsitze zu verankern. „Die möglichen Funktionalitäten reichen von sensorischen oder elektrischen

über thermische Funktionen bis hin zur Schall- und Wärmedämmung. Im Projekt erarbeiten wir Bewertungs- und Gestaltungsregeln für hochintegrierte Bauteile“, so Kopp. Ziel ist es, die Konzepte, Bauweisen und Herstellungsmethoden funktionsintegrierter Faserverbundstrukturen so weiterzuentwickeln, dass sie es leichter haben, in die automobilen Serienproduktion eingeführt zu werden.

Digitaler Prototyp unterstützt virtuelle Produktentwicklung

Wie lässt sich das Verhalten von Faserverbundmaterialien vorhersagen? Und können Faserverbundbauteile in einer geschlossenen Prozesskette, von der Auslegung bis zur Fertigung, am Computer berechnet werden? Mit diesen Fragen beschäftigen sich die ARENA2036-Partner im zweiten Teilprojekt DigitPro (Digitaler Prototyp).

„Die Herausforderung besteht darin, realitätsgetreue Materialmodelle zu entwickeln, um Werkstoffe und Strukturen am Computer abbilden zu können“, so Dr. Nathalie Toso, Leiterin der Abteilung Strukturelle Integrität am Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie in Stuttgart. „So können wir unseren Partnern im Bereich der Herstellung wichtige Informationen geben, zum Beispiel welche Festigkeiten und Steifigkeiten erzielt werden können, welche Energie im Crashfall absorbiert werden kann oder welche Produktionsverfahren sich für Material und Struktur am besten eignen.“

Von der Auslegung bis zur automatisierten Fertigung durchläuft ein Bauteil eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesse. „Die Simulationenwerkzeuge und Datenformate, die von den verschiedenen Akteuren verwendet werden, sind unterschiedlich, das erschwert den Datenaustausch“, so Toso. Ziel im Teilprojekt DigitPro ist es, alle notwendigen Schritte zur Bauteilentwicklung numerisch abzubilden und zunächst virtuell in eine geschlossene Prozesskette zu überführen. Dies geschieht am Beispiel zweier unterschiedlicher textiler Faserarchitekturen: Geflechte und Open Reed Weaving (ORW), eine neuartige Webtechnologie.

„Auf diese Weise sollen Bauteile anschließend zügig und anforderungsgerecht ausgelegt werden können. Mit Hilfe eines vollständigen digitalen Modells und eines durchgängigen Datenaustauschs über alle Schritte der Prozesskette hinweg wird es möglich, das Bauteilgewicht um zehn Prozent und die Entwicklungszeit um 50 Prozent zu senken.“ Zudem können Entwicklungskosten reduziert, Reibungsverluste vermieden und der Aufwand für bisher notwendige reale Tests zur Validierung und Absicherung der Bauteileigenschaften minimiert werden.



Die Fabrik der Zukunft ist vernetzt und flexibel; neue Entwicklungen können sofort in die laufende Produktion einfließen

Bild: ARENA2036

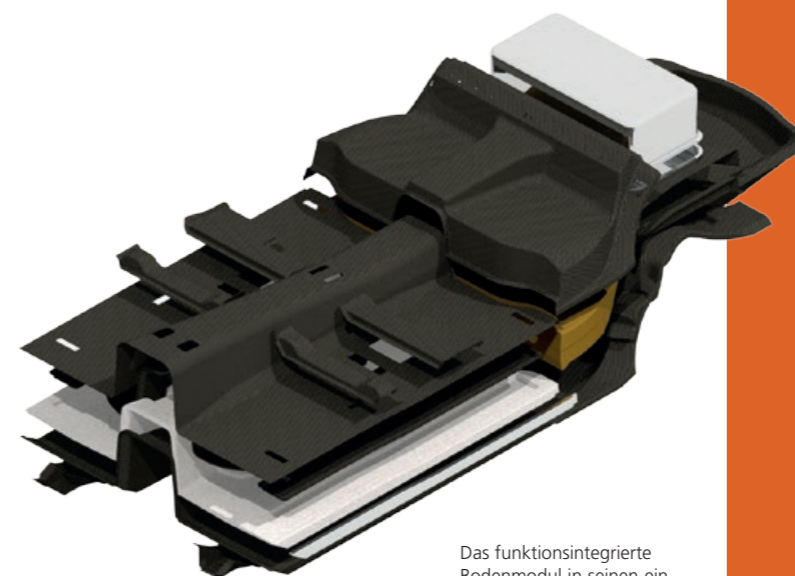


Momentan entsteht auf dem Stuttgarter Universitätscampus in Vaihingen die Forschungsfabrik für die nächste Generation Automobile

Enge Kooperation von Wirtschaft und Wissenschaft

Das Projekt ForschFab (Forschungsfabrik) führt die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Projekte LeiFu und DigitPro zusammen. Im Fokus der Forschungsfabrik steht der Wandel des industriellen Produktionsprinzips, sprich die Ablösung der bisherigen Fließbandfertigung durch die wandlungsfähige Produktion der Zukunft, die Industrie 4.0: Die Montagelinie ist so flexibel, dass neue Entwicklungen sofort in die laufende Produktion einfließen können, vernetzte und sensorgeleitete Roboter- und Assistenzsysteme unterstützen den Menschen. Klassische Verbrennungsmotoren, Hybridantriebe, elektrische Antriebe mit Batterien oder Brennstoffzelle werden zeitgleich nebeneinander produzierbar sein. Peter Froeschle, Geschäftsführer von ARENA2036: „In der Forschungsfabrik entsteht nicht nur eine einmalige Anlage zur Erforschung der Industrie 4.0, sie bringt auch Experten aus Wirtschaft und Wissenschaft unter einem Dach zusammen. Ziel dieser interdisziplinären und interinstitutionellen Kooperation ist es, den Transfer von Forschungserkenntnissen in die industrielle Produktion zu beschleunigen. Hier leistet das DLR einen wichtigen Beitrag.“

Nicole Waibel ist im DLR-Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie unter anderem für die Öffentlichkeitsarbeit verantwortlich.



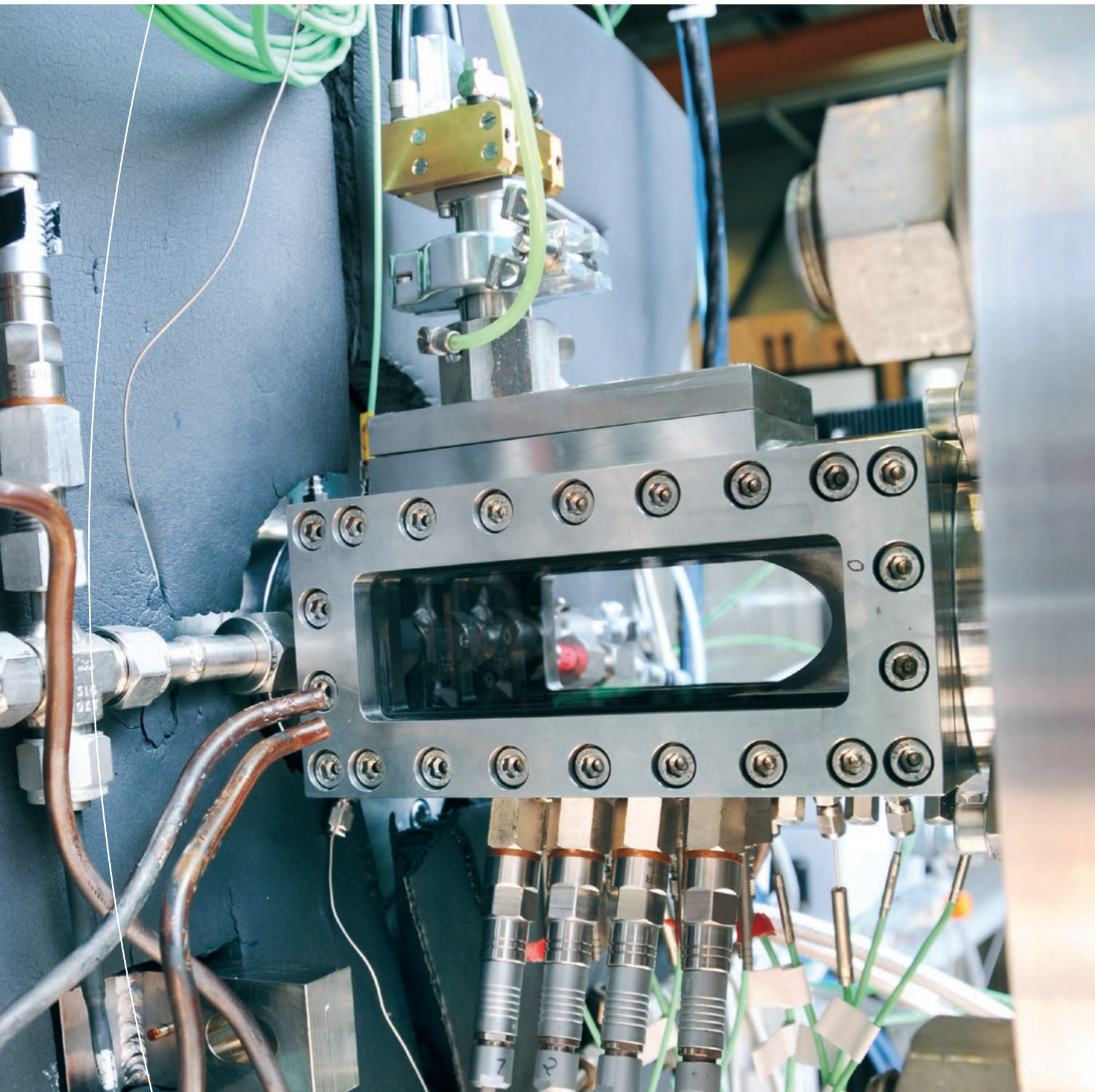
Das funktionsintegrierte Bodenmodul in seinen einzelnen Bestandteilen

ARENA2036: EUROPAS GRÖSSTE FORSCHUNGSFABRIK

Das Forschungsprogramm ARENA2036 (Active Research Environment for the Next Generation of Automobiles) gehört zu den Gewinnern des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ausgeschriebenen Wettbewerbs „Forschungscampus – öffentlich-private Partnerschaft für Innovationen“. Die Jahreszahl 2036 nimmt Bezug auf das 150-jährige Jubiläum des Automobils. Gründungsmitglieder sind neben dem DLR die BASF SE, die Daimler AG, die Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF), die Fraunhofer-Gesellschaft, die Robert Bosch GmbH und die Universität Stuttgart.

Seit Juli 2013 arbeitet ARENA2036 bereits in einem Interimsgebäude mit allen vier Startprojekten: LeiFu (Intelligenter Leichtbau mit Funktionsintegration), DigitPro (Digitaler Prototyp), ForschFab (Forschungsfabrik) sowie das Schnittstellenprojekt Khoch3 (Kreativität-Kooperation-Kompetenztransfer). Am 8. Oktober 2015 wurde auf dem Universitätscampus in Vaihingen der Grundstein für einen Forschungsneubau gelegt. Diese „Forschungsfabrik“ führt die Aktivitäten des Forschungscampus unter einem Dach zusammen. Sie bringt die unterschiedlichen Disziplinen in engen Austausch und ermöglicht das zeitnahe Erproben der Ergebnisse aus Entwicklungs- und Konstruktionsforschung sowie Simulation. In dem Gebäude entstehen bis zu 160 Arbeitsplätze.

Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben ARENA2036 wird mit Mitteln des BMBF gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.



Vor dem Start steht der zündende Moment: Bevor sich eine mehrere hundert Tonnen schwere Weltraumrakete erhebt, muss das Triebwerk zuverlässig gezündet werden. Laserpulse könnten zukünftig dabei die tragende Rolle spielen. Das Bild zeigt die Versuchsbrennkammer am DLR-Teststand M3.1 mit integriertem HiPoLas-Laser: Die gläserne Brennkammer sowie Druck- und Temperatursensoren erlauben es, die Treibstoffeinspritzung und das Zündverhalten genau zu studieren.

