

# DLR magazin

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt · Nr. 161 · Juli 2019

## LUFTIG-LEICHT UND WANDELBAR

BARBARA MILOW UND DER SUPERWERKSTOFF

DER VIRTUELLE WEG ZUR ZULASSUNG  
WENN DER BUS KOMMT WIE GERUFEN

Liebe Leserinnen und Leser,

das kugelige Etwas in Kornblumenblau auf der Titelseite stammt nicht – Sie werden es ahnen – aus dem Reich der Botanik (wenngleich Pflanzen in diesem DLR-Magazin auch ein Thema sind). Ein Schwamm? – Schon näher dran. Denn Lufteinschlüsse sind auch hier entscheidend. Sie machen aus dem Ausgangsmaterial einen Hightech-Werkstoff. Es geht um ein Aerogel. Leicht, elektrisch leitfähig und temperaturstabil – diese Eigenschaften in einem Stoff vereint begeistern Professorin Barbara Milow. Sie machen Aerogele hochinteressant – als stabilen Werkstoff, für Filter, als Dämmstoff oder auch als Implantat. Milow und ihr Team kreieren immer neue Aerogele und entdecken dabei weitere Anwendungsmöglichkeiten – bis hin zum Einsatz im E-Auto oder im Flugzeug der Zukunft.

Wir hatten Pflanzen versprochen. Was darf's sein? Tomaten, Kräuter, Rucola? – Alles da. Und das mitten im ewigen Eis. DLR-Forscher Paul Zabel testete im Arktislabor EDEN-ISS, ob Pflanzen auch ohne Erde und Sonne gedeihen. Erfolgreich. Für unwirtliche Gegenden auf der Erde und die Weltraum-Exploration hat das Verfahren Zukunft, selbst wenn das All künftig virtuell erkundbar wird, wie Bremer DLR-Forscher und -Forscherinnen zeigen: In virtueller Realität scheint ihnen das Sonnensystem zum Greifen nah.

Simulationen spielen auch anderswo eine immer größere Rolle. Zum Beispiel beim Flugzeugentwurf. Der Zulassungsprozess soll künftig auf langwierige Tests und zahllose Flugstunden verzichten können. Das DLR weist hier einen neuen Weg. Er führt vor allem über Hochleistungsrechner, das macht den Prozess kürzer und schneller. Damit öffnen sich auch Chancen für Luftfahrzeuge ganz neuen Typs. Wenn die DLR-Vision vom Null-Emission-Flugzeug Realität wird, muss sich niemand mehr um die Klimabelastung durchs Fliegen sorgen. Ein Thema, das in diesem Heft kommentiert wird.

Schlussendlich wäre das Juli-Magazin im Jahr 2019 nicht komplett ohne das große Jubiläum 50 Jahre Mondlandung. Wir haben ein Potpourri zum Thema Apollo zusammengestellt und wünschen Ihnen dabei gute Unterhaltung, ebenso natürlich bei all den anderen Themen, ob aus Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Verkehr oder Digitalisierung!

Ihre Magazin-Redaktion



GEWÄCHSHAUS IM EWIGEN EIS 08



MISSIONSPLANUNG IN VIRTUAL REALITY 18



SEKTORENKOPPLUNG IM ENERGIEWESEN 26



VIRTUELL ZUR ZULASSUNG 14



KOMMENTAR 04



APOLLO-SPEZIAL 50



REALLABOR SCHORNDORF 40

<b>KOMMENTAR</b>	4
<b>MELDUNGEN</b>	5
<b>GRÜNE LUNGE IM EWIGEN EIS</b> Gemüse aus dem Gewächshaus EDEN-ISS	8
<b>DER VIRTUELLE WEG ZUR ZULASSUNG</b> Das DLR-Querschnittsprojekt SimBaCon	14
<b>SONNENSYSTEM ZUM GREIFEN NAH</b> Weltraummissionsplanung in Virtual Reality	18
<b>DIGITAL VOM TOWER ZUM COCKPIT</b> Flugfunk LDACS überträgt Sprache und Daten	22
<b>SYSTEMWECHSEL MITTEN IM BETRIEB</b> Interview: Sektorenkopplung im Energiewesen	26
<b>LUFTIG-LEICHT UND WANDELBAR</b> Porträt: Barbara Milow und die Aerogele	30
<b>NAVIGATION NÄCHSTER GENERATION</b> Positionsbestimmung ohne GPS	34
<b>GEBAUT, UM ZU BLEIBEN</b> 60 Jahre DLR Köln	38
<b>WENN DER BUS KOMMT WIE GERUFEN</b> Reallabor Schorndorf: Bilanz eines Praxistests	40
<b>DAS NERVENSYSTEM DER SATELLITENKOMMUNIKATION</b> Sende- und Empfangsstationen des DLR	44
<b>VOLLES STADION – OHNE RUNDES LEDER</b> DLR_Raumfahrt_Show lockte den Nachwuchs	48
<b>HOMMAGE AN APOLLO</b> Das Mondlandungsjubiläum im Blick	50
<b>DER ERSTE MENSCH AUF DEM MOND</b> DLR-Ausstellung 50 Jahre Mondlandung	52
<b>IN MUSEEN GESEHEN</b> Bonner Perle für Technikfans	53
<b>REZENSIONEN</b>	56

# „UNSERE VISION IST DAS NULL-EMISSION-FLUGZEUG“

Von Rolf Henke

In den letzten Monaten hat sich gezeigt, dass globale Fragen immer mehr den Einzelnen bewegen. Die Diskussion um den ökologischen „Fußabdruck“ des Fliegens wird öffentlich und oft emotional geführt, statt auf Faktenbasis. Real beträgt der Anteil des Luftverkehrs an den weltweiten Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)-Emissionen rund drei Prozent. Auch Rußpartikel und Kondensstreifen tragen zur Klimawirkung der Fliegerei bei. In den vergangenen Jahrzehnten wurde schon viel verbessert, aber es muss – und es wird – sich noch mehr tun müssen. So wird ab 2020 das CO<sub>2</sub>-Kompensations- und Reduktionsprogramm für die internationale Luftfahrt (CORSIA) in Kraft treten, ein von der International Civil Aviation Organization (ICAO) entwickeltes Konzept zur Emissionsminderung für die globale Luftfahrtindustrie. Selbstverständlich liefert das DLR als größte Luftfahrtforschungseinrichtung Europas seine Beiträge, um die Umweltbelastung durch das Fliegen zu reduzieren. Wir orientieren unsere Forschungsaufgaben an den Zielen, die im Visionspapier der Europäischen Kommission „Flightpath 2050“ formuliert sind und an deren Ausarbeitung das DLR aktiv mitgewirkt hat.

Bis zum Jahr 2050 sollen die Emissionen des Luftverkehrs bezüglich CO<sub>2</sub> um 75 Prozent, Stickoxide um 90 Prozent und Lärm um 65 Prozent bezogen auf das Jahr 2000 reduziert werden. Unsere Aufgabe ist es, die bestehende Luftfahrt zu verbessern und deren Zukunft neu zu denken. Die Verbesserung aktueller Luftfahrzeuge und ihres Betriebs erfolgt heute unter anderem durch aerodynamische Optimierung, Leichtbauweise und bessere Antriebe. In Verbindung mit einer Flugführung, die sich auch an Umweltverträglichkeit orientiert, sollen die Lärm- und Schadstoffemissionen der Luftfahrt minimiert werden. In den vergangenen zehn Jahren wurden im DLR mehr als 300 Millionen Euro in die Entwicklung von Technologien und den Aufbau von Kompetenzen für eine bessere Umwelt- und Klimabilanz der Luftfahrt investiert.

Doch wir sind uns bewusst, dass die bisherigen Anstrengungen von Forschung und Luftverkehrsindustrie in Sachen Ökoeffizienz durch den rasant steigenden Bedarf am Lufttransport teilweise wieder aufgehoben werden. Deshalb ist das DLR bestrebt, in enger Kooperation mit Flugzeugherstellern und deren Zulieferern, Fluggesellschaften, Flugsicherung, Flughäfen und Behörden neue Forschungsergebnisse noch schneller in die Praxis umzusetzen.

Deutschland verfügt mit dem Luftfahrtforschungsprogramm der Bundesregierung über ein Instrument, das die Industrie in die Lage versetzt, ihre Produkte weiter zu verbessern und neue Wege zu beschreiten. Dazu gehört es, alternative Treibstoffe und Antriebe zu erforschen. Ein neues Thema ist das elektrische Fliegen. Das DLR kann und das DLR wird Antworten auf die drängenden Fragen in diesem Sektor finden: Wie und in welchem Umfang, bis zu welcher Flugzeuggröße ist es praktikabel? Wie hoch sind Aufwand und Nutzen in Herstellung, Betrieb, Wartung und Entsorgung? Noch in diesem Jahr untersucht das DLR die Möglichkeit des elektrischen Fliegens an einem Flugzeug der Commuter-Klasse mit bis zu 19 Sitzen.

Unsere Vision für die Zukunft der Luftfahrt ist das „Null-Emission-Flugzeug“! Das aber braucht Zeit und Ausdauer – in Politik, Forschung sowie Industrie. Und: Das gibt es nicht umsonst ...



Professor Rolf Henke ist im Vorstand des DLR für die Luftfahrtforschung zuständig

## DESIGN CHALLENGE FÜR KLEINE FLUGGERÄTE

Luftfahrzeugentwürfe Studierender gefragt – DLR und NASA riefen zum Wettbewerb auf

Den Energieverbrauch eines Flugzeugs radikal senken: Wie das geht, zeigte 2018 ein vierköpfiges Team Studierender aus München mit dem Entwurf „The ‚eRay‘ Aircraft Concept“. Sie stellten damit das kreative Potenzial des Nachwuchses bei der DLR/NASA-Design Challenge unter Beweis. Der länderübergreifende Wettbewerb geht 2019 in die dritte Runde. Diesmal stehen Luftfahrzeugentwürfe und Konzepte für die Verkehrsanbindung abgelegener Regionen mit kleinen Fluggeräten im Mittelpunkt. Diese sollen sich durch eine hohe Wirtschaftlichkeit auszeichnen und dafür neben Passagierflügen mit Pilot auch nächtliche unbemannte Frachtflüge möglich machen. Die Aufgabe stellte das DLR gemeinsam mit der NASA Studierenden in Deutschland und den USA. Nach dem Auftakt am 12. April 2019 am DLR Braunschweig hatten die Teilnehmer bis zum 1. Juli 2019 Zeit, ihre Wettbewerbsvorschläge zu erstellen. Die deutschen Gewinner reisen im Herbst zur amerikanischen Luft- und Raumfahrtbehörde. Dort werden sie – neben den amerikanischen Siegern des Wettbewerbs – ihre Arbeit präsentieren.



Luftfahrzeugentwürfe und Konzepte für die Verkehrsanbindung abgelegener Regionen sind 2019 das Wettbewerbsthema der Studierenden

Weltweit gibt es abgelegene Regionen, die nur über den Luftweg effektiv angebunden sind. Dort sind kleine Luftfahrzeuge mit möglichst geringen Fix- und Betriebskosten und flexibler Einsetzbarkeit zum Passagier- und Frachttransport erforderlich. Dafür sind neue Technologie-Ideen gefragt, von Flugzeugentwürfen bis hin zu unbemannten Betriebsszenarien. „Die Luftfahrt bringt die Welt vom einzelnen Flugplatz über die Flughäfen und die großen Hubs zusammen“, sagte Prof. Rolf Henke, DLR-Vorstand für Luftfahrtforschung und -technologie, zum Auftakt, „die Anbindung abgelegener Regionen per Flugzeug ist darin nicht wegzudenken und so freue ich mich gemeinsam mit unseren Partnern der NASA auf frische Impulse des Nachwuchses in Entwürfen und Betriebskonzepten, die den Regionalflugverkehr beleben.“

An der DLR/NASA-Design Challenge nehmen auf deutscher Seite 40 Studierende von fünf Hochschulen teil: RWTH Aachen, TU Berlin, TU Dresden, TU Hamburg und Universität Stuttgart.

[t1p.de/agia](http://t1p.de/agia)

## INTERAKTION VON DROHNEN IN STÄDTEN

DLR erprobte das System City-ATM am Beispiel einer Brückenbefliegung

Mit Flugversuchen an der Hamburger Köhlbrandbrücke hat das DLR Ende April 2019 gemeinsam mit Partnern gezeigt, wie die Kooperation von Drohnen beispielsweise bei der Befliegung einer Brücke schon heute funktioniert. Bei laufendem Schiffs- und Straßenverkehr demonstrierten die am Projekt City-ATM Beteiligten, wie automatisch fliegende Kamera-Drohnen – mit Hilfe von vernetzter Flugplanung, Registrierung und Identifikation bis hin zur Flugüberwachung, Konflikterkennung und Konfliktvermeidung – in einem städtischen Luftraum gemeinsam sicher agieren können. Der Anwendungsfall Brückenbefliegung war ein ideales Testszenario, weil hierbei die Drohnen besonders eng und dynamisch zusammenarbeiten müssen.



Immer zwei von drei solcher Drohnen waren bei den Flugversuchen gleichzeitig in der Luft und zeigten erfolgreich die Interaktion im städtischen Raum

Das für City-ATM entwickelte System umfasst mehrere Schritte: Zunächst werden die Piloten und Drohnen für eine Startfreigabe elektronisch registriert und authentifiziert. Zeitgleich wird die Flugmission detailliert geplant. Dabei sind die räumlichen Flugbeschränkungen zu berücksichtigen. Sobald die grundlegende Wegpunktplanung abgeschlossen ist, wird diese in Flugwege (Trajektorien) umgewandelt. Das System bezieht dabei die Flugperformance der Geräte sowie örtliche und zeitliche Rahmenbedingungen ein. So lassen sich schon vor dem Start mögliche Konflikte prognostizieren. Zukünftig werden Paket-Drohnen, Lufttaxis oder unbemannte Luftfahrzeuge für Inspektionen in Städten fliegen. Dafür ist es besonders wichtig, dass unbemannte Flugobjekte sich zuverlässig erkennen und in der Lage sind, einander auszuweichen.

[t1p.de/yv6v](http://t1p.de/yv6v)

## DIGITALER KNOTEN VERKNÜPFT VERKEHRSTEILNEHMER

Im Projekt „Digitaler Knoten 4.0“ untersuchte das DLR gemeinsam mit Partnern neue Wege der Kommunikation von Fahrzeugen, Radfahrern, Fußgängern und Ampeln an innerstädtischen Kreuzungen. Diese dynamische und komplexe Verkehrssituation stellt zukünftiges automatisches und vernetztes Fahren vor Herausforderungen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des DLR-Instituts für Verkehrssystemtechnik entwickelten Lösungen, um die unterschiedlich ausgerüsteten Verkehrsteilnehmer miteinander zu vernetzen und so ihre Interaktion effizienter und sicherer zu gestalten.

Außerdem wurden Kerntechnologien für „intelligente“ Kreuzungsinfrastrukturen untersucht, die allen Verkehrsteilnehmern „in time“ wichtige Informationen bereitstellen. Dazu erprobten die Fachleute das sichere Linksabbiegen eines automatisierten Fahrzeugs an der Forschungskreuzung des DLR in Braunschweig. Während des Vorgangs kooperierten die Forschungsfahrzeuge miteinander, um eine befahrbare Lücke zu finden. Sensordaten der Infrastruktur informierten über die Gesamtsituation und Smartphone-Daten von Fußgängern und Radfahrern über deren Aufenthaltsorte.

Bild: DLR/Marek Kruszewski



Im Projekt „Digitaler Knoten 4.0“ befassten sich die DLR-Wissenschaftler unter anderem mit Mischverkehr und automatisiertem Linksabbiegen