INS ALL MUSS MAN ERST MAL KOMMEN



Zukünftige Trägerraketen zünden mit Lasern

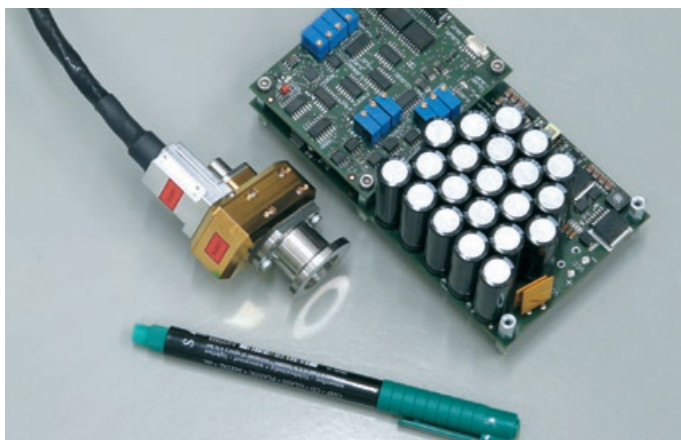
Von Dr.-Ing. Chiara Manfletti, Michael Börner, Gerhard Kroupa und Dr.-Ing. Sebastian Soller

Dezember 2014, Luxemburg. Der Ministerrat der Europäischen Weltraumorganisation ESA beschließt, eine neue Trägerrakete zu entwickeln: die Ariane 6. Sie soll Europa weiterhin den unabhängigen Zugang zum Weltall garantieren. Mit einem eigenen europäischen Trägersystem lassen sich aber nicht nur Europas Raumfahrtprojekte ins All bringen, ein wettbewerbsfähiges Trägersystem kann auch weltweit kommerziell genutzt werden.

Die neue Rakete ist Teil einer europäischen Trägerfamilie, bestehend aus der großen Ariane 6 und der kleineren, aber nicht weniger wichtigen VEGA-C. Beide zusammen werden das Rückgrat der aufeinander abgestimmten europäischen Raumtransportaktivitäten sein. Europas Trägerraketen ermöglichen spektakuläre Projekte: Die Kometenmission Rosetta und die ATV-Versorgungsflüge zur Internationalen Raumstation ISS sind herausragende Beispiele. Doch auch für Großprojekte zur Stärkung der europäischen Souveränität, wie das Galileo-Satellitensystem, sind europäische Trägerraketen von großer Bedeutung.

Diese neue Trägerfamilie basiert unter anderem auf dem Feststoffbooster P120C, der speziell für die neue Trägergeneration entwickelt wird. Zudem werden Technologien, die heute schon in der Ariane 5 eingesetzt werden, wie das Vulcain 2-Triebwerk, derzeit weiter verbessert. Eine tragende Rolle im wahrsten Sinn des Wortes wird dabei die Laserzündung spielen. Bei der Laserzündung wird ein kurzer Laserpuls mittels einer Linse gebündelt, wodurch ein mehrere tausend Grad Celsius heißes Plasma entsteht. Der sich daraus entwickelnde Flammenkern wächst zu einer Verbrennungszone und zündet so die Brennkammer.

Es war aber nicht immer so, dass Laser für das Zünden von Triebwerken in Erwägung gezogen wurden. Erste Ideen in den Siebzigerjahren des letzten Jahrhunderts scheiterten an den benötigten hohen Energiedichten des Laserpulses und an den komplizierten Bauformen: Damals waren die Laser noch tischgroße, temperatursensible und wartungsintensive Systeme. Um ein Plasma in der Luft zu erzeugen, muss das Lasersystem eine Intensität von einer Billionen Watt pro Quadratzentimeter generieren. Diese Laserpulsintensitäten können mit ausreichend kompakten Lasern nur durch sehr kurze Laserpulse im Nanosekundenbereich, also in Milliardstel Teilen einer Sekunde, erreicht werden.



HiPoLas-Laser des österreichischen Technologiezentrums Carinthian Tech Research

Der Laser, der heute in Zusammenarbeit von DLR und ASL (Airbus Safran Launchers) speziell für Raketentriebwerke weiterentwickelt wird, ist der HiPoLas-Laser des österreichischen Technologiezentrums Carinthian Tech Research (CTR). Es handelt sich dabei um ein sehr kleines und mit einem halben Kilogramm Gewicht sehr leichtes Lasersystem.

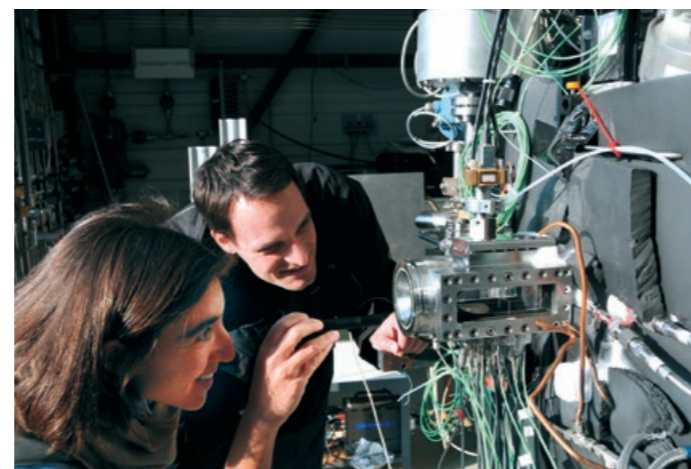
Die ersten Laserzündtests von Versuchsbrennkammern fanden in den Neunzigerjahren am Prüfstand M3.1 des DLR-Instituts für Raumfahrtantriebe in Lampoldshausen statt. Ziel war es, experimentelle Daten zu gewinnen, mit denen der Zündprozess in Zahlen gefasst werden konnte: Dank des präzise festlegbaren Zündorts und -zeitpunkts eignet sich die Laserzündung perfekt für die numerische Simulation der Zündung. So konnten die Forscher die wechselseitigen Abhängigkeiten von Einspritzeneigenschaften der Treibstoffe, Zündzeitpunkt und Druckverlauf nach der Zündung untersuchen. An eine technische Übertragung auf reale Triebwerke war zu diesem Zeitpunkt noch nicht zu denken.

Die erste Version eines Laserzünders wurde von CTR im Jahr 2004 mit dem Ziel entwickelt, die elektrischen Zündkerzen für Pkw-Motoren zu ersetzen. Schnell zeigte sich, dass angesichts der Vibrationen und Temperaturen beim Betrieb von Pkw ein sehr kompakter und aus möglichst wenigen Komponenten bestehender Festkörperlaser nötig war. Auch an Laserzündern für Großgasmotoren und Flugzeugturbinen wurde gearbeitet. Dazu musste der Laser von Wasserkühlung auf eine passive Kühlung umgestellt und weiter verkleinert werden. Es entstand zudem eine kompakte, luftfahrttaugliche Elektronikbox. Damit waren auch die Voraussetzungen geschaffen, um das System in der Raumfahrt einzusetzen.

Erst 2009 wurde die Laserzündung als Zündtechnologie für sogenannte Lageregelungstriebwerke in Erwägung gezogen. Diese kleinen Triebwerke werden sowohl auf Satelliten als auch in Trägerraketen eingesetzt, um die Lage und Ausrichtung während des Starts und des Fluges zu korrigieren, zu ändern oder zu halten. Heutige Lageregelungssysteme werden mit hydrazinbasierten Treibstoffen betrieben. Sie haben den Vorteil, kein Zündsystem zu benötigen, sind aber giftig und gelten als krebserregend. Als 2007 die REACH-Verordnung der EU in Kraft trat, wurde die Anwendung bestimmter umweltschädlicher Stoffe eingeschränkt oder untersagt. Hydrazin gehört dazu. Eine Alternative ist die Nutzung von Wasserstoff und Sauerstoff aus den Haupttanks der Rakete. Für den Betrieb benötigen solche Lageregelungstriebwerke jedoch ein leichtes und zuverlässiges Zündsystem. Deshalb wurde die Laserzündung für flüssigen Sauerstoff und gasförmigen Wasserstoff oder gasförmiges Methan an einer Versuchsbrennkammer am DLR-Teststand M3.1 untersucht.

Diese Versuchsbrennkammer ermöglicht in Kombination mit dem Vakuumsystem des Teststands, den sehr geringen Druck zu simulieren, der bei großen Flughöhen herrscht. Eine sechsmonatige Versuchskampagne mit über 300 Testläufen bewies, dass die Laserzündung nicht nur unter den Bedingungen auf der Erdoberfläche, sondern auch für Höhenbedingungen geeignet ist. Zugleich wurde der miniaturisierte HiPoLas-Laser in einer Raketenversuchsbrennkammer eingesetzt. Der Erfolg dieser Tests war der Grundstein für die weitere Entwicklung der Laserzündung in der Raumfahrtantriebstechnik in Europa.

Die Technologie, die zunächst nur für Triebwerke zur Lageregelung angedacht war, wurde nach den ersten Grundagentests 2011 auch als mögliche Prüfstandtechnologie betrachtet. Pro Versuchstag sollten durch den Einsatz nur eines Laserzünders viele Zündtests möglich werden. Zeitgleich wurde die Laserzündung aber auch als Technologie für die Zündung von größeren Triebwerken identifiziert. Auf das erste ESA-Forschungsprojekt folgte 2014 ein zweites. Es hatte zum Ziel, die Laserzündung einer Brennkammer mit mehreren Einspritzelementen unter



Am DLR-Teststand M3.1: Die Versuchsbrennkammer wird am Ende eines Testtages auf Schäden untersucht.

Höhenbedingungen zu testen. Die Grundagentests am Teststand M3.1 des DLR-Instituts für Raumfahrtantriebe in Lampoldshausen waren so vielversprechend, dass eine Testkampagne am Europäischen Forschungs- und Technologieprüfstand P8, ebenfalls am DLR-Institut für Raumfahrtantriebe, folgte. Sie sollte die Eignung der Laserzündung für den Einsatz in Brennkammern von bodengezündeten Triebwerken mit hohem Schub unter Beweis stellen.

Während der viermonatigen Testkampagne Ende 2014 wurden mehr als 1.500 Zündtests für die Treibstoffkombinationen Sauerstoff/Wasserstoff und Sauerstoff/Methan durchgeführt. An kryogenen Testständen des DLR war es die Kampagne mit den meisten Zündungen überhaupt. In jeweils dreißigminütigen Versuchsläufen wurde die Brennkammer sechzig Mal gezündet, auf ihren stationären Betriebspunkt gebracht und wieder heruntergefahren. Diesen Eignungstest bestand die Laserzündung mit Bravour.

Parallel zu diesen Grundlagenuntersuchungen des DLR bereitete das Unternehmen ASL seit 2012 die industrielle Anwendung laserbasierter Zündsysteme für Raketentriebwerke vor. Die Arbeiten von ASL konzentrierten sich auf die Integration eines solchen Zündsystems in ein existierendes Triebwerk und auf die Demonstration der Machbarkeit unter Betriebsbedingungen, wie sie bei einer Raumfahrtmission auftreten.



Blick durch die Düse der Brennkammer auf die Einspritzelemente des Injektorkopfs mit dem mehrere tausend Grad heißen Plasma, erzeugt durch den Laserpuls

Dabei sind diverse Systemanforderungen zu berücksichtigen: In einem realen Triebwerk muss sich das Zündsystem nahtlos in die Architektur der gesamten Stufe einfügen. Das betrifft unter anderem die Stromversorgung sowie die elektromagnetische Verträglichkeit des Systems mit anderen elektronischen Komponenten oder Baugruppen auf der Träger Rakete. Auch der maximal mögliche Bauraum sowie die Zugänglichkeit für Montage- und Wartungsarbeiten sind zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind Regularien einzuhalten, die in Europa für Raumfahrtkomponenten gelten. So müssen Bauteile vermieden werden, die durch internationale Gesetzgebung nur eingeschränkt verfügbar sind. Für das Zündsystem sind zudem Nachweise zur Zuverlässigkeit bei Vibrationen und Temperaturschwankungen zu führen, die bereits in der Entwurfsphase des Systems berücksichtigt werden müssen. Der Zündlaser muss thermisch hinreichend gut von der Umgebung entkoppelt werden und den verbleibenden Temperaturschwankungen und mechanischen Lasten standhalten. Gleichzeitig muss der optische Zugang zum Brennraum so ausgelegt werden, dass thermische Einflüsse die Zündeigenschaften nicht verschlechtern.



Luftbild eines Vulcain 2-Tests am Prüfstand P5 des DLR in Lampoldshausen

Die DLR-Wissenschaftler arbeiten weiter an Experimenten mit Brennkammern im kleinen Maßstab, um so den Schritt zur Anwendung im Originalmaßstab zu gehen. Dabei handelt es sich um ein Technologie-demonstrator-Triebwerk im Originalmaßstab eines Flugtriebwerks.



MIT DER NEUGIER ALS TREIBENDER KRAFT

Fünf Fragen an die Beitragsautorin Dr.-Ing. Chiara Manfletti

Wann war Ihnen klar, dass Sie sich beruflich mit Raketentriebwerken befassen wollen?

Es gab da so einen Moment, noch vor dem Beginn meines Studiums, im September 1997. In den Fernsehnachrichten kam ein Video über die Huygens-Sonde der ESA, es zeigte, wie sie in die Atmosphäre des Saturn-Mondes Titan eintauchte. In dem Moment wusste ich: Ich will so etwas machen – Raumtransporte ermöglichen! Ich ging zu meinen Eltern und sagte: „Ich ziehe nach London, ich werde Raumfahrt machen.“ So ging die Reise los.

Welche Fähigkeit oder Fertigkeit ist besonders wichtig, wenn man sich mit Raumfahrtantrieben befasst?

Die Fähigkeit, alles theoretisch Erlernte und praktisch Erfahrene genau dann einzusetzen, wenn es notwendig ist. Ich sehe es wie einen Beutel mit magischen Instrumenten, den man auf Exkursion bei sich trägt, und aus dem man sich je nach Anlass bedient und genau weiß, was man jetzt rausholen muss. Man sollte offen für Neues, vielleicht auch erst mal unmöglich Erscheinendes sein.

Welchen Beruf hätten Sie gern ergriffen, wenn Sie nicht Raumfahrtingenieurin geworden wären?

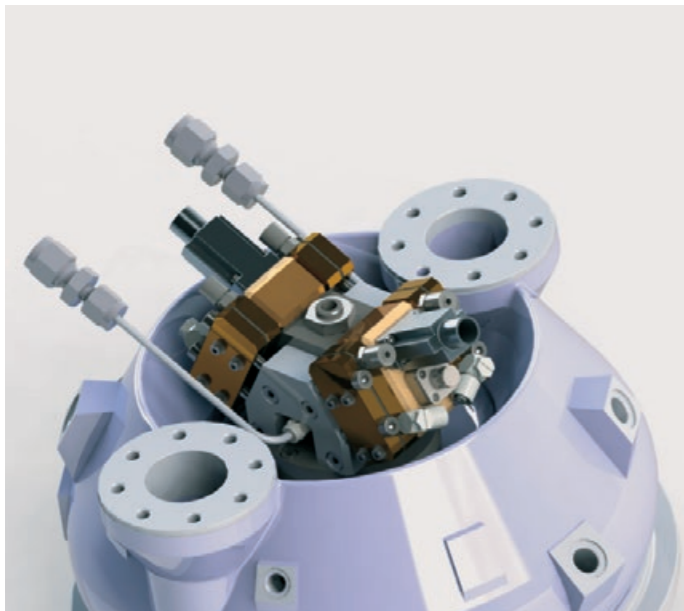
Ich bin ein neugieriges Wesen – für mich kam vieles infrage, von Meeresbiologin, Juristin, Journalistin, Tierärztin, Bauingenieurin, ... die Liste ist lang, ... ich wollte auch mal der italienischen Luftwaffe beitreten und Kampfpilotin werden.

Würden Sie selbst auch ins All fliegen?

Oh ja! – Wann geht es los?

Mögen Sie Silvester?

Absolut! Freunde, Familie, Sekt, Schnee, Linsen um Mitternacht (... italienischer Brauch) ... und natürlich die Silvesterraketen.

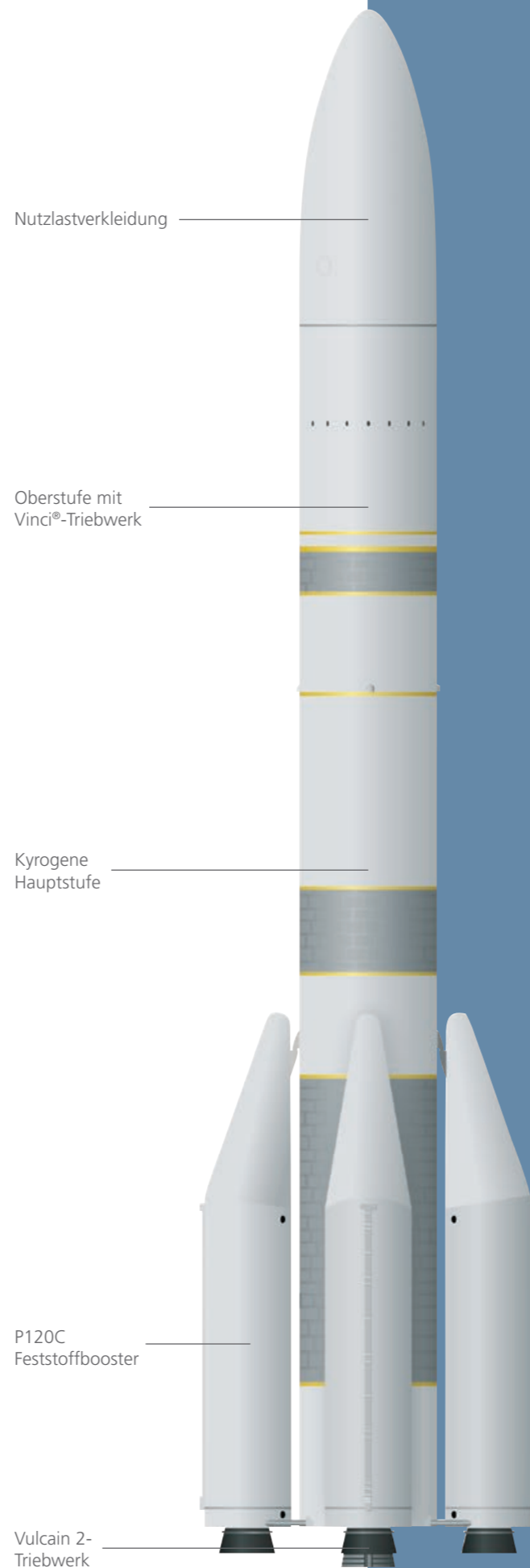


Laserzündsystem im Gasgenerator des Vulcain 2-Triebwerks

Dieser Demonstrator wird 2017 auf dem DLR-Prüfstand P3 in Lampoldshausen getestet werden. Die Funktionalität des dafür gebauten Laserzündsystems wurde im Herbst 2015 auf dem Forschungsprüfstand P8 im Rahmen einer eigenen Testkampagne nachgewiesen. Bei diesen Tests wurden zusätzlich die Ventile so angebracht und die Zündsequenz so realisiert, wie dies beim späteren Triebwerk durch die Interaktion der einzelnen Teilsysteme wie Turbopumpen, Ventile und Kühlsystem vorgegeben ist. Die erneute Zündung des Triebwerks nach einer ersten Brennphase und einer längeren Abschaltung, ähnlich wie es bei einem echten Raketenflug der Fall wäre, konnte ebenfalls demonstriert werden. Das System hat seine technische Reife nachgewiesen und den Weg frei gemacht, die Laserzündung auch für die Anwendung auf dem Vinci®-Oberstufentriebwerk der Ariane 6 unter den dort geltenden Randbedingungen zu prüfen.

Die Erfahrungen an den Prüfständen haben gezeigt, dass die Robustheit eines laserbasierten Zündsystems eine deutliche Verringerung der Betriebskosten für das Trägersystem ermöglicht. Laserzündsysteme für den Einsatz in Raketentriebwerken haben durch die Arbeiten der vergangenen Jahre einen Entwicklungsstand erreicht, der die Anwendung in Flüssigkeitsraketenantrieben erlaubt. Der erste Einsatz auf einer Trägerrakete Ariane 6 ist in greifbare Nähe gerückt. Mit Spannung erwarten die Forscher den Jungfernflug 2020 und hoffen, dass die Laserzündung dabei genauso funktioniert wie in den Tests und entscheidend zum Erfolg beiträgt.

Dr.-Ing. Chiara Manfletti forschte bis April 2016 in der Abteilung Raketenantriebe des DLR-Instituts für Raumfahrtantriebe und leitete die Gruppe Triebwerkstransienten. Dann wechselte sie zur ESA. **Gerhard Kroupa** ist Projektleiter im Bereich Hochenergie-Laser am Forschungszentrum Carinthian Tech Research AG. **Michael Börner** arbeitet am DLR-Institut für Raumfahrtantriebe als Projektleiter im Bereich Zündprozesse. **Sebastian Soller** ist Systemingenieur und Projektleiter im Bereich Forschung und Entwicklung bei Airbus Safran Launchers GmbH.



Vulcain 2-Triebwerk während eines Tests am DLR-Prüfstand P5



Vinci®-Triebwerk am DLR-Prüfstand P4.1

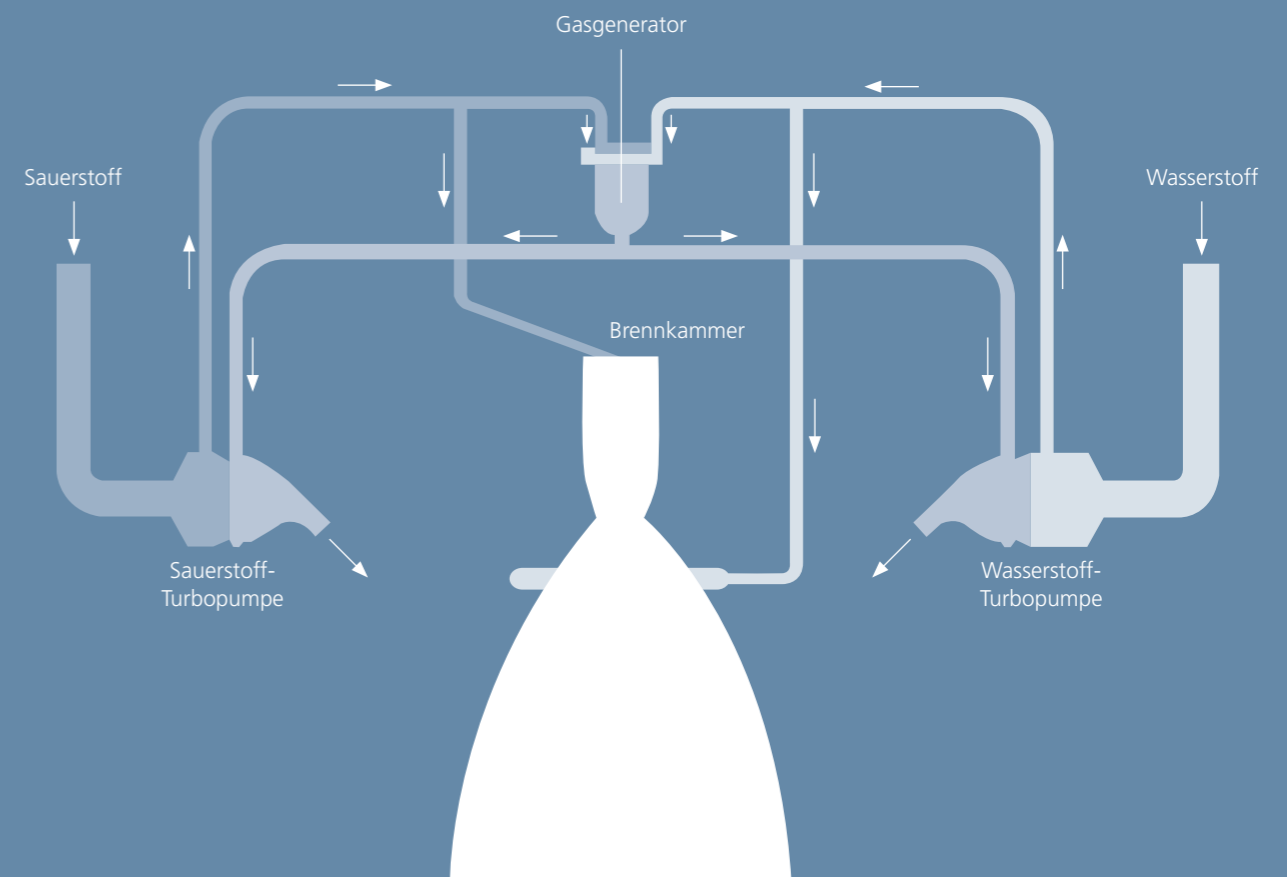
DIE TRIEBWERKE DER ARIANE 5 UND 6

Das Hauptstufentriebwerk Vulcain 2 der heutigen Ariane-5-Rakete arbeitet mit flüssigem Sauerstoff und flüssigem Wasserstoff. Sein Maximalschub von 1.359 Kilonewton (kN) würde ausreichen, um das Gewicht von 100 Kleinwagen zu tragen. Zusammen mit dem neuen Vinci®-Oberstufentriebwerk (180 kN Schub) wird die Ariane 6 auch Missionen fliegen können, bei denen die Wiederzündung eines Triebwerks notwendig ist, also wenn eine Nutzlast auf eine bestimmte Umlaufbahn um die Erde oder zu anderen Himmelskörpern gebracht werden muss, oder wenn mehrere Nutzlasten mit nur einer Trägerrakete auf unterschiedliche Bahnhöhen gebracht werden sollen. Auch kann die Raketenoberstufe nach der Trennung von der Nutzlast mit einem Triebwerk zur Bahnkorrektur zum Wiedereintritt in die Atmosphäre gebracht werden, um sie nicht als Weltraumschrott im Erdorbit zu hinterlassen.