t1p.de/6wbr



Netz- und Systemmodellierung am DLR in Oldenburg

## SOFTWARE ZUR UMGESTALTUNG DER ENERGIE-INFRASTRUKTUR

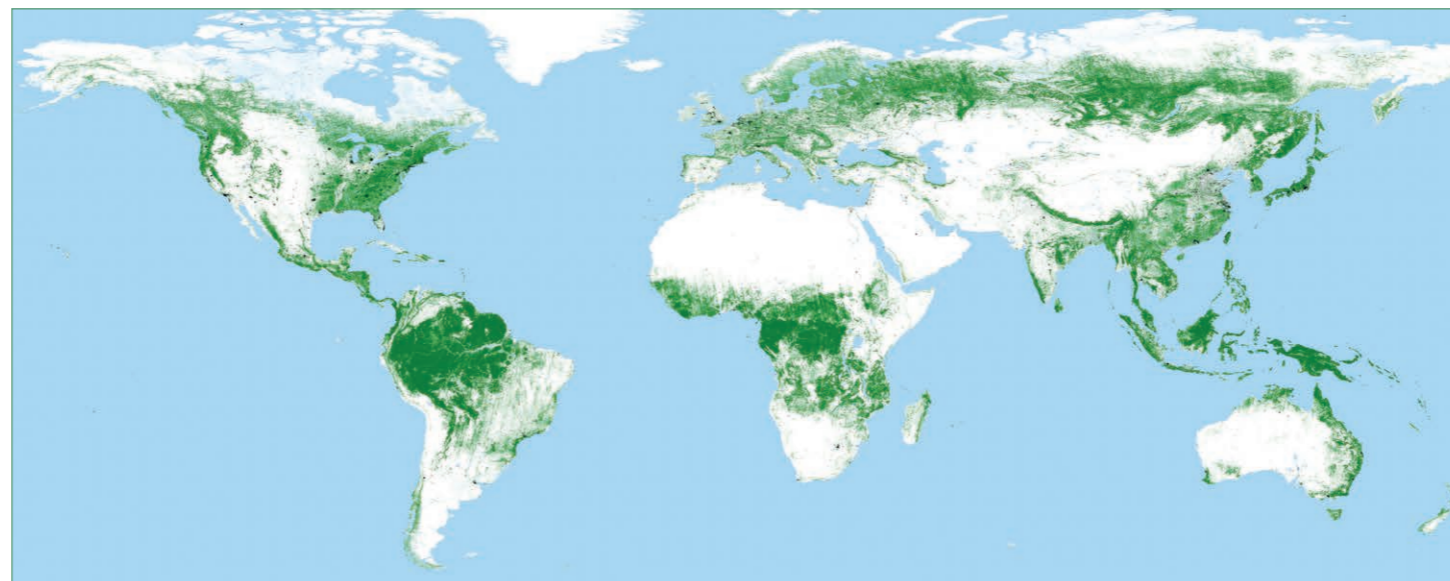
Mit „open\_eGo“ (open electricity Grid optimisation) hat das DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme in Oldenburg einen offenen Daten- und Softwarepool für die optimale Planung der deutschen Netz- und Speicherinfrastruktur entwickelt. Bei der Einspeisung künftiger Offshore-Windparks ins Energienetz kann die Software beispielsweise Prognosen darüber erstellen, in welchen Regionen Engpässe zu erwarten sind, und wo künftig Netzverstärkungen oder neue Leitungen benötigt werden. Die Plattform ist nach den Prinzipien einer Open-Source-Entwicklung für alle Akteure der Energiewirtschaft uneingeschränkt zugänglich und soll dabei helfen, künftige Energiesysteme nach volkswirtschaftlich vorteilhaften Kriterien zu modellieren.

t1p.de/o06y

## DER GLOBALE WALDBESTAND AUF DEM MONITOR

Wälder gelten als die Lunge der Erde und sind wichtige Ressourcen für Mensch und Tier. Trotz ihrer Bedeutung für das Erdklima schwinden sie. Das zeigen Satellitenaufnahmen: Nur noch ein Drittel der Erde ist bewaldet. Mehr als die Hälfte des weltweiten Bestands wurde seit Mitte des 20. Jahrhunderts abgeholzt. Um den Zustand der „grünen Lunge“ erfassen und bewerten zu können, hat das DLR eine globale TanDEM-X-Waldkarte erstellt. Sie wurde mit Hilfe von Daten aus dem Höhenmodell der deutschen Radarsatellitenmission TanDEM-X entwickelt und besitzt eine Auflösung von 50 Metern. Die globale Datenverarbeitung erfolgte mittels Algorithmen aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz. Die Waldkarte liefert erstmals ein einheitliches Bild von Regenwäldern in Südamerika, Südostasien und Afrika und steht wissenschaftlichen Nutzern frei zur Verfügung.

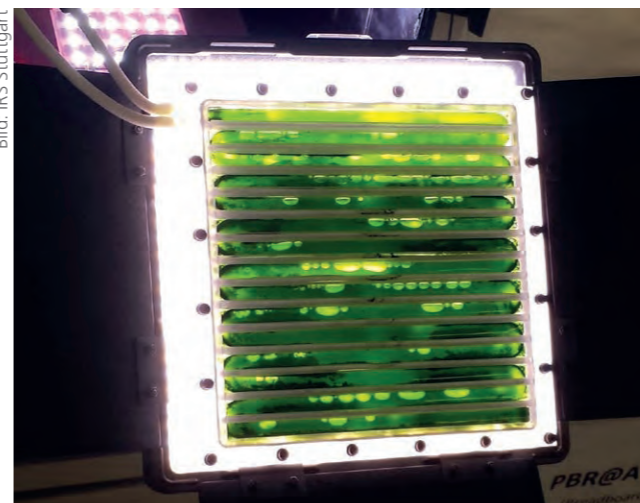
t1p.de/gox2



Globale Waldkarte auf Basis von TanDEM-X-Daten

## ALGEN SPENDEN ASTRONAUTEN AUF DER ISS ATEMLUFT

Bild: IRS Stuttgart



Das Photobioreaktor-Experiment

Bei längeren Aufenthalten im All sind Astronauten auf technische Unterstützung durch Lebenserhaltungssysteme angewiesen. Die Raumfahrer benötigen einen möglichst geschlossenen und unabhängigen Kreislauf, um sich zu versorgen. Das Experiment Photobioreaktor ist ein großer Schritt in diese Richtung: Algen produzieren aus verbrauchter Atemluft mittels Photosynthese Sauerstoff. Durch ihr Wachstum entsteht außerdem essbare Biomasse. Der Photobioreaktor ist seit Mai 2019 auf der Internationalen Raumstation ISS und soll dort ein halbes Jahr an der Produktion von Atemluft mitarbeiten. Er ergänzt das Lebenserhaltungssystem Advanced Closed-Loop System (ACLS).

Photobioreaktoren sind besonders interessant für planetare Basisstationen oder sehr lange Missionen, denn zusätzlich zur gewonnenen Atemluft kann die produzierte Algenbiomasse etwa 30 Prozent der Astronautennahrung ersetzen. Auf der Erde können ähnliche Systeme für die Luftaufbereitung in geschlossenen Räumen oder für den Abbau von Kohlenstoffdioxid eingesetzt werden. Das Experiment wurde vom Institut für Raumfahrtsysteme der Universität Stuttgart und dem Raumfahrtmanagement des DLR initiiert und von Airbus Defence and Space gebaut.

t1p.de/9nzt

## REGIONALMELDUNGEN

**NEUSTRELITZ:** Einen Monat lang (15.6.–14.7.) beschäftigten sich insgesamt 24 Studierende aus Deutschland, den USA und Südafrika im Rahmen des jährlich stattfindenden Joint Space Weather Summer Camp mit der aktuellen Weltraumwetterforschung. Ein Thema war der Einfluss des Weltraumwetters auf das geomagnetische Feld der Erde.

**DRESDEN:** Das denkmalgeschützte Gebäude auf dem Fabrikgelände der ehemaligen „Universellen Werke Dresden“, in dem seit Kurzem das DLR-Institut für Softwaremethoden zur Produkt-Virtualisierung ansässig ist, wurde nach dem Umbau feierlich eröffnet. Die DLR-Wissenschaftler in Dresden beschäftigen sich mit der Erforschung und Entwicklung von informatisch/technischen und software-methodischen Grundlagen zur Beschreibung und Realisierung des virtuellen Produkts in der Luftfahrt.

**BERLIN:** Die erste Serie von lichtempfindlichen Kamerasensoren, die auf dem Weltraumobservatorium PLATO (Planetary Transits and Oscillations of stars) zum Einsatz kommen sollen, wurde von der Europäischen Weltraumorganisation ESA abgenommen. PLATO soll ab 2026 erdgroße Exoplaneten im Orbit um benachbarte Sterne suchen und entdecken. Das Weltraumteleskop wird aus 26 einzelnen Teleskopen bestehen, die auf eine Satellitenplattform montiert sind. Die Leitung des PLATO-Nutzlast-Konsortiums liegt beim DLR-Institut für Planetenforschung.

**GÖTTINGEN:** Gemeinsam mit der DB Systemtechnik GmbH wird das DLR an Technologien für mehr Wohlbefinden von Zugreisenden und an der Reduktion des Energiebedarfs der Klimatisierung forschen. Dazu wird ein aktueller ICE-Wagen zum Labor für die Klimatisierung von Zügen umgebaut. Der „Demonstrator für Innovationen im Reisendenkomfort und Klimatisierung“ soll 2020 in Betrieb genommen werden.

**AUGSBURG:** Am DLR-Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) erforschen und entwickeln Fachleute neue Technologien und Verfahren für die Leichtbauproduktion. Dazu gehören die Automatisierung von Prozessketten oder der Einsatz von Robotern bei der Produktion. Im Mai 2019 feierte das ZLP sein zehnjähriges Jubiläum.

**HAMBURG:** Bis Ende 2019 wird das DLR-Institut für Instandhaltung und Modifikation das Applikationszentrum Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) 4.0 aufbauen. Dazu hat es von der Stadt Hamburg eine entsprechende Förderung erhalten. In dem Applikationszentrum soll die Verbindung zwischen der realen und digitalen Welt geschaffen werden. Geforscht wird dort dann unter anderem an Wartungstechnologien, -prozessen und -strategien, an der Digitalisierung in der Flugzeuginstandhaltung und an der umfassenden Zustandsüberwachung von Systemen.