Für eine einmalige Zündung gibt es unterschiedliche technische Lösungen: Um das Vulcain 2-Triebwerk hochzufahren, werden derzeit pyrotechnische Elemente eingesetzt. Sie funktionieren ähnlich wie Treibladungen von Silvesterraketen. Solche Elemente zünden sowohl die Brennkammer als auch den Gasgenerator von Vulcain 2. Vorteile pyrotechnischer Zünder sind deren einfache Bauweise, das geringe Gewicht und das kompakte Bauvolumen. Nachteilig ist zum einen, dass pyrotechnische Elemente nur einmal verwendet werden können und

deshalb eine Wiederzündung des Triebwerks ausschließen. Außerdem unterliegen sie der Sprengstoffverordnung, was den Zusammenbau der Raketen komplizierter macht und damit verlangsamt.

Eine Alternative zu den pyrotechnischen Zündern sind Gasfackelzünder. Diese nutzen Zündkerzen, um in einer kleineren, separaten Brennkammer den gasförmigen Oxidator (zum Beispiel Sauerstoff) und den gasförmigen Brennstoff (zum Beispiel Wasserstoff) zu zünden und zu verbrennen. Danach wird das entstehende Heißgas in die Hauptbrennkammer eingeleitet, um die dort eingespritzten Treibstoffe zu zünden. Der Vorteil der elektrischen Zünder: Das Triebwerk ist wiederzündbar. Nachteilig sind neben der kleinen Brennkammer die vielen zusätzlichen Komponenten wie Treibstoffleitungen, Steuerventile und das separate Treibstoffhochdruckversorgungssystem. Sie machen das Triebwerk schwerer und wegen der vielen Komponenten muss die Reihenfolge, in der Zünder und Treibstoffventile aktiviert werden, präzise abgestimmt sein. Wird jedoch ein Laserzünder direkt an der Hauptbrennkammer angebracht, entfallen diese komplexen Teilschritte und ebenso die schweren Bauteile. Das macht die Zündung durch einen Laser zu einer vielversprechenden Alternative. Deshalb wird sie aktuell nicht nur für das Vulcain 2-Triebwerk, sondern auch für das Vinci®-Triebwerk der Ariane 6 untersucht.





LILIENTHAL – DER MANN, DER ORDNUNG IN DIE AERODYNAMIK BRACHTE

Interview mit Professor Dr. Andreas Dillmann über 125 Jahre Menschenflug und den Nachbau des „Normalsegelapparates“

Zur Person

Prof. Dr. Andreas Dillmann (geb. 1961) studierte Maschinenbau an der Universität Karlsruhe. Anschließend war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Strömungsforschung in Göttingen und promovierte 1989 an der dortigen Universität. 1990 wechselte er zum Institut für Strömungsmechanik des DLR. 1995 habilitierte er sich in Göttingen und an der Universität Hannover mit einem Thema zur Hochgeschwindigkeitsaerodynamik. Von 1998 bis 2003 war er Professor für Theoretische Strömungsmechanik an der Technischen Universität Berlin. Seit 2003 ist er Direktor des DLR-Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik in Göttingen und Professor für Aerodynamik an der dortigen Universität.

Warum baut eine moderne Forschungseinrichtung wie das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt ein historisches Flugzeug nach?

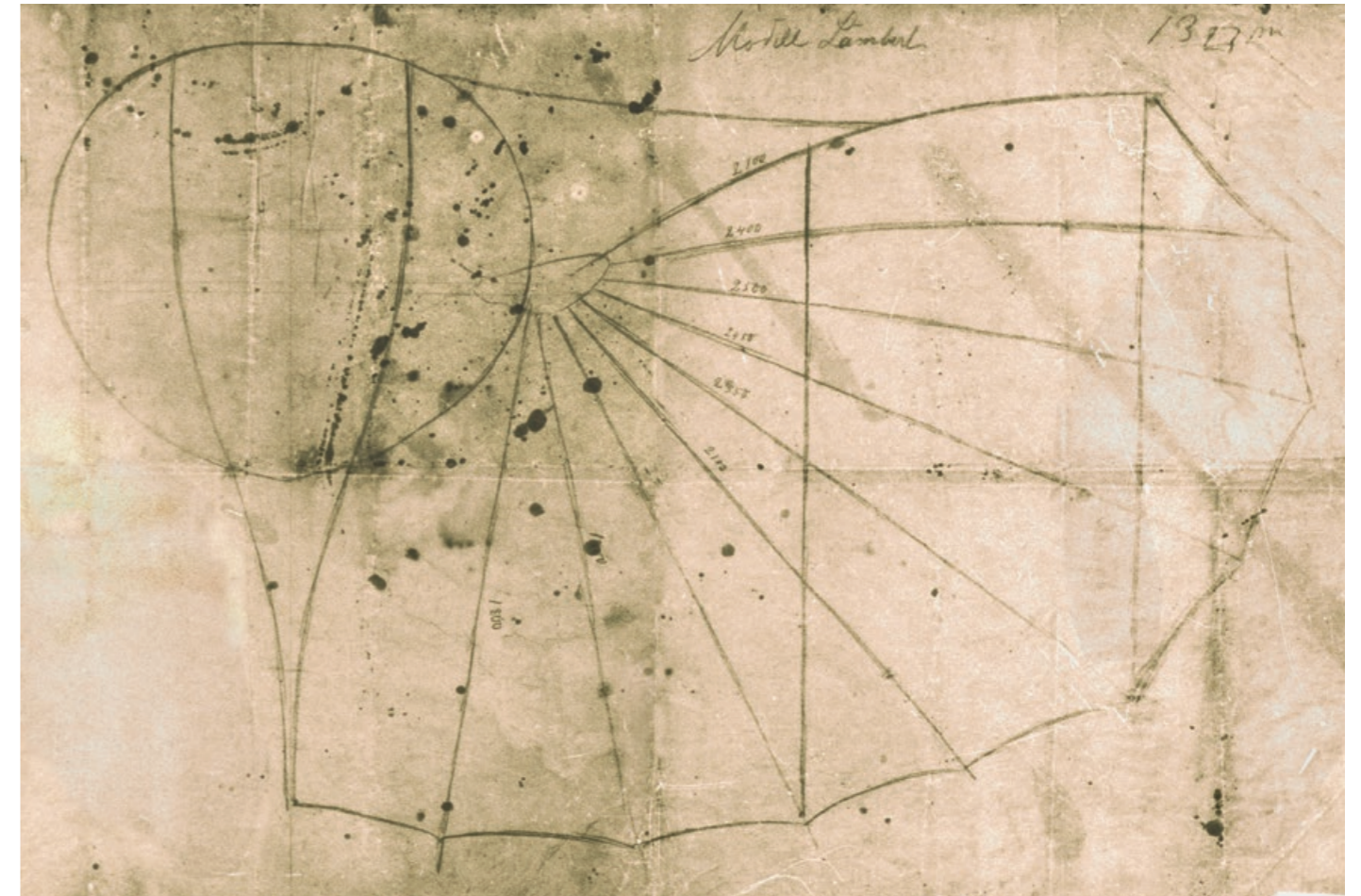
Wir wollen damit die Leistung von Otto Lilienthal würdigen. Lilienthal war der Erste, der erkannt hat, dass ein gewölbter Flügel mehr als doppelt so viel Auftrieb erzeugen kann wie ein ungewölbter. Das hat er auch in seinem Buch gut dokumentiert. Allerdings ist der Schritt vom Flügel zum Flugzeug nicht trivial. Dieses muss um alle drei Achsen stabil sein, um fliegen zu können. In der Forschung ist nach wie vor umstritten, ob Lilienthal ein solches eigenstabilen Flugzeug gebaut hat. Meiner Meinung nach ist es sehr wahrscheinlich, dass Lilienthal in der Tat der Erste war, dem dies gelungen ist. Mit unseren Untersuchungen können wir das herausfinden.

Was haben wir Otto Lilienthal als Pionier der Luftfahrt zu verdanken?

Lilienthal hat in wissenschaftlicher Hinsicht Ordnung in die Anfänge der Aerodynamik gebracht. Er erkannte, welche Kräfte man messen muss und wie man sie sinnvoll darstellt, um eine Umrechnung vom Modell auf die Großausführung zu ermöglichen. So hat er die Lilienthal-Polare erfunden – eine normierte grafische Darstellung, um den Auftrieb und den Luftwiderstand und damit die aerodynamischen Eigenschaften von Flügeln und Flugzeugen zu beurteilen. Das ist quasi die aerodynamische Visitenkarte eines Flugzeugs. Otto Lilienthal war der Erste, der wissenschaftliche Methoden zur Lösung des Flugproblems anwandte; davor gab es eigentlich nur Bastler. Die von ihnen gebauten Flugapparate konnten sich nur für kurze Zeit in die Luft erheben, sie machten nur Hüpfen. Lilienthal ist wirklich geflogen. Der Tag, an dem er seinen ersten Flug unternahm, gilt zu Recht als der Tag, an dem die Menschheit fliegen lernte.

Wie ist Otto Lilienthal bei der Konstruktion seines Flugzeugs vorgegangen?

Im Grunde ähnlich wie wir Luftfahrtforscher heute auch. Er hat systematisch Flügelprofile untersucht – unter dem Gesichtspunkt: Kann der Flügel bei geringstmöglichem Widerstand das Gewicht von Fluggerät und Pilot tragen? Er verwendete dimensionslose Beiwerte für Luftwiderstand und Auftrieb – dieselben Werte verwenden wir im Prinzip heute auch. Wahrscheinlich erkannte er auch bereits, dass ein Flugzeug ein starrer Körper ist, der neben dem Flügel auch ein Leitwerk braucht, um das Gewicht und die aerodynamischen Kräfte in jeder Fluglage im stabilen Gleichgewicht zu halten.



Skizze des „Normalsegelapparates“: Das erste in Serie gebaute Flugzeug der Welt, das jetzt vom DLR gemeinsam mit dem Otto-Lilienthal-Museum Anklam nachgebaut worden ist. Die Zeichnung war einst für einen Gleiter für Charles de Lambert angefertigt worden, einen der neun bekannten Käufer des Serienflugzeugs von Lilienthal.



Lilienthals Buch „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“ gilt heute als die wichtigste flugtechnische Veröffentlichung des 19. Jahrhunderts und eines der großen Bücher der Technikgeschichte

Bild: Archiv Otto-Lilienthal-Museum



1893 hatte Lilienthal auf der Maihöhe in Steglitz eine „Fliegestation“ errichtet, die als Absprungort und Gleiterschuppen diente. Die Aufnahme stammt von Ottomar Anschütz, einem Pionier der Fototechnik.



Otto Lilienthal hat eine ganze Reihe verschiedener Fluggeräte entworfen und gebaut. Warum wurde für den Nachbau gerade der sogenannte „Normalsegelapparat“ ausgewählt?

■ Dafür gibt es mehrere Gründe. Zum einen ist der „Normalsegelapparat“ das erste in Serie gebaute Flugzeug der Welt. Neun Exemplare hat Lilienthal davon verkauft und damit auch erstmals ein kommerziell erfolgreiches Flugzeug gebaut. Es ist auch das populärste Fluggerät von Lilienthal, von dem es viele Fotografien gibt, und das auch sehr gut dokumentiert ist. Der „Normalsegelapparat“ war es aber auch, mit dem Lilienthal abgestürzt und dabei ums Leben gekommen ist. Wir hoffen, auch etwas über die Unfallursache herauszufinden.

Woher wissen Sie denn, wie Lilienthals Flugzeug genau ausgesehen hat?

■ Lilienthal hat seine Originalbaupläne hinterlassen, und es gibt zahlreiche hervorragende Fotos, die viele Details zeigen. Das Otto-Lilienthal-Museum in Anklam besitzt die Schablonen für die Flügelprofile – ein besonders wichtiger Aspekt, der eine genaue Rekonstruktion ermöglicht. Das, was wir aus seinen Unterlagen nicht genau ersehen konnten – beispielsweise die Luftdurchlässigkeit des Bespannstoffs oder ob es eine Imprägnierung gab –, haben wir eigens von einem Fachinstitut an erhaltenen Original-Stoffproben untersuchen lassen. Bei der Frage der Holzkonstruktion verlassen wir uns auf die langjährige Expertise des Otto-Lilienthal-Museums in Anklam. Neben der möglichst originalgetreuen Flügel- und Leitwerksgeometrie ist die Rekonstruktion der Bespannung ganz besonders wichtig. Wenn die Webdichte nicht mit dem Originalstoff übereinstimmt, ist die Aerodynamik anders. Da der Originalbespannstoff nicht mehr erhältlich ist, lassen wir ihn auf der Grundlage unserer Untersuchungsergebnisse von einer Spezialweberei nachweben.



Fluggeräte von Lilienthal sind in der Vergangenheit bereits mehrfach nachgebaut worden. Was ist das Besondere bei dem Nachbau, den das DLR jetzt angeht?

■ Oft handelte es sich mehr um Dekorationsstücke als um wirkliche Nachbauten. Es gab auch einige, die versucht haben, damit zu fliegen. Allerdings hat das meist nicht funktioniert – da wurde anscheinend nicht richtig nachgebaut. Zum Beispiel wurden nicht die Original-Schablonen Lilienthals verwendet, wie wir es tun. Uns geht es darum, einen flugfähigen Apparat zu bauen, der dieselben Eigenschaften hat, die Lilienthals Gleiter damals hatte. Und dass er flugfähig ist, können wir dann durch die Versuche im Windkanal nachweisen.

Warum weisen Sie das nicht durch einen tatsächlichen Flugversuch nach?

■ Das wäre kein wissenschaftlicher Versuch. Die Bedingungen wären dabei ja immer unterschiedlich und nicht reproduzierbar. Wir wollen wissen, wie weit er mit seiner Steuerungsmethode war – welche Böen konnte er aussteuern? Außerdem interessieren uns aerodynamische Leistungsparameter wie die Gleitzahl: Wie weit konnte er von einer gegebenen Absprunghöhe tatsächlich gleiten? Die Angaben in der Literatur sind hier durchaus widersprüchlich. Bisher wurde nur einmal

ein solcher wissenschaftlicher Versuch unternommen. In den Neunzigerjahren wurde ein Nachbau auf einen Messwagen des Deutschen Hängegleiterverbands DHV gepackt, um in einem Fahrversuch die Längsstabilität des Gleiters nachzuweisen. Dabei ist der Gleiter allerdings zerbrochen. Außerdem dürfen wir den Sicherheitsaspekt nicht vergessen. Der einzige Mensch, der den Normalsegelapparat häufig geflogen ist, ist schließlich damit tödlich verunglückt. Vielleicht stellen wir bei unseren Untersuchungen fest, dass Lilienthals Fluggerät doch nicht stabil war und niemals eine Luftfahrtzulassung hätte erhalten können. Schließlich wollen wir kein Leben riskieren.

Welche Untersuchungen sollen mit dem Nachbau durchgeführt werden?

■ Es sind ähnliche Messungen, wie wir sie für ein modernes Verkehrsflugzeug auch machen würden. Im Zentrum stehen Versuche in einem der größten Windkanäle Europas, dem Deutsch-Niederländischen Windkanal LLF in Holland. Der Gleiter mit seinen sechs Metern Spannweite passt gerade so hinein. Dort wird der Nachbau auf einer Sechskomponenten-Waage befestigt. Durch Messung der drei Kräfte und der drei Drehmomente lassen sich mit einer solchen Waage im Windkanal alle Wirkungen der Luftströmung auf das Fluggerät messen. Wir erhalten so Erkenntnisse über alle Flugeigenschaften und können dann den Lilienthalgleiter quasi im Computer fliegen lassen. Ein Problem für den modernen Windkanal wird die langsame Geschwindigkeit sein, mit der wir messen müssen. Nur ein wenig zu schnell, und die fragile Konstruktion Lilienthals könnte zerbrechen wie beim Versuch mit dem Messwagen.



Welche Erkenntnisse lassen sich aus den Untersuchungen gewinnen?

■ Wenn wir die kompletten Flugeigenschaften des Normalsegelapparates kennen, können wir viele Fragen beantworten. Wie weit konnte Lilienthal aus einer bestimmten Absprunghöhe fliegen? Stimmt es, dass er immer mit einem hohen Anstellwinkel fliegen musste, was wegen der Gefahr eines Strömungsabrisses höchst gefährlich war? Stimmt die vermutete Absturzursache durch eine sogenannte Sonnenbö, eine thermische Ablösung, oder kommen andere Ursachen infrage? Und nicht zuletzt wollen wir die historische Frage klären: Wie gut war Lilienthal als Flugzeugbauer wirklich?

Otto Lilienthal ist für Aerodynamik-Forscher auf der ganzen Welt ein Vorbild. Sie selbst sind als Wissenschaftler wie auch als begeisterter Flieger quasi ein Erbe Lilienthals. Welche Bedeutung hat das Projekt für Sie persönlich?

■ Es ist auf jeden Fall großartig. Wir wandeln damit auf Lilienthals Spuren. Es ist eines der spannendsten Projekte meiner beruflichen Laufbahn. Manche meiner Kollegen beneiden mich darum. Zudem fühle ich mich auch als deutscher Luftfahrtforscher verpflichtet, Lilienthals Leistung zu würdigen, so wie meine amerikanischen Kollegen im Jahre 2003 den Flugapparat der Gebrüder Wright im Windkanal untersucht haben. Damals kam übrigens heraus, dass der Wright-Flyer bei jeder Fluggeschwindigkeit instabil war. Möglicherweise war in dieser Hinsicht Lilienthal als Vorläufer und Inspirator für die Wright-Brüder bereits weiter als seine Nachfolger.

Das Interview führte Jens Wucherpfennig.

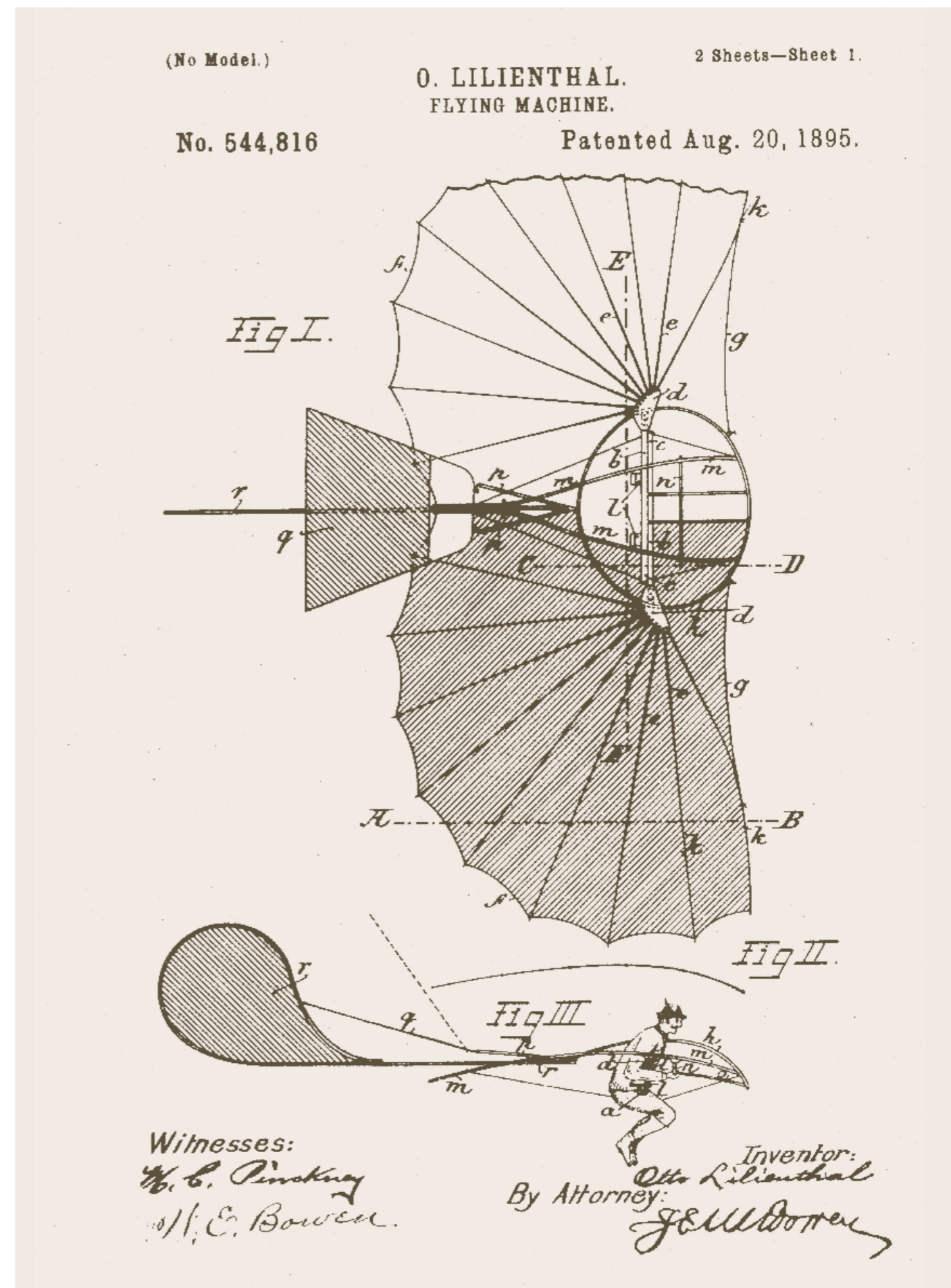


Abbildung aus dem US-Patent Otto Lilienthals vom 20. August 1895 für eine „Flying-Machine“

EXKLUSIV, WANDELBAR UND IMPOSANT

In den letzten 100 Jahren sind Windkanäle zum unverzichtbaren Bestandteil der Aerodynamik-Forschung geworden. Aber ihre Bedeutung geht weit über die Intention ihrer ursprünglichen Erbauer hinaus. Immer wieder wurden diese Großforschungsanlagen an neue Herausforderungen angepasst. Und mit ihnen entstand eine ganz eigene Art der modernen Architektur. Der zehnte und letzte Teil der Windkanalserie fasst die interessantesten Fakten noch einmal zusammen.

Teil 10 der Serie „Die Windmaschinen“

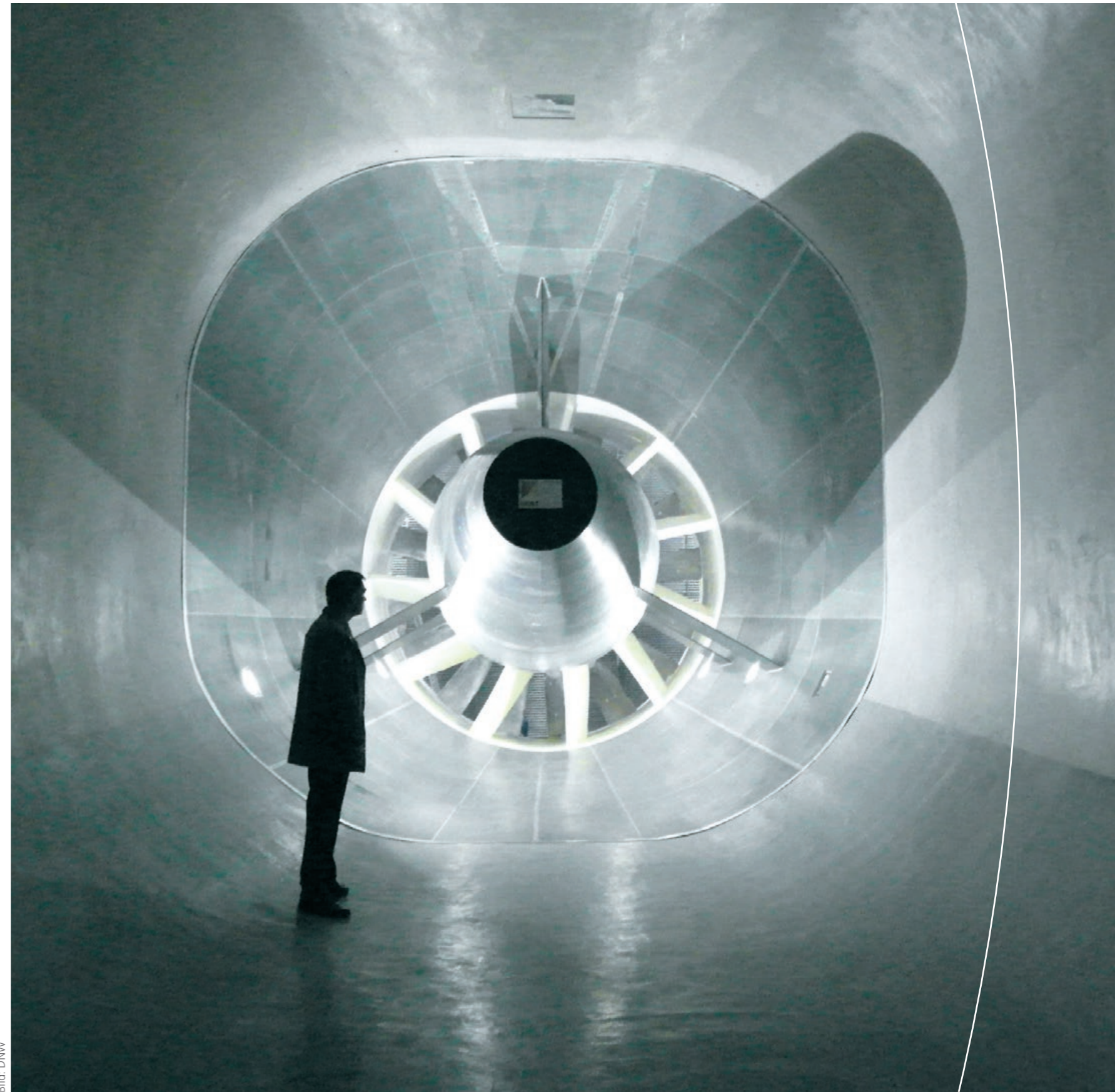
Von Jens Wucherpfennig

Als die ersten Windkanäle im 19. und zu Beginn des 20. Jahrhunderts gebaut wurden, erhofften sich die Konstrukteure – egal ob der Franzose Gustave Eiffel oder der in Göttingen wirkende Ludwig Prandtl – ein Hilfsmittel zum Untersuchen der ersten Flugmaschinen, seien es Luftschiffe oder Flugzeuge. Doch es dauerte nicht lange, bis die einmaligen Möglichkeiten, die die „Windmaschinen“ boten, auch für andere Zwecke genutzt wurden. Alles, was sich entweder selbst schnell durch die Luft bewegt oder aber von der Luft umströmt wird, kommt für Windkanaltests infrage. So kam es, dass bald erste Eisenbahnmodelle untersucht wurden. Damals wollte man herausfinden, wie verhindert werden kann, dass der Rauch der Lokomotive ins Führerhaus dringt. Untersuchungen im Windkanal lieferten die Antwort und damit bald auch die Lösung in Form der Beetzschen Rauchschilde, die den Dampf umleiten. Andere Fragestellungen waren: Was ist die optimale Haltung von Skispringern, um möglichst große Weiten zu erzielen? Untersuchungen mit einer menschenähnlichen Puppe im Windkanal zeigten, dass eine ruhige Haltung mit am Körper anliegenden Armen viele Vorteile bietet – die Geburtsstunde des Parallel-Stils im Skispringen.