### 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

# GRÜNE LUNGE IM EWIGEN EIS

**S**tarke Schneestürme mit Windgeschwindigkeiten von bis zu 150 Kilometern pro Stunde, Temperaturen unter minus 40 Grad Celsius, Isolation jenseits jeglicher Zivilisation, Wochen in völliger Dunkelheit und keine Rettungskapsel wie auf der Internationalen Raumstation (ISS), mit der eine schnelle Rückkehr in die Heimat möglich ist. – Dies sind nur einige der Herausforderungen, denen sich das Team der Mission EDEN-ISS während der Weltraum-Testmission an der deutschen Neumayer-Station III des Alfred-Wegener-Instituts (AWI) in der Antarktis stellen musste. In dem von der Europäischen Union finanzierten Forschungsprojekt wird unter Leitung des DLR untersucht, wie Pflanzen in Habitaten auf Mond und Mars angebaut werden können. Damit leistet es einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung bio-regenerativer Lebenserhaltungssysteme.



Das Aufbauteam des DLR vor der Neumayer-Station III des AWI

Ein Gewächshaus in der Antarktis liefert Erkenntnisse für die Pflanzenzucht auf Mond, Mars und in den Wüsten der Erde

Von Dr. Daniel Schubert

Am 3. Januar 2018 rammt sich das südafrikanische Forschungsschiff Agulhas II in das Meereis der Atka-Bucht nahe dem Ekström-Schelfeis in der Antarktis – an Bord die beiden Gewächshauscontainer des EDEN-ISS-Projekts. Für das bereits Mitte Dezember angereiste vierköpfige EDEN-Aufbauteam aus dem Bremer DLR-Institut für Raumfahrtssysteme hat das Warten ein Ende. Schlechte Wetterbedingungen hatten die Ankunft der Container um zwei Wochen verzögert. Mit der Schiffsentladung kommt Begeisterung auf, denn vier Jahre intensiver Planung, Hardwareentwicklung, Tests und Verbesserungen haben das Team schließlich hierher gebracht: zur lang erwarteten antarktischen Erprobungsmission. Von der Landungsstelle aus zieht ein Spezialteam des AWI die beiden Gewächshauscontainer und einen Support-Container mit Ersatz- und Verbrauchsmaterialien über eine Distanz von 24 Kilometern zur Neumayer-Station III, dem Zentrum der bevorstehenden Isolationsmission. Am Folgetag stellt das AWI-Bauteam die beiden Gewächshauscontainer auf die bereits vorbereitete Plattform 400 Meter südlich der Station. Miteinander verbunden bilden sie die EDEN-ISS Mobile Test Facility – kurz MTF. In den darauffolgenden Wochen installiert das EDEN-Team des DLR Außentreppe, Kabelkanäle, Wärmeleitungen, Außenleuchten sowie das Kohlendioxid-Versorgungssystem. Die Energie kommt über ein sieben Zentimeter dickes Stromkabel von der Neumayer-Station III zum Gewächshaus.

## Stürme, Tiefschnee, Frost und Polarlichter

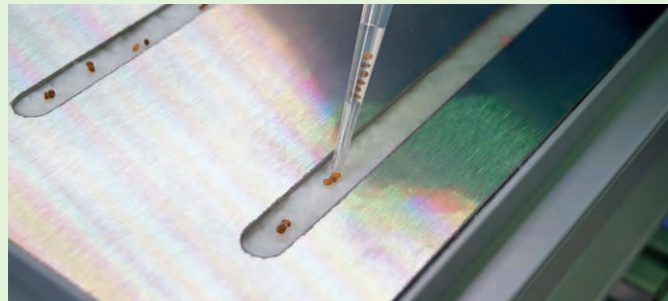
Am 7. Februar 2018 geht die grüne Lunge in Betrieb: Tomaten-, Paprika- und Gurkensamen kommen in die Anzuchtgefäße. In den kommenden Tagen folgen Radieschen, Kohlrabi, verschiedene Salate wie Rucola, Blattsalate und Asiasalate, Gewürzpflanzen wie Petersilie, Basilikum und Schnittlauch. Nachdem am 18. Februar 2018 die letzten Sommergäste die Station verlassen haben, beginnt die Isolationsphase und nur noch die zehnköpfige Überwinterungsmannschaft bleibt zurück. Von nun an sorgt DLR-Forscher Paul Zabel für den reibungslosen Betrieb der Systeme vor Ort.

Dann, am 20. Mai, zeigt sich die Sonne für ein halbes Jahr zum letzten Mal. Für das deutsche Überwinterungsteam beginnt die Polarnacht. Der Betrieb des Gewächshauses geht auch in dieser



Der Gewächshauscontainer EDEN-ISS in der Antarktis, hier während der Isolationsphase

Bild: Hanno Müller



Rucolasamen werden auf die Pflanzmatte aufgetragen



Kontrollzentrum von EDEN-ISS im DLR-Institut für Raumfahrtssysteme in Bremen

Bild: Esther Horvath, AWI

extremen Phase weiter. Sie wird zum Härtestest. Die Außentemperatur sinkt regelmäßig unter minus 30 Grad Celsius. Mit Stürmen und Dunkelheit haben sowohl die Überwinterungsscrew als auch das Gewächshaus zu kämpfen. Doch die immer mal wieder aufleuchtenden Polarlichter faszinieren die Stationsbesatzung.

#### Experimente in einer einzigartigen Umgebung

Ein anspruchsvolles Wissenschaftsprogramm begleitet das DLR-Team während der Mission. Paul Zabel nimmt in dieser Isolationsphase über 400 pflanzliche und mikrobiologische Proben. Die Pflanzgewebeproben dienen Tests zur Lebensmittelqualität und -sicherheit. Nach der Probenrückführung werden Partner in Italien und Irland sie analysieren. Die mikrobiologischen Proben reisen zur Untersuchung ins DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin nach Köln. Außerdem finden bereits direkt nach der Ernte vor Ort mehrere Experimente statt, wie etwa die Messungen des Nitratgehalts in den Früchten. Dies dient als Basis für die Entwicklung von Ernte-Schnelltests für zukünftige Astronauten.

Mit speziellen Fragebögen und mehreren moderierten Gruppendiskussionen untersuchen die Forscher auch die psychologische Wirkung von frisch geerntetem Gemüse auf die isolierte Neumayer-Crew. Tests, mit deren Hilfe der Geschmack des produzierten Gemüses untersucht wird, runden die psychologische Untersuchung vor Ort ab.

#### EDEN-ISS als internationale Forschungsplattform

In regelmäßigen Abständen testen die Forscher verschiedene Handhabungsprozeduren für die Produktion von Pflanzen in geschlossenen Systemen, ähnlich zu Habitaten auf Mond und Mars. Dabei werden

die Arbeitsschritte in der Antarktis live vom Missionskontrollzentrum am Bremer DLR-Institut begleitet. Von hier aus haben die Forscher ständig Kontakt in das Gewächshaus und können den Betrieb bei Stürmen auch vollständig aus der Ferne steuern. 34 Kameras fotografieren täglich die verschiedenen Pflanzen und geben Partnern und Experten aus der ganzen Welt die Möglichkeit, das Pflanzenwachstum am Südpol zu beobachten und dem Missionsteam Feedback zu geben.

Trotz der harschen Bedingungen werden bis Mitte November 2018 rund 270 Kilogramm Gemüse produziert und geerntet. Die über 20 angepflanzten Sorten sind eine willkommene Abwechslung auf dem Speiseplan der Crew. Mit fast 260 Tagen Isolation, über 15 System- und Validierungstests, mehr als 20 durchgeführten wissenschaftlichen Experimenten und über 40 Tests von Prozeduren markiert die antarktische Mission den Höhepunkt des EDEN-ISS-Forschungsprojekts. Die Erfahrungen sind für ein robustes und zuverlässig funktionierendes Gewächshaus auf Mond und Mars und für die Pflanzenzucht in den Wüsten der Erde außerordentlich wichtig.

Derweil wird das EDEN-ISS-Gewächshaus mit Unterstützung der neuen Überwinterungsmannschaft aus dem AWI weiterbetrieben. Zukünftig soll es als internationale Forschungsplattform auch anderen Forschungsgruppen offen stehen. Diese können dann ihre Technologien, Kultivierungsmethoden und Prozeduren unter realistischen Isolationsbedingungen in der Antarktis erproben.

**Dr. Daniel Schubert** arbeitet im DLR-Institut für Raumfahrtssysteme und ist dort Leiter der Forschungsgruppe EDEN. Mit dem Projekt EDEN-ISS hat sich ein langgehegter Traum von ihm erfüllt: ein solches System unter realen Bedingungen in der Antarktis zu testen.



Die Service Section von EDEN-ISS beherbergt eine Luftschleuse (blauer Bereich) zum Wechseln der Antarktisbekleidung. Daneben (rot) der Bereich für das Atmosphärenmanagement-, das Nährstoffversorgungs-, das Thermalregulierungs- und das Datahandlungssystem. Im Future Exploration Greenhouse (FEG) wird auf 12,5 m<sup>2</sup> Anbaufläche frische Nahrung produziert.