Außergewöhnliche Testobjekte

Immer wieder zeigte sich, dass die Frage, was in einem Windkanal untersucht werden soll, ebenso vom Spleen des einzelnen Forschers wie vom historischen und gesellschaftlichen Umfeld abhängig war. So wurden während der Zeiten des Ersten und Zweiten Weltkriegs die Windkanäle nicht nur in Deutschland fast ausschließlich zur Erforschung von Kampfflugzeugen oder der ersten Raketen verwendet. Zudem bewiesen Untersuchungen an Artillerieprojektilen im zehn mal zehn Zentimeter großen Überschallkanal in Aachen, dass eine erhöhte Reichweite der Geschütze nicht nur eine Sache des verwendeten Rohrs oder Zündstoffs war, sondern bis zu 50 Prozent von den aerodynamischen Eigenschaften des Geschosses abhing. Kriegszeiten waren auch Hoch-Zeiten für den Bau neuer Windkanäle. Wie die gesamte Wirtschaft, so wurde auch die Forschung in den Dienst des „Totalen Kriegs“ gestellt.

Bild: DNW



Im Niedergeschwindigkeitswindkanal des DLR Braunschweig



Unsichtbares sichtbar gemacht: Windkanäle zeigen, wie Objekte umströmt werden. Das Bild aus dem DLR_School_Lab Göttingen veranschaulicht das.

Als nach dem Versailler Vertrag von 1919 dem Deutschen Reich Luftfahrtforschung verboten worden war, mussten sich die Forscher teils andere Aufgaben suchen. So gelangte das Wissen aus der Luftfahrt in den Automobilbau und führte dort zum Boom der sogenannten Stromlinienfahrzeuge. Die Aerodynamiker halfen, eine ganze Palette von Fahrzeugen zu kreieren, deren Formgebung sich nach aerodynamischen Gesichtspunkten richtete. Beispiele wie der Schlörwagen der Göttinger Aerodynamischen Versuchsanstalt, quasi ein „Flügel auf Rädern“, der Rumppler Tropfen-Wagen oder der Mercedes-Benz T 80 üben bis heute eine Faszination auf viele Betrachter aus.

Auf der anderen Seite war es wohl nur der Idee des Schiffingenieurs Anton Flettner zu verdanken, dass aus einer theoretischen Überlegung Prandtl's für einen drehenden Flugzeugflügel der sogenannte Flettner-Rotor wurde: Ein drehender Zylinder auf Deck ist in der Lage, ähnlich wie ein Segel aus der Kraft des Windes ein Schiff anzutreiben. In jüngerer Zeit wurde diese Idee im „E-Ship 1“ umgesetzt.

Kostspielige Forschungsinstrumente

Der Bau und Unterhalt von Windkanälen war von Anfang an eine kostspielige Sache. Je größer die „Windmaschinen“ wurden, und je mehr Hightech in ihnen steckte, desto teurer wurden sie. Kein Wunder, dass die größten europäischen Windkanäle heute von einem internationalen Verbund betrieben werden. Das trifft auf den Europäischen Transsonischen Windkanal in Köln ebenso zu wie auf die Deutsch-Niederländischen Windkanäle, unter deren Dach gleich eine ganze Reihe großer Windkanäle in Holland sowie in den DLR-Standorten Köln, Göttingen und Braunschweig vereint sind.

Windkanäle auf der ganzen Welt erwiesen sich als erstaunlich langlebig. Obwohl sie doch in einem Bereich eingesetzt werden, der zur Spitze der Hochtechnologie zählt, und für den die neuesten Super-Computer gerade gut genug sind, sind viele Windkanäle seit Jahrzehnten im Einsatz. Natürlich spielt dabei der hohe Preis für den Neubau eines großen Windkanals eine Rolle. Hinzu kommt jedoch, dass sich Windkanäle als sehr flexibel zeigten und immer wieder mit neuester Messtechnik modernisieren ließen. Manchmal gehen diese Modernisierungen aber auch weit darüber hinaus und greifen massiv in die bauliche Substanz ein, wie beim Transsonischen Windkanal Göttingen, der nach mehreren solcher „Faceliftings“ kaum noch Ähnlichkeit mit dem Ursprungskanal hat.

Nutzer von Windkanälen schätzen überdies die Erfahrungen und die Vergleichbarkeit der Messergebnisse in einem bewährten Windkanal. Die Windkanal-Experten kennen ihr Untersuchungsinstrument und wissen neue Daten richtig einzuschätzen. Jeder Neubau benötigt hingegen

zunächst eine gewisse Einarbeitungszeit, in der die Betreiber seine Stärken und auch Schwächen kennenlernen. Trotz dieser Argumente sagt die Zahl der Neubauten von Windkanälen etwas über die Forschungsprioritäten einer Gesellschaft aus. Während in Europa und Nordamerika seit über 25 Jahren kein neuer richtig großer Windkanal gebaut worden ist, dafür aber viele Windkanäle für die Automobilindustrie entstanden, schießen in China solche Anlagen wie Pilze aus dem Boden. Ein Beleg für die Ambitionen einer aufstrebenden Luftfahrtnation.

Dafür ist in der westlichen Welt ausgehend von den Vereinigten Staaten eine neue Art der Nutzung von Windkanälen populär geworden: Für die Modersportart des „Skydiving“ sind an vielen Orten Windkanäle gebaut worden, die nichts mehr mit Forschung zu tun haben. Hier geht es einfach um die Möglichkeit, das Prinzip des Windkanals für die Erfüllung des Menschentraums einzusetzen, ohne Hilfsmittel im Luftstrom zu fliegen.

Begehrte Beute

Während der Neubau von Windkanälen ein Anzeichen für große Ambitionen in der Luftfahrt ist, bedeutete auf der anderen Seite der Verlust von Windkanälen für das betreffende Land einen Rückschlag in der Fähigkeit, in der modernen Luftfahrt mitzumischen. Prominentestes



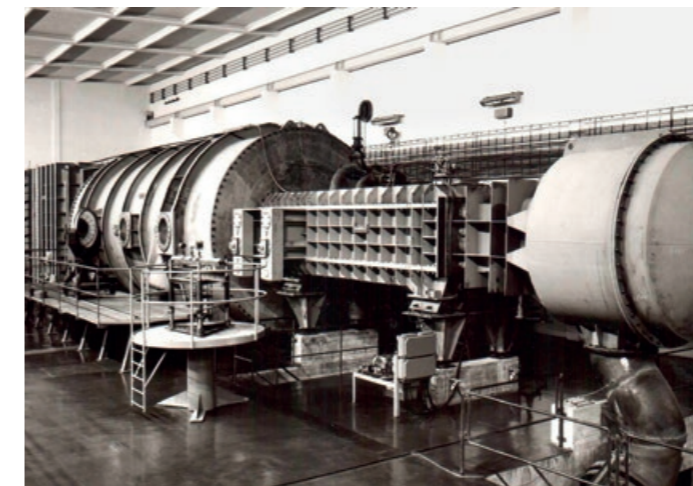
Gesteuert werden Windkanäle aus teils futuristisch anmutenden Kommandozentralen, wie hier im Großen Niedergeschwindigkeitswindkanal in den Niederlanden

Beispiel dafür ist Deutschland, dem nach dem Zweiten Weltkrieg nicht nur Luftfahrt, sondern auch Luftfahrtforschung jahrelang verboten war. Sichtbares Zeichen dafür war die Demontage fast sämtlicher Windkanäle auf dem Gebiet des ehemaligen Deutschen Reichs. Nicht alle Windkanäle wurden jedoch zerstört. Viele Anlagen wurden von den alliierten Siegermächten in Deutschland ab- und in ihren Heimatländern wieder aufgebaut. So gelangte beispielsweise ein Windkanal für Hochgeschwindigkeitsforschung, der von dem Team um Wernher von Braun für die Untersuchung neuer Raketen entwickelt worden war, in die Vereinigten Staaten. Ein Braunschweiger Windkanal leistete nach dem Krieg im Vereinigten Königreich seine Dienste, und die Franzosen demontierten in den Alpen ein ganzes Ensemble von noch nicht einmal ganz fertiggestellten Hochleistungswindkanälen, um sie in Frankreich in Betrieb zu nehmen. Diese französischen Windkanäle deutschen Ursprungs sind übrigens bis heute noch im Einsatz. Der ehemalige Braunschweiger Windkanal wurde inzwischen stillgelegt, ein Teil, die sogenannte Kompressorschnecke, gelangte wieder nach Deutschland zurück und steht heute als Denkmal auf dem DLR-Gelände in Braunschweig. Auch die Sowjetunion nahm mehrere erbeutete deutsche Windkanäle nach dem Zweiten Weltkrieg für eigene Zwecke in Betrieb.

Extravagante Bauten

Völlig abseits ihrer Nutzung für die Forschung und für kommerzielle Interessen sind Windkanäle Vertreter einer ganz eigenen Architekturform geworden. Egal ob als hundert Meter lange dicke Röhren, die sogenannten Rohrwindkanäle, oder als Windkanäle Göttinger Bauart, die wie der Buchstabe O geformt sind, – die Windmaschinen haben ihren eigenen Stil. Nicht nur die äußere Form, sondern auch die innere Gestaltung hat dabei eine besondere Ästhetik; bei den großen Exemplaren beispielsweise sind es riesige Propeller inmitten eines gewölbten Raums. Der große Windkanal in Berlin-Adlershof und der dortige eiförmige Trudelwindkanal stehen nicht nur als Relikte der Forschung, sondern als Zeugen einer speziellen Art von Architektur unter Denkmalschutz. Wer diese ungewöhnlichen Bauten gesehen oder besser noch, einmal in ihnen gestanden hat, wird diesen ganz eigenen Eindruck nie vergessen. So ist es auch kein Wunder, dass gerade dieses Ensemble in Berlin-Adlershof immer wieder einmal als Ort für Filmproduktionen dient. Am eindrucksvollsten hat wohl der Hollywood-Blockbuster „Aeon Flux“ die Windkanäle in Szene gesetzt, ein Science-Fiction-Film, für den die Bauten aus den Dreißigerjahren die perfekte Kulisse für eine utopische, fremdartige Welt der Zukunft abgaben.

Und dies scheint tatsächlich eine treffende Beschreibung von Windkanälen zu sein: ungewöhnliche, ja fremdartige Bauten, oft aus einer vergangenen Zeit stammend, in denen doch hochmoderne Forschung stattfindet, womit sie quasi Brücken zwischen Vergangenheit und Zukunft schlagen.



Windkanäle sind oft erstaunlich lange Zeit im Einsatz. Immer wieder müssen sie modernisiert werden, wie der Transsonische Windkanal in Göttingen. Er wurde seit seinem Bau 1963 mehrfach umgerüstet.

DIE WINDKANALSERIE IM ÜBERBLICK

- 1 **Die Windmaschinen**
Sinn und Zweck. Bedeutung. Typen. – Ein Überblick
DLR-Magazin 141, März 2014
- 2 **TWG – Transsonischer Windkanal Göttingen**
Wandelbarer Gigant – das Überschall-Labor in Göttingen
DLR-Magazin 142, Juni 2014
- 3 **Ungewöhnliche Experimente**
Motten, Menschen, Monumente – Vielfalt von Fragestellungen
DLR-Magazin 143, September 2014
- 4 **KKK – Kryo-Kanal Köln**
In eisigem Wind – altbewährte und moderne Technik
DLR-Magazin 144, Dezember 2014
- 5 **Windkanäle der Superlative**
Ballons für den Mars und Autos auf Eis – der kälteste, der größte, der verrückteste
DLR-Magazin 145, April 2015
- 6 **Windkanal-Know-how für den Freizeitbereich**
Surfen auf dem Luftstrom – Bodyflying
DLR-Magazin 146, Juni 2015
- 7 **ETW – Europäischer Transschall Windkanal**
Europas Multitalent steht in Köln – kalt und unter Druck
DLR-Magazin 147, September 2015
- 8 **Die Erbauer**
Kathedralen der Aerodynamik – Königsdisziplin für die Architekten
DLR-Magazin 148, November 2015
- 9 **LLF – Großer Niedergeschwindigkeitswindkanal – Large Low-speed facility**
318 Meter für exklusive Strömungstests – der Gigant von Marknesse
DLR-Magazin 149, März 2016
- 10 **Monumente der Forschung**
„Ode an den Windkanal“ – Teil 10 und Schluss der Magazinserie
DLR-Magazin 150, Juni 2016



Was man so zum Fliegen braucht: Der minimalistische Einsitzer „Himmelslaus“ („Pou-du-Ciel“) basiert auf einem französischen Entwurf und begnügt sich mit einem schmalbrüstigen 1.300-Kubikzentimeter-Motorradmotor – genug für den sonntäglichen Schönwetter-Aus-„Flug“

Nur Fliegen ist schöner, frohlockte unser ehemaliger Luftfahrtredakteur, als er aus dem Urlaub in Dänemark zurückkam und gleich zwei Luftfahrtmuseen besucht hatte. Deren Außenansichten könnten unterschiedlicher nicht sein: nüchterner Hangar einerseits, romantische Schlossanlage andererseits. Auch die Buchrezensionen stellen unterschiedliche Konzepte gegenüber: Dinge mit alltagsüblichen Worten auf schlichte Weise erklären oder Wissenschaft klar strukturiert darbieten. – Wie hätten Sie es gern? Im Feuilleton-Teil des DLR-Magazins bekommen Sie eine Entscheidungshilfe.

BEGEGNUNGEN MIT DER HIMMELSLAUS

Luftfahrtshistorie in Dänemark: seltene Flugzeug-Oldies in Jütland und Technikvielfalt auf Fünen

Von Hans-Leo Richter



Das „Dänemark Flymuseum“ in Skjern

Kleine Ausstellungen überraschen zuweilen ihre Besucher mit feinen, oftmals sehr liebevoll zusammengesetzten Exponaten. Auch wenn der Reiseführer sie nicht ausweist und sie selbst im Internet nicht auf den ersten Klick zu finden sind. Zwei dieser nicht sehr bekannten luftfahrtshistorischen Einrichtungen sind in Dänemark zu entdecken: die „Dansk Veteranflysamling“ am Stauning Lufthavn, nördlich von Esbjerg an der Westküste Jütlands sowie eine ebenfalls sehr sehenswerte Sammlung historischer Flugzeuge und Fahrzeuge in Egeskov Slot, einem herrlichen alten Wasserschloss aus dem 16. Jahrhundert im Süden der Insel Fünen.

Verstecktes Kleinod in Skjern

Die Dansk Veteranflysamling in Skjern ist gar nicht so leicht zu finden. Das Museum im mittleren Westen Dänemarks liegt fast versteckt am kleinen Flugplatz Stauning, etwas abseits der Durchgangsstraße Skjern-Ringkøbing. Es wurde 1975 von dänischen Flugenthusiasten gegründet und widmete sich zunächst nahezu ausschließlich den dänischen Flugzeugen der „KZ“-Reihe. Das Kürzel besagt lediglich, dass diese Luftfahrzeuge von den beiden Konstrukteuren Viggo Kramme und Karl Günther Zeuthen stammen. Die komplette Produktpalette, elf Typen, die zwischen 1937 und 1953 entstanden, sind in der Veteranensammlung vertreten. Sämtliche Luftfahrzeuge wurden bei der Skandinavisk Aero Industrie (SAI) gebaut.

Kurios mutet die kleine „Himmelslaus“ an, ein Leichtflugzeug mit einem Leergewicht von gerade mal 102 Kilogramm. Das Interessante an diesem Vögelchen ist die Tandembauweise der beiden hintereinander und schräg übereinander angeordneten Tragflügel, wovon einer der beiden zugleich auch als Höhenruder dient. Angetrieben wurde das leichte Fluggerät von einem 1.300-Kubikzentimeter-Zweiradmotörchen, welches den Apparat auf maximal 100 Stundenkilometer zu „beschleunigen“ vermochte.



Schloss Egeskov in Kvaerndrup

Viggo Kramme, späterer Mitkonstrukteur dieser Kleinflugzeugtypen, machte sich seinerzeit im Auftrag einer Kopenhagener Tageszeitung an den Nachbau einer solchen, ursprünglich aus Frankreich stammenden „Himmelslaus“. Sein Kollege Zeuthen meinte dann allerdings, dass er doch vielleicht lieber mal ein „richtiges“ Flugzeug bauen sollte. Das war die Geburtsstunde der einsitzigen „KZ I“. Die weiteren Typen der beiden Konstrukteure sind durchweg leichte Eindecker für unterschiedlichste Aufgaben. Ein wenig aus dem Rahmen fällt dabei die bereits sehr fortschrittlich wirkende „KZ IV“, ein zweimotoriger Tiefdecker mit doppeltem Seitenleitwerk und – aerodynamisch sehr wirkungsvoll – nahezu vollständig verkleidetem Hauptfahrwerk. Dieses Flugzeug wurde hauptsächlich als Sanitätsflugzeug, daneben aber auch als Kurierflugzeug eingesetzt. Es bot neben der Besatzung zwei Patiententragen und zwei Begleitern Platz.

Der nächste Hangar präsentiert überwiegend militärisches Fluggerät. Diverse Sikorsky-Hubschrauber machen dabei einen ebenso hervorragend restaurierten Eindruck wie der in solchen Sammlungen inzwischen fast selbstverständliche Hawker Hunter aus den frühen Sechzigerjahren. Sehenswert sind hier der – vor allem in dieser Halle riesig wirkende – zweimotorige amerikanische Seeaufklärer Consolidated Catalina. Beeindruckend aber auch die ebenfalls zweimotorige Douglas C 47 „Skytrain“, die militärische Variante der legendären DC 3. Darüber hinaus informieren unter anderem Flugabwehrgeschütze, Radargeräte und Sanitätsfahrzeuge über ihre



Blick in einen der Stauning-Hangars: Hinter diversen Motoren erkennt man einen Enstrom F 28a-Leichtubschrauber sowie den modernen Business-Jet Aerospatiale SN 601 Corvette.



Paradestück der großartigen Replica-Sammlung im Flymuseum ist der Nachbau einer dänischen Ellehammer von 1906



Ein Blick auf historische Küchengerätschaften im Schloss Egeskov: mit ein bisschen Farbe keine Spur von Tristesse

speziellen Aufgaben. Ein ausgesprochener Exot hingegen ist die Havilland Dove, ein kleines zweimotoriges Zubringerflugzeug für maximal neun Passagiere. Das ausgestellte Muster wurde in den Siebzigerjahren noch von der kleinen dänischen Fluggesellschaft Cimber Air auf innerdänischen Strecken eingesetzt.

Im dritten Hangar schließlich bestaunt der Besucher weitere Schätze, darunter diverse Piper-Typen oder auch einen wunderschönen Tiger Moth-Doppeldecker. Auch die Segelfliegerei ist würdig vertreten. Alles, was in der „Sperrholz-Ära“ Rang und Namen hatte, ist hier zu sehen. So darf der „Doppelraab“ ebenso wenig fehlen wie das „Grunau Baby“ und diverse Scheibe-Typen – allesamt hervorragende Segelflugzeuge aus einer Zeit, da noch niemand an Composite-Flieger mit damals noch unvorstellbaren Gleitzahlen von 40 und mehr zu denken wagte.

Einen Open-Air-Ausstellungsbereich sucht man allerdings vergebens, sämtliche Exponate sind in den drei Hangars untergebracht, bei den oftmals gewiss nicht zimperlichen skandinavischen Wintern wohl auch die einzig richtige Entscheidung. Eine gewisse Anzahl der historischen Flugzeuge ist tatsächlich flugfähig, einmal jährlich können Oldie-Fans diese herrlichen Exponate im Rahmen einer Flugshow live bewundern.

Technik im Wasserschloss Egeskov

Die zweite Sammlung, im Süden der Insel Fünen, keine 30 Kilometer südlich von Odense, weist zwei Besonderheiten auf. Zum einen stehen die ausgestellten Luftfahrzeuge zumindest zahlenmäßig hier nicht im Mittelpunkt. Zum zweiten befindet sich diese Sammlung nicht etwa in nüchternen Hangars oder Ausstellungshallen, sondern in einem wunderschönen Wasserschloss. Allein schon aufgrund seiner großartigen landschaftlichen Lage ist das Schloss Egeskov unbedingt einen Tagesausflug wert. Vom Ufer des Wassergrabens bieten sich herrliche Ausichten auf diesen prächtigen Barockbau mit Giebeln, Türmchen und Zinnen. Das komplette Gemäuer ruht auf hunderten von nach wie vor stabilen Holzpfählen, wofür seinerzeit wohl ein ganzer Eichenwald („Egeskov“) dran glauben musste.

Vor dem Museumstrakt, in der früheren Remise des Schlosses, weist ein Saab Draken, das immer noch recht modern wirkende schwedische Kampfflugzeug mit den charakteristischen Delta-Flügeln, auf die Oldtimersammlung hin, die hier seit 1967 entstand. Im Innern empfängt den Besucher eine sehr hübsche Sammlung alter Flugzeuge und herrlicher Personenwagen aus den vergangenen Jahrzehnten. Über diesen bodengebundenen Landfahrzeugen schweben die Luftfahrzeuge souverän unter der Hallendecke. Dazu gehören eine schon von

der Stauning-Sammlung bekannte „Himmelslaus“, der deutsche Minimal-Hubschrauber Focke Achgelis 330 aus den Vierzigerjahren und mit dem General Aircraft ST 25 Monospan ein prächtiges Exemplar aus dem Vereinigten Königreich. Ein immer wieder schön anzusehender de Havilland Tiger Moth-Doppeldecker darf schließlich ebenso wenig fehlen wie ein Alouette-Hubschrauber. Und selbst ein Lockheed F 104 Starfighter, seinerzeit ebenso berühmt wie berüchtigt, beeindruckt.

Bei den Fahrzeugen fallen einige Nobel-Karossen auf, wie der Cadillac des früheren dänischen Königs oder der wunderschöne blaue Bentley des früheren Prinzen Bira aus Siam, dem heutigen Thailand. Aber auch zahlreiche „Brot-und-Butter-Autos“ aus den früheren Jahrzehnten erfreuen den Betrachter, vor allem natürlich diverse Volvo- und Saab-Modelle. Sogar ein NSU Ro 80 ist zu sehen, und ganz reizend ist die Zusammenstellung der Klein- und Kleinstwagen aus den Fünfzigerjahren wie der BMW Isetta, Zündapp Janus, Lloyd und mehrere Goggo-Typen. Im Obergeschoss auf der Galerie finden sich noch weitere Ausstellungsbereiche, alte Fahrräder und Mopeds („Knallert“) sind ebenso liebevoll aufbereitet wie eine alte Küche, Einrichtungsgegenstände und eine Werkstatt. Dieser Sammlungsteil überrascht mit seiner Themenvielfalt. Das Schloss bietet noch weitere Ausstellungen über Landwirtschaft, Pferdewagen, Puppen, Rettungsdienst, Kaufmannsmuseum, eine arbeitende Schmiede und, und, und ...