Service Section Container

FEG Container

## DIE ANZUCHTKAMMER DES GEWÄCHSHAUSES

Das Forschungsgewächshaus ist vollgepackt mit modernen **Kultivierungssystemen** (Controlled Environment Agriculture, CEA). Diese ermöglichen ein unabhängiges und beschleunigtes Pflanzenwachstum innerhalb der Anzuchtkammer – im sogenannten Future Exploration Greenhouse (FEG).

Das vollautomatische **Nährstoffversorgungssystem** stellt zwei genau abgestimmte Nährstofflösungen zur Verfügung – eine für vegetative Pflanzen wie Blattsalate, Basilikum und Petersilie und eine Lösung für fruchtbildende Pflanzen wie Tomaten, Gurken und Paprika. Ein Mischcomputer stellt über verschiedene Mikropumpen die exakte Nährstoffmenge für die Pflanzen zusammen und passt den pH-Wert der Nährlösung an. Dann sprühen acht Hochdruckpumpen den feinen Nährstoffnebel in das lichtdichte Wurzelkompartiment jedes Pflanzgefäßes. Die Wurzeln hängen frei in der Luft und können den Nährstoff-Wassermix direkt aufnehmen. Diese erdelose Bewässerungsmethode wird **Aeroponik** genannt und ist sehr ressourceneffizient.

Das interne **Atmosphärenmanagementsystem** regelt die Temperatur auf 20 Grad Celsius, die Luftfeuchtigkeit auf 65 Prozent und sprüht aktiv Kohlendioxid (1.000 ppm) in den Anzuchttraum ein. Die Pflanzen benötigen das Kohlendioxid für ihren Fotosyntheseprozess. Der Luftstrom zirkuliert innerhalb des Gewächshauses und wird dabei durch verschiedene Filtersysteme gereinigt (Vor-, HEPA- und Aktivkohlefilter). Das von den Pflanzen ausgeschwitzte Wasser wird vom System zurückgewonnen und in das Nährstoffversorgungssystem erneut eingespeist, wodurch sich der Wasserkreislauf schließt. Das einzige Wasser, das das System verlässt, steckt in der Biomasse der geernteten Salate, Kräuter und Früchte.

Das künstliche **Beleuchtungssystem** besteht aus speziell entwickelten LEDs. Insgesamt sind 42 LED-Leuchten im Gewächshaus eingebaut. Mit den Wellenlängen Blau, Rot, Tiefrot und Weiß kann das Lichtspektrum jeder LED-Lampe individuell an den Pflanzentyp angepasst werden. Die LEDs sind wassergekühlt und schaffen so thermische Stabilität im Kultivierungsraum. Ein innovatives Thermalkontrollsystem sorgt für ausreichende Wärmeabfuhr auf dem Dach des Gewächshauses.



Willkommen: frische Ernte in der Stationsküche



Bild: Esther Horvath, AWI

Die Wurzeln hängen in der Luft und werden in regelmäßigen Abständen mit einem Wasser-Nährstoffmix besprüht



Bild: Hanno Müller

Blick von unten auf die wassergekühlten LED-Systeme, sie beleuchten die Pflanzen in einem genau abgestimmten Tag-Nacht-Rhythmus



Paul Zabel freut sich über seine erste Salaterrnte

# SALAT AUF SCHLITTENFAHRT

Mit dem DLR-Antarktischgärtner Paul Zabel im Gespräch

**Herr Zabel, Sie sind nun schon wieder einige Monate in Deutschland, nachdem Sie ein Jahr für die Forschung in der Antarktis verbracht haben. Was hat Sie am meisten berührt, als Sie wieder heimischen Boden unter den Füßen hatten?**

■ Im ersten Moment war ich überwältigt von den ganzen Sinnesindrücken. Die Gerüche und die Geräusche der Zivilisation waren sehr erdrückend in den ersten Tagen. Es ist gar nicht so leicht, sich nach einer Überwinterung in Abgeschiedenheit wieder in einer Großstadt und deren Verkehr zurechtzufinden. Es war jedoch sehr schön Freunde, Familie und Kollegen wiederzutreffen. Ich hatte zwar viel Kontakt per Telefon und auch die eine oder andere Videoübertragung, trotzdem ist es etwas komplett anderes, seine Familie wiederzusehen und in den Armen halten zu können.

**Warum der Aufwand, ein Jahr in der Antarktis zu verbringen, um die Pflanzenzucht in einem Gewächshauscontainer zu testen? Hätte man das nicht auch in angenehmeren Gegenden auf der Erde untersuchen können?**

■ Wir wollten unser Gewächshaus unter möglichst realistischen Bedingungen testen, es musste also genauso isoliert stehen, wie es auch bei einer Mission zum Mond oder Mars der Fall wäre. Die Neumayer-Station III war für mich deshalb wie ein Raumschiff auf einem anderen Planeten. Ohne eine solche Station könnten Menschen in der Antarktis nicht lange überleben. Man ist genauso angewiesen auf Technik wie während einer bemannten Raumfahrtmission. Alle müssen zusammenarbeiten und jeder ist auf jeden angewiesen. Die Größe der Besatzung von nur neun Personen in den Wintermonaten ist der bei einer bemannten Raumfahrtmission ebenfalls ähnlich. Die Station wird nur während der dreieinhalb Sommermonate mit Lebensmitteln versorgt. Das restliche Jahr ist die Besatzung auf gefrorene, getrocknete und konservierte Lebensmittel angewiesen. Ein schneller Gang in den nächsten Elektronikmarkt oder eine kurzfristige Onlinebestellung sind dementsprechend nicht möglich. Das ist auch ein typisches Szenario in der Raumfahrt. Mit unserem Gewächshaus können wir viele frische Lebensmittel bereitstellen, die sonst für neun Monate nicht zur Verfügung stehen würden.

**Wie sehr hat die extreme Umwelt die Gewächshaustechnik beeinflusst?**

■ Das antarktische Klima ist schon beim Design des Gewächshauses und auch bei der Auswahl einiger Komponenten zu berücksichtigen. Die Umweltbedingungen beeinflussen jedoch in erster Linie das

Arbeiten vor Ort. Der tägliche Blick auf die Wettervorhersagen für den aktuellen und die kommenden Tage war unumgänglich. Das Wetter ändert sich gerade in den Wintermonaten innerhalb weniger Tage von gutem Wetter zu orkanartigen Stürmen. Das musste ich immer im Blick behalten, denn manche Arbeiten lassen sich bei schlechtem Wetter nicht durchführen. Wenn ich die Ernte in einer Thermobox verpackt auf einem kleinen Kunststoffschlitten hinter mir her zur Station zog, konnte dieser bereits bei mäßigem Wind davongeweht werden.

**Gemüse zucht ohne Erde mit künstlichem Licht und einer per Computersteuerung gemixten Nährlösung – das klingt schon sehr nach Raumfahrt. Haben das denn alle Pflanzen gut vertragen?**

■ Insbesondere die Salatpflanzen und anderes Blattgemüse gedeihen sehr gut. Mit dem Anbau der Tomaten- und Gurkenpflanzen sind wir auch mehr als zufrieden. Probleme bereiteten uns die Paprikapflanzen und die Erdbeeren. Beide Pflanzenarten wuchsen sehr gut und bildeten viele Blüten aus. Jedoch kamen bei den Paprikapflanzen nur wenige und bei den Erdbeeren gar keine Früchte aus ihnen hervor. Wir sind aktuell in der Auswertung mit unserem holländischen Projektpartner, um herauszufinden, woran das gelegen haben könnte.



Erdbeerwurzeln in einem sterilen Agrarmedium

**Wie hat die Crew denn die erste Ernte „Made in Antarctica“ angenommen? Wie schmeckt Antarktischgemüse?**

■ Das war ein großartiges Gefühl! Die jahrelange Arbeit im Projekt und auch die anstrengenden Tage vor Ort haben sich da das erste Mal ausgezahlt. Das frische Gemüse kam sehr gut bei allen Überwinterern an. Tomaten, Gurken und Kräuter waren die Favoriten. Das Gemüse schmeckt ganz normal, wobei selbstangebautes Gemüse dann doch immer besser schmeckt als aus dem Laden. Es war schön mit anzusehen, wie man mit so etwas Einfachem wie Salat Menschen glücklich machen kann.

**Wie kann man sich so einen typischen Tag des Paul Zabel mitten in der ewigen Dunkelheit und eisigen Kälte der Polarnacht vorstellen? Haben Sie ohne richtigen Sonnenaufgang denn auch mal verschlafen?**

■ Vormittags war ich meistens im Labor in der Neumayer-Station III. Zuerst habe ich jeden Tag nachgesehen, ob mit dem Gewächshaus und den Pflanzen alles in Ordnung ist. Das konnte ich über unser Steuerungssystem und die angebrachten Kameras ganz gut beurteilen. Den restlichen Vormittag habe ich mit der Vorbereitung von Experimenten oder auch mit dem Mischen der Nährlösung verbracht. Nach dem Mittagessen bin ich ins Gewächshaus gegangen und habe dort die Systeme überprüft und gewartet, Pflanzen gesät und geerntet und Experimente durchgeführt. Insgesamt habe ich jeden Tag, auch an den meisten Wochenenden und Feiertagen, ungefähr vier Stunden im Gewächshaus verbracht. Viel Zeit war auch nötig, um die Technik des Gewächshauses zu warten. Vor allem in den ersten Betriebsmonaten hatte ich mit den verschiedenen Subsystemen zu kämpfen. Dabei musste ich schnell reagieren. Es ist mehr als einmal vorgekommen, dass ich Freitagabend ins Gewächshaus gehen musste, um ein ausgefallenes System zu reparieren. Außerdem waren auch noch Experimente für unsere Projektpartner durchzuführen. Beispielsweise musste ich einmal im Monat mikrobiologische Proben von den Oberflächen, von den Pflanzen und von der Nährlösung nehmen. Mehrmals in der Woche stand ich in Kontakt mit meinen Kollegen in unserem Missionskontrollraum in Bremen. Und was die Polarnacht angeht: Da hat sich mein Tagesrhythmus schon etwas verschoben. Ich bin deutlich später als normal aufgestanden, bin dafür aber auch abends länger wach geblieben. Verschlafen gibt es aber in dem Sinne nicht, dann muss man eben am Abend länger arbeiten, um alles zu erledigen.



Die Forscher bekommen Besuch von zwei Adelië-Pinguinen

**Neun weitere Überwinterer verbrachten mit Ihnen das Jahr in der Antarktis auf der Neumayer-Station III des Alfred-Wegener-Instituts. Wie oft sieht man sich denn überhaupt am Tag?**

■ Dadurch, dass jeder Überwinterer seinen eigenen Aufgabenbereich hat, sieht man sich tagsüber nur selten. Wir haben in unserem Team jedoch eine gemeinsame Zeit für Mittag- und Abendessen festgelegt. Bei schwierigen und aufwändigen Arbeiten haben wir uns natürlich gegenseitig unterstützt. Dadurch konnte ich Einblicke in verschiedene Bereiche wie Stationstechnik, Meteorologie, Geophysik, Luftchemie und Meereisphysik bekommen. Wenn es das Wetter zugelassen hat, haben wir gemeinsame Ausflüge zur nahegelegenen Kaiserpinguin-Kolonie unternommen oder haben die Umgebung der Station mit Schneemobilen und Pistenraupen erkundet.

**Würden Sie noch einmal in die Antarktis zurückkehren, wenn sich die Gelegenheit dazu böte? Wie geht es dem EDEN-ISS-Gewächshaus derzeit und wie geht es weiter?**

■ Mich hat nahezu alles in der Antarktis beeindruckt. Angefangen mit den immer wechselnden Wetterbedingungen, Stürmen, Kälte, wochenlangender Dunkelheit, wochenlang keiner Dunkelheit, über die Schneeformationen, die sich nach Stürmen bilden, bis zu dem fantastischen Sternenhimmel bei minus 35 Grad Celsius klirrender Kälte. Ich würde auf jeden Fall wieder zurückkehren, um dort zu leben und zu arbeiten!

Was das Gewächshaus betrifft, es steht noch immer an seinem angestammten Ort. Momentan wird es von der jetzigen Überwinterungsmannschaft betrieben. Sie baut dort weiterhin frisches Gemüse an. Im nächsten Jahr sollen auch wieder Mitglieder aus unserem Projektteam anreisen, um die Forschungen weiterzuführen. Aktuell arbeiten wir intensiv an der Auswertung des letzten Jahres und haben bereits viel über den Betrieb eines zukünftigen Weltraumgewächshauses gelernt. Mit diesen Erkenntnissen wollen wir das Gewächshaus in der Antarktis Schritt für Schritt weiter verbessern.

**Das Gespräch führte Falk Dambowsky, Redakteur DLR-Media Relations (Luftfahrt, Raumfahrt).**

# DER VIRTUELLE WEG ZUR ZULASSUNG



**W**er ein Flugzeug in die Luft, eine Rakete ins All, ein Auto auf die Straße oder einen Zug auf die Schiene bringen will, der hat einen langen Weg vor sich. Denn nicht nur die Entwicklung neuer Technologien und Fahrzeuge kostet die Wissenschaftler und Hersteller viel Zeit, auch der Zulassungsprozess erstreckt sich oft über viele Jahre. Doch was, wenn all die Testfahrten und Flugversuche für eine Zulassung gar nicht mehr nötig wären, wenn ein Großteil der geforderten Nachweise virtuell im Computer erbracht werden könnte?

DLR-Querschnittsprojekt Simulation Based Certification: 15 DLR-Institute und Einrichtungen arbeiten an einem Werkzeug für die digitalisierte Zertifizierung

Von Yvonne Buchwald

Hätte der Airbus A380 zu seinem Erstflug schon im Rechner abheben dürfen, so hätte der Flugzeughersteller sicher keine 800 Testflüge durchgeführt. Einige der 2.600 Flugstunden sowie ein großer Teil des fünfjährigen Testprogramms und der hohen Kosten wären nicht notwendig gewesen. Und nicht zuletzt: Das Risiko für die Testpiloten und Maschinen wäre noch weiter reduziert worden. Doch zurzeit muss ein Flugzeug, muss jedes Fahrzeug und Produkt, das auf den Markt kommen soll, für die Betriebsgenehmigung eine ganz physische, greifbare Prozesskette durchlaufen, um gegenüber den zuständigen Behörden den Nachweis zu erbringen, dass alle geforderten Sicherheits- und Umweltvorschriften erfüllt werden. „Wir können heute ein Flugzeug oder Fahrzeug im Computer entwerfen und Aussagen darüber treffen – obwohl es nicht real existiert. Bei der Zulassung aber braucht man bislang ein echtes Produkt, das auf Herz und Nieren geprüft werden kann“, erklärt Sven Geisbauer vom DLR-Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik. Der Luft- und Raumfahrt-Ingenieur leitet das DLR-Querschnittsprojekt Simulation Based Certification (SimBaCon) und erläutert: „Immer noch werden Tests überwiegend real durchgeführt, die Skepsis gegenüber Computerdaten ist bei den Zulassungsbehörden nach wie vor groß.“ Und das aus gutem Grund. Denn bis heute sei die Verlässlichkeit von Simulationsdaten für eine Zulassung nur in wenigen, ausgewählten Fällen nachgewiesen worden. Das wollen die Forscher aus 15 Instituten und Einrichtungen des DLR ändern. Sie arbeiten interdisziplinär daran, numerische Simulationsverfahren aus Luftfahrt, Raumfahrt, Energie und Verkehr derart weiterzuentwickeln, dass sie von den Behörden als zulässiges Werkzeug zur Nachweisführung akzeptiert werden.

## Von der ersten Analyse bis zur virtuellen Erprobung

Wie das gehen soll, erklärt Sven Geisbauer Schritt für Schritt: „Als Erstes müssen wir wissen, was genau die Behörden eigentlich benötigen, welche Anforderungen es für die Zulassung gibt.“ Eine Analyse also. Die Wissenschaftler wollen zunächst ermitteln, in welchen Bereichen es Potenziale zur Kosten- und Zeitersparnis gibt. Dann soll ein Anforderungskatalog erstellt werden, auf den hin die Simulationsverfahren ausgerichtet werden können. Steht fest, was genau für eine Zertifizierung nötig ist, werden die Wissenschaftler erste Vergleiche zwischen Realversuchen und Fahr- oder Flugtests im Computerlabor anstellen. Anschließend wird die digitalisierte Nachweisführung im Rechner für Bauteile, Teilsysteme und schließlich möglichst auch für Gesamtsysteme wie Triebwerke, Flugzeuge, Autos und Züge erprobt und demonstriert. „Die Virtualisierung soll in möglichst vielen Prozessen der Produktentwicklung greifen – vom ersten Entwurf über die Entwicklung von Materialien und Komponenten bis hin zum gesamten luft- oder bodengebundenen Fahrzeug“, führt Geisbauer aus. So ließe sich ein Produkt von Anfang an viel besser gemäß den Anforderungen aus Produktion, Zulassung und Betrieb entwerfen.



## BETEILIGTE AN SIMBACON

Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik  
Institut für Aeroelastik  
Institut für Antriebstechnik  
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptionik  
Institut für Flugsystemtechnik  
Institut für Verbrennungstechnik  
Institut für Werkstoff-Forschung  
Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie  
Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik  
Institut für Fahrzeugkonzepte  
Institut für Verkehrssystemtechnik  
  
Flugexperimente  
Raumflugbetrieb und Astronautentraining  
Simulations- und Softwaretechnik  
Systemhaus Technik

Die Virtualisierung soll in immer mehr Prozessen der Forschung und Entwicklung greifen – bis hin zur digitalisierten Zulassung



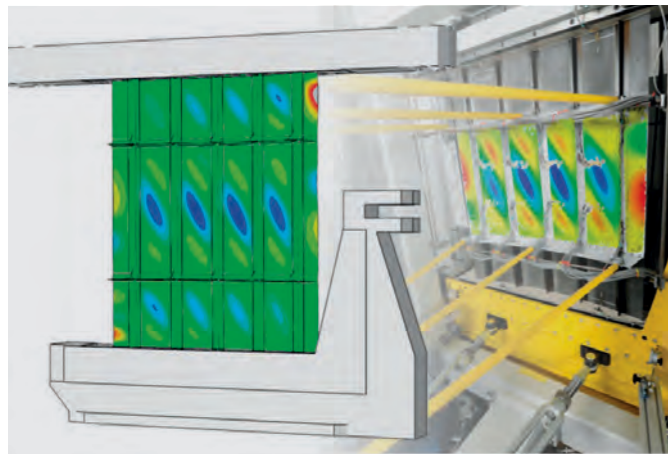
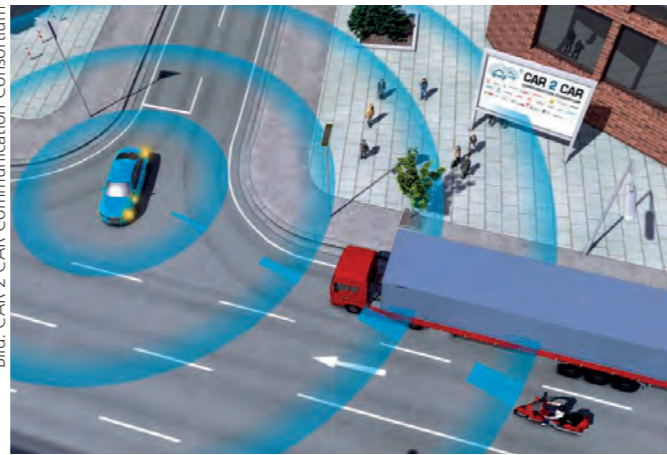


Bild: CAR 2 CAR Communication Consortium



Virtuelle Tests werden auch für den bodengebundenen Verkehr immer wichtiger, etwa bei der Entwicklung und Erprobung von Fahrerassistenzsystemen

Materialkontrolle an einer Beulanlage – hier als virtueller und physischer Prüfstand

Am Ende dieses anspruchsvollen Prozesses stehen behördlich abgestimmte, technisch entwickelte und realisierte, digitale (Simulations-) Werkzeuge, mit denen die Nachweise für eine Zulassung erbracht werden können. In den Simulationen sollen dann „echte“ Fahrzeuge, Komponenten und Systeme zum virtuellen Erstflug abheben beziehungsweise zur ersten Testfahrt ausrollen dürfen und ihre Zertifizierung simulationsbasiert erhalten.

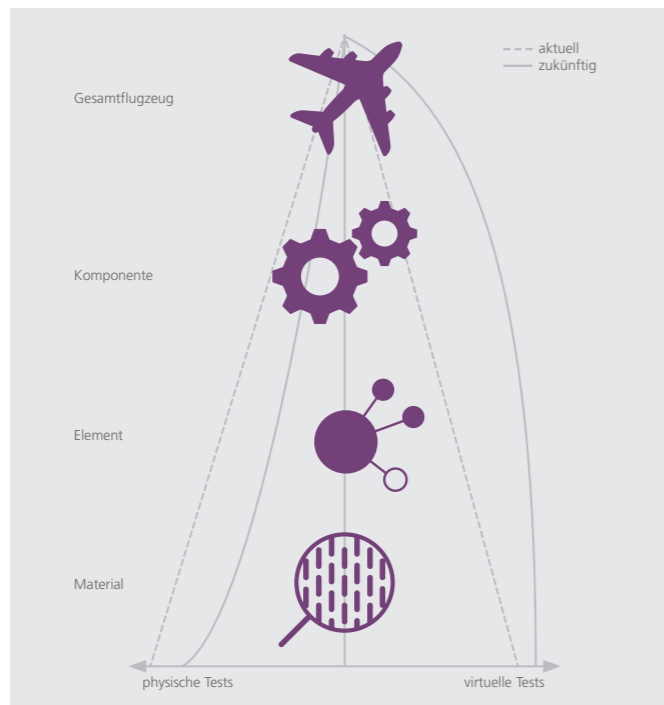
#### Kosten sparen und Risiken minimieren

Der Nutzen liegt klar auf der Hand: Reale – also langwierige, teure und nicht selten auch mit Risiken behaftete – Flug- und Fahrversuche können eingespart werden. „Durch die teilweise oder langfristig sogar vollständige Einführung der numerischen Simulation in den Zulassungsprozess werden Zeit- und Kostenrisiken derart reduziert, dass wir damit sämtliche Prozesse entscheidend verbessern und so die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie stärken“, fasst Professor Cord Rossow den Auftrag des DLR und die Intention der Digitalisierungsinitiative zusammen. Das DLR entwickelt seit mehr als drei Jahrzehnten hochgenaue numerische Simulationsverfahren sowie Software und verfügt zudem über die erforderlichen Hochleistungsrechner sowie fortschrittlichste Messtechnik, Prüfstände, Windkanäle und eine Flotte von Flugzeugen. „Dies versetzt uns, als eine von nur wenigen Forschungseinrichtungen weltweit, in die Lage, die entwickelten Simulationsverfahren umfassend überprüfen, bestätigen und verbleibende

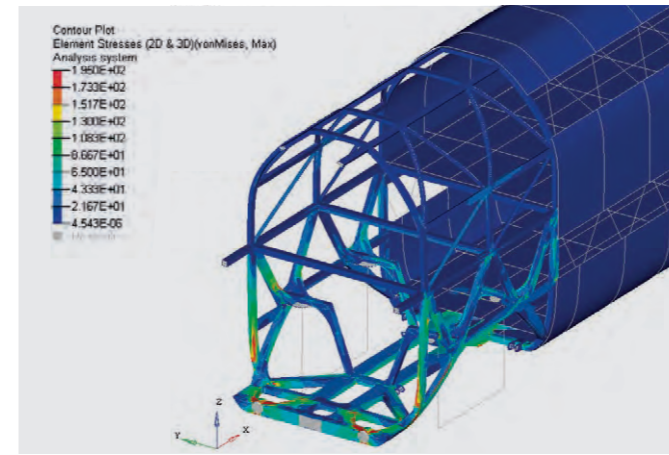
Unsicherheiten ermitteln zu können. Wenn alle DLR-Forschungsaktivitäten zur numerischen Simulation aus den Bereichen Luftfahrt, Raumfahrt, Energie und Verkehr zusammengeführt werden, sind wir in der einzigartigen Position, die Herausforderungen einer Simulation Based Certification zu meistern“, ist sich der Leiter des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik und Koordinator des Querschnittsprojekts sicher.

Dafür haben die DLR-Forscher neue Wege beschritten: Aus 33 wissenschaftlichen Abteilungen sechs verschiedener DLR-Standorte haben sie sich unter Federführung des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik zusammengetan, um Synergien zu schaffen. „Mit dem Querschnittsprojekt können wir aus dem Innovationspotenzial des gesamten DLR schöpfen und voneinander profitieren“, erklärt Geisbauer. Auch wenn die Zertifizierungen in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie und Verkehr auf den ersten Blick sehr unterschiedlich aussehen, könnten die einzelnen Bereiche aus dem Zusammenschluss in bisher nicht praktizierter Weise Nutzen ziehen.

Dazu wurde das Querschnittsprojekt zunächst in sieben Zielfelder gegliedert, in denen die jeweiligen fachlichen und technischen Kompetenzen gebündelt werden sollen. Die Zielfelder sprechen für sich: Flugzeuge, Hubschrauber, Raumfahrzeuge, bodengebundenen Verkehr, Software, Bauweisen und Strukturen sowie Triebwerke und Gasturbinen – in allen Schwerpunkten wird es um die Weiterentwicklung und Verbesserung von Simulationsverfahren, aber



Die Testpyramide aus dem Bereich Luftfahrt zeigt die Entwicklungsschritte von ersten Materialtests über die Entwürfe und Erprobungen einzelner Elemente und Komponenten bis hin zum Gesamtsystem Flugzeug. Zukünftig soll die physische Nachweisführung für Zertifizierungen durch virtuelle Tests vermehrt ergänzt, langfristig vielleicht sogar ersetzt werden.



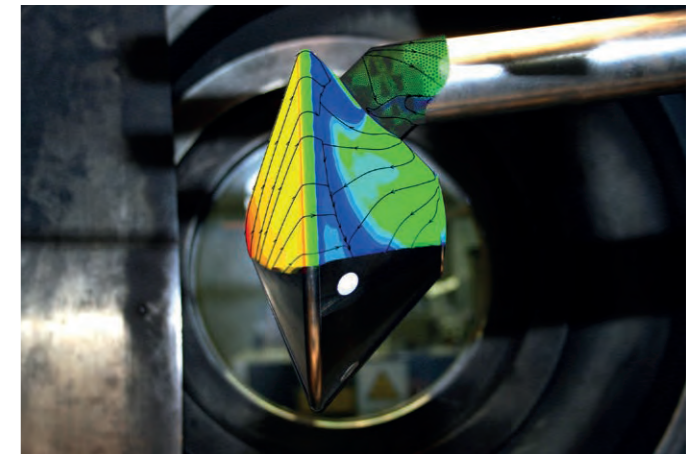
Anhand einer Simulation lässt sich die Strukturbelastung am Wagenkasten eines Zuges prüfen. Die roten Bereiche zeigen hoch beanspruchte Bauteile.

auch um einzelne themenbezogene Herausforderungen gehen. Beispielsweise die Simulation kompletter Flugmanöver von freifliegenden Hubschraubern oder die Simulation von Material- und Strukturverhalten bei einem Hochgeschwindigkeitsaufprall beziehungsweise Zusammenstoß von Fahrzeugen. Geisbauer: „Am Ende werden wir unsere Gemeinsamkeiten übergreifend identifizieren, um mit unserem gebündelten Wissen wichtige Themen besser adressieren zu können, als es heutzutage der Fall ist.“

#### Ziel: realitätsgetreue Simulation

Die Vision des virtuellen Produkts, also eines gesamten digitalen Lebenszyklus vom ersten Entwurf über Entwicklung, Zulassung und Wartung bis hin zur Außerbetriebnahme eines Flug- oder Fahrzeugs, hat Sven Geisbauer dabei immer vor Augen. Allerdings sind ihm auch die damit einhergehenden Herausforderungen bewusst: „Eine Zulassung ausschließlich basierend auf Simulationsdaten, das heißt ohne weitere Flug- oder Bodenversuche, liegt noch in weiter Ferne“, so der Projektleiter. Aber: „Wir können schon heute sehr viele, zum Teil kritische Flug- und Fahrbedingungen simulieren.“ Ein Beispiel: Um den Passagieren während des Fluges einen Internetzugang zu ermöglichen, werden heutzutage große Antennen auf der Rumpfoberseite des Flugzeugs montiert. „Im Vorfeld einer solchen Modifikation muss nachgewiesen werden, dass sich die Umströmung des Flugzeugs durch eine solche Antenne nicht wesentlich verändert und dass weiterhin alle Sicherheitsanforderungen erfüllt werden“, führt Geisbauer aus. Auf herkömmliche Art werde dafür mittels Flugversuchen nachgewiesen, dass innerhalb der Flugbereichsgrenzen keine Beeinträchtigungen, etwa Vibrationen, am Flugzeug auftreten. Die Zulassungsvorschrift verlangt in diesem Fall explizit Flugversuche. Doch heutzutage werden von den Behörden auch schon Simulationsdaten akzeptiert. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass im Vorfeld in Abstimmung mit den Behörden nachgewiesen wurde, dass das zugrunde liegende Simulationsverfahren tatsächlich in der Lage ist, die strömungsphysikalischen Vorgänge korrekt abzubilden. Für den Hersteller bedeutet das am Ende: Kosten und Risiken lassen sich minimieren.

Die Zeiten, in denen ein Testpilot in der Luftfahrt für alle erforderlichen Sicherheitsnachweise risikoreiche Flugmanöver an den physikalischen Grenzen wagen musste, sind lange vorbei. Anhand von Bodentests und Simulationsrechnungen kann heutzutage in vielen Bereichen recht genau vorausgesagt werden, ob ein Flugzeug die



Experimentelle und numerische Simulation des Eintritts einer Landekapsel in die Marsatmosphäre

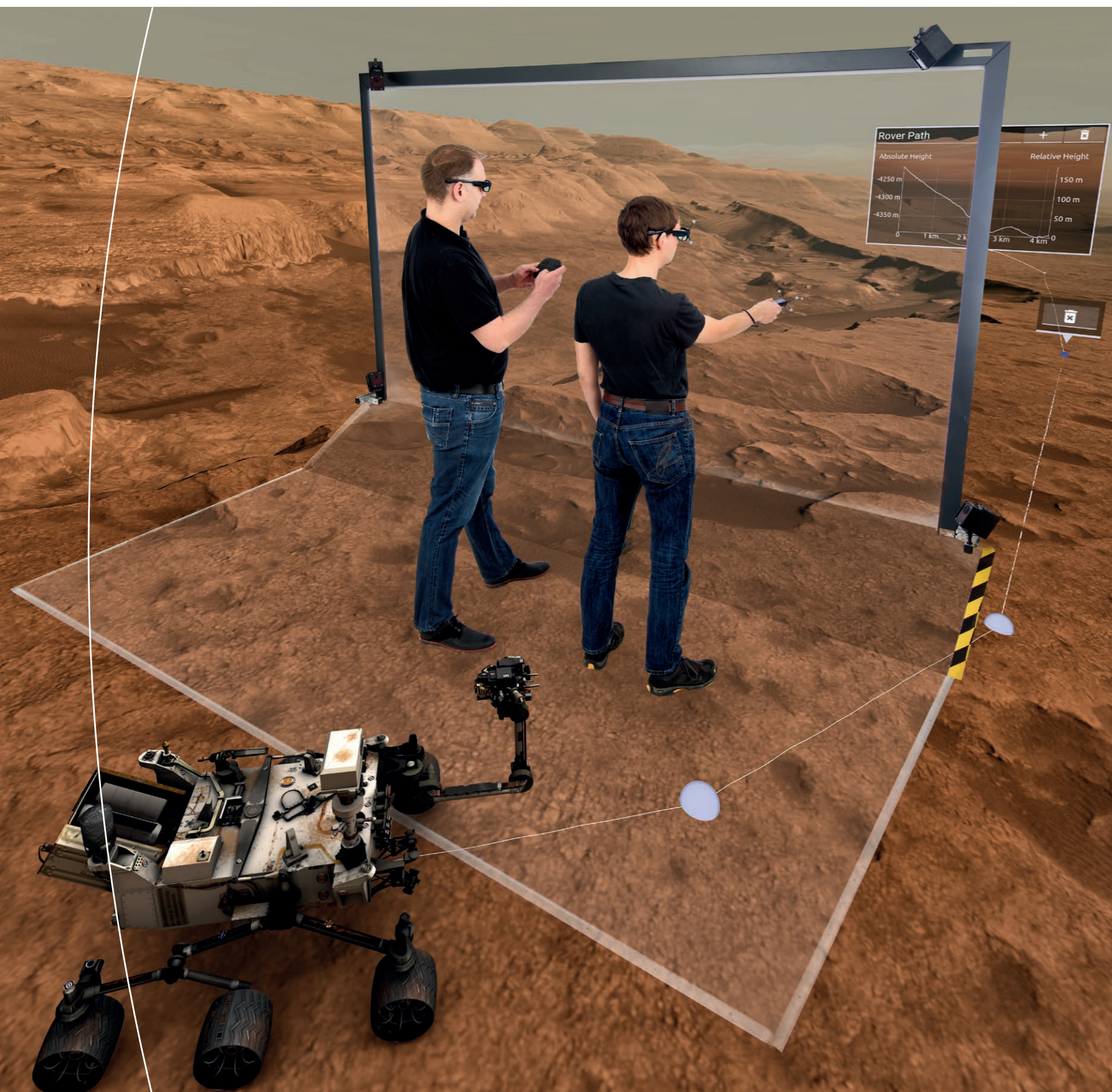
vorgesehene Auslegung und Belastbarkeit erreicht. Diese muss der Testpilot dann – mit einem gewissen Sicherheitsabstand – bis zu jenen berechneten Grenzwerten demonstrieren. Hier knüpfen die Wissenschaftler an und verbessern ihre numerischen Verfahren, um eben solche kritischen Punkte noch genauer definieren und damit auch die Entwicklung des Flug- oder Fahrzeugs sowie die Zulassung beeinflussen zu können.

„Bis die Simulationen an unseren Bildschirmen mit dem realen Verhalten von Fahrzeugen vollständig übereinstimmen und sich wirklich alle Zustände abbilden lassen, wird es noch dauern“, resümiert Geisbauer. „Doch mit unserem interdisziplinären Ansatz und der stetig wachsenden Rechenleistung können wir schon jetzt Vertrauen in unsere Computerdaten aufbauen und zeigen, dass wir in einigen Jahren in der Lage