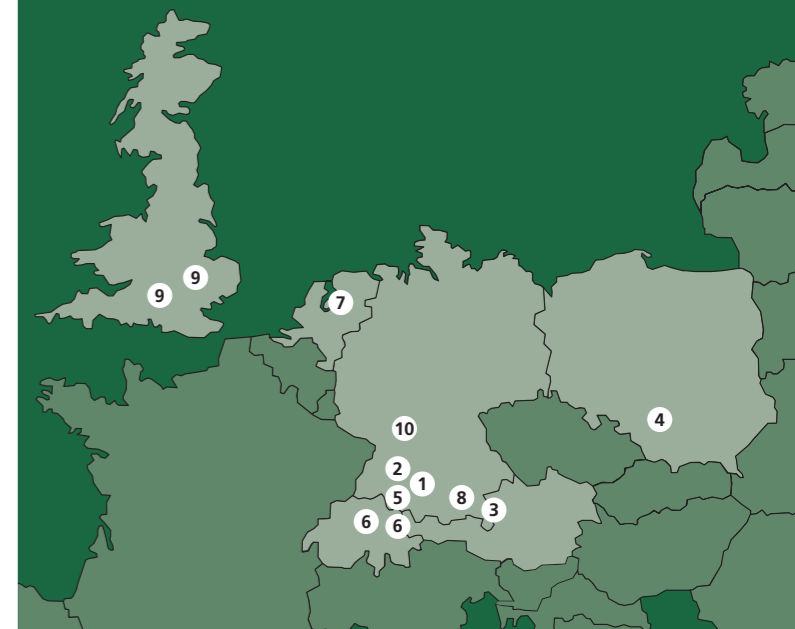
Diese einzigartige Schlossanlage ist mit ihren vielfältigen Sammlungen tatsächlich ein Erlebnispark für die ganze Familie und vor allem für Kinder und Jugendliche ein lohnenswerter Einstieg in dänische Technik- und Kulturgeschichte. Und selbst technisch weniger interessierte Begleitpersonen dürften eine attraktive Alternative finden: statt Himmelslaus und Tiger Moth ein herrlicher Rosengarten oder ein prächtiges Hecken-Labyrinth.



Herrliche Oldies in alter Schloss-Remise – ein de Havilland Chipmunk-Trainer über einem Volvo 244 aus den späteren Siebzigern und einem Opel Rekord Caravan P1 aus den frühen Sechzigern

LUFTFAHRTMUSEEN IM DLR-MAGAZIN

- 1 **Bei Zeppelin in Friedrichshafen**
Kinderstube der Luftfahrt
DLR-Magazin 126 (Juni 2010)
- 2 **Das Dornier-Museum in Friedrichshafen**
Der Geist der Do lebt!
DLR-Magazin 127 (September 2010)
- 3 **Historische Flugzeuge am Salzburg Airport**
Prickelnder Cocktail im Hangar-7
DLR-Magazin 133 (März 2012)
- 4 **Das Luftfahrtmuseum Lotnictwa Polskiego bei Krakau**
Auf dem Altenteil von Albatros, Möwe und Kuckuck
DLR-Magazin 135 (September 2012)
- 5 **Im Dornier Museum in Friedrichshafen**
Das Dornier Wal-Flugboot – eine Legende kehrt zurück in die Heimat
DLR-Magazin 136 (Dezember 2012)
- 6 **Die Schweizer Fliegermuseen in Altenrhein und Dübendorf**
Bei Häfelis, Langnasen und Seebienen
DLR-Magazin 138 (Juni 2013)
- 7 **Das Aviodrome im niederländischen Lelystad**
Luftfahrtwelten zwischen Möwen und Windmühlen
DLR-Magazin 139 (September 2013)
- 8 **Das Deutsche Museum München und die Flugwerft Schleißheim**
Optik, Haptik, Technik
DLR-Magazin 140 (Dezember 2013)
- 9 **Die britischen Luftfahrtmuseen Brooklands und Duxford**
The power and glory – die Legende lebt
DLR-Magazin 143 (September 2014)
- 10 **Auto & Technik Museum Sinsheim und Technik Museum Speyer**
Überschallflugzeuge und exotische Alltransporter
DLR-Magazin 148 (November 2015)





DINGE ERKLÄREN – ODER WISSENSCHAFT VERMITTELN

Autor Randall Munroe hat für sein Buch **Der Dinge-Erklärer (Knaus Verlag)** eine Angst überwunden – nämlich die Angst, dumm zu klingen, wenn er beim Schreiben auf einfache Worte setzt. „Autor“ ist aber vielleicht auch die falsche Bezeichnung. Munroe ist Comiczeichner. Aber auch das passt nicht so richtig, denn seine Illustrationen sind weder besonders ausgefeilt noch sehr künstlerisch. Er ist wohl eine Mischung aus beidem: „Ich wollte coole Ideen auf neue Weise darstellen und nicht wieder ein Buch mit langen und komplizierten Erklärungen schreiben. Davon gibt es schon so viele.“

Das Ergebnis ist ein Buch, in dem mit einem Wortschatz aus den 1.000 häufigsten Wörtern und schlichten grafischen Zeichnungen so unterschiedliche Dinge erklärt werden wie die Internationale Raumstation ISS, die Mikrowelle, der Aufzug, der menschliche Körper oder das Laptop. Munroe vereinfacht dabei sogar die Namen, um seinem Motto der simplen Wörter treu zu bleiben: Aus dem Laptop wird der „Faltcomputer“, aus dem Aufzug das „Hochziehzimmer“ und aus der Mikrowelle die „Radiowellenbox für warmes Essen“. Und dann geht es ins Detail: Mit Minizeichnungen und Mini-Absätzen wimmelt das Thema über die einzelnen Seiten.

Ab jetzt muss sich der Leser und Betrachter entscheiden: Kann er damit leben, dass Dinge nicht bei ihrem gewohnten Namen genannt werden und man keinen einzigen Fachbegriff lernt? Wenn ja: Prima – dann darf er in oftmals enorm witzige Beschreibungen, kleine Seitenhiebe, unterhaltsame Zeichnungen und eine ganz eigene Sichtweise eintauchen und (bei möglichst guter Beleuchtung) mit den Augen kreuz und quer auf rund 60 Seiten das Wissen einsammeln. Wenn nein: Finger weg vom Dinge-Erklärer! Hier wird nicht glücklich, wer sich geordnet und konventionell Wissen anlesen möchte. Allerdings verpasst man dann auch die Chance, sich zu amüsieren und beim Erraten der Fachbegriffe auch etwas zu lernen.

Wem der Dinge-Erklärer nicht behagt, der kann zum **Wissenschaftsbuch. Naturwissenschaft einfach erklärt (Dorling Kindersley)** greifen. Darin wird Wissenschaft zwar auch häppchenweise, aber sehr strukturiert angeboten. Strikt am Zeitstrahl der Geschichte ausgerichtet, zu Jahrhunderten mit einem Motto zusammengefasst, geht es auf rund 350 Seiten um Forscher und ihre bahnbrechenden – oder auch manchmal hinfälligen – Entdeckungen und Ideen. Edwin Hubble und die kosmische Expansion, Dmitri Mendelejew und das Periodensystem, Edward Lorenz und der Schmetterlingseffekt, aber auch Schrödingers Katze und Newtons fallender Apfel werden jeweils auf einigen Seiten vorgestellt. Das ist alles verständlich geschrieben, doch voll mit Fakten und Fachbegriffen. Querlesen oder ein wenig herumblättern – das geht hier nicht.

Dafür nehmen die Autoren ihre Leser an die Hand: Bei jedem Kapitel gibt es Hinweise auf thematisch verwandte Kapitel. Man kann also chronologisch lesen oder sich von Thema zu Thema hangeln. Aufgelockert werden die faktenreichen Texte von Zitaten, Zeichnungen sowie Info-Kästen, die das jeweilige Kapitel in einen historischen Kontext setzen oder die Biografien der Forscher enthalten.

Zu lachen gibt es hier weniger als beim Dinge-Erklärer, dafür aber wird das Wissen im Kontext vermittelt – mit hohem Anspruch.

Manuela Braun



PROJEKT APOLLO IM DOPPELPAK

Über die Mission zum Mond gibt es große Bildbände und Geschichten mit Gefühl. Eugen Reichl geht mit seinen beiden Büchern **Projekt Apollo (Motorbuch Verlag)** einen anderen Weg: Auf wenig Raum präsentiert er wohl alle Fakten, die ihm jemals zum Thema begegnet sind. Manchmal hochspannend und mit ungewöhnlichen Einblicken, manchmal zu verliebt in die Details, die – fast ungefiltert bezüglich ihrer Wichtigkeit – zusammengetragen wurden. Zwei Bände für diejenigen, die schon viel über die Mondmissionen gelesen haben und jede neue Anekdote auch noch über die kleinste Schraube zu schätzen wissen. Dafür muss man dann aber kleinformatische Fotos sowie Grafiken in Kauf nehmen und sich oftmals durch eine „Bleiwüste“ in kleiner Schriftgröße kämpfen.



REISEWARNUNG FÜR DAS UNIVERSUM

Die „Science Busters“ – der Comedian Martin Puntigam, der Physiker und Planetariumsdirektor Werner Gruber sowie der Kern- und Astrophysiker Heinz Oberhummer – sind überhaupt nicht so harmlos, wie es ihr Buch **Das Universum ist eine Scheissgegend (Carl Hanser Verlag)** zunächst scheinen lässt. Launige Kapitelüberschriften, witzige Geschichten, lustige Zeichnungen – und ratzfatz ist man mitten in der Wissenschaft und muss so richtig gut aufpassen, dass man noch versteht, worüber die drei Herren so spaßig schreiben. Die Todesanzeige fürs Universum zu Beginn des Buches zeugt vom schwarzen Humor der Autoren, schützt aber nicht vor konkreten Fakten und Formeln, auf die man stößt (und die durch eingefügte Fact Boxes im Text sogar noch Präsenz gewinnen). Wer sich lieber nur auf seine Ohren verlassen möchte, gönnt sich fünf Stunden lang das Hörstück zum Buch (Hörverlag).



LEBEN UNTER EXTREMBEDINGUNGEN

„Was ist das Leben?“ – Einfache Fragen sind meistens die mit den schwierigsten Antworten. Bevor Ben Moore über **Da draußen. Leben auf unserem Planeten und anderswo (Kein & Aber)** spricht, klärt er daher erst einmal, wonach wir überhaupt suchen müssen. Moore hat sein Buch klar strukturiert und holt auch diejenigen ab, die erst einmal ein wenig Biologie auffrischen müssen, beginnt dann auf der Erde, bevor es mit dem Außerirdischen weitergeht und mit dem Leben zwischen den Sternen endet. Ein populärwissenschaftliches Buch, das die Gratwanderung zwischen Wissensvermittlung und Unterhaltung sehr geschickt meistert und nur sehr selten vergisst, „Fachchinesisch“ auch in eine für interessierte Laien verständliche Sprache zu übertragen.

MB



LINKTIPPS

IN SPACE WE TRUST
inspacewetrust.org

Einen entspannten Spaziergang durch die Geschichte der Weltraumforschung erwartet den Besucher dieser von ROSKOSMOS initiierten Webseite. Schöne Grafik, originelle Animationen, angenehme Klangwelten und interessante Fakten – die Seite begeistert in russischer und englischer Sprache.

3D-REISE DURCHS SONNENSYSTEM
bit.ly/1xwumK6

Einmal durch das Sonnensystem reisen – die Gratis-App „Solar Walk“ macht es möglich, und das im eindrucksvollen 3D-Modus. Mit der intuitiven Navigation nähert man sich Planeten und Monden, kann sie von allen Seiten betrachten und erhält ausführliche Informationen über den angesteuerten Himmelskörper.

WELT-QUIZ GEOGRAPHIE
quiz-geographie.de

Wie heißt die Hauptstadt von Peru? Wo genau liegt das Tote Meer? In welcher Höhe befindet sich die Stratosphäre? Egal, ob Kontinente, Metropolen, Gewässer oder anderes: Die Quiz-Seite bietet viele spannende und teils auch knifflige Fragen rund um den Globus.

MIT COMICS ERKLÄRT
bit.ly/1yeXMzi

In ihren „Klar soweit?“-Comics erklärt die Helmholtz-Gemeinschaft schwierige Sachverhalte so, dass sie jeder versteht. In Nummer 8 geht es um Datenverschlüsselung im Internet.

HISTORISCHE FOTOS UND KARTEN
bit.ly/1sQZYaj

Mehr als zwölf Millionen historischer Bilder hat der US-Forscher Kalev Leetaru aus Büchern gescannt und auf Flickr gestellt. Die Motive aus den Jahren 1500 bis 1922 sind für jeden kostenlos und lizenzfrei nutzbar.

VIRTUELLER FLUG
<http://bit.ly/15Udyoj>

Otto Lilienthals ersten Flug im Film? Auf der Internet-Seite des Lilienthal-Museums in Anklam ist es möglich. Ein wenig ruckelt die Animation, aber schließlich gab es vor 125 Jahren ja noch keine Möglichkeit, Bewegtbilder zu konservieren.

EIN FLUGHAFEN IN RENTE
flughafen-riem.de

Einen Museumsbesuch von daheim ermöglicht die Webseite des alten Münchner Flughafens „Riem“. Dort gibt es Bilder, Videos und Informationen rund um das ehemalige „Tor zur Welt“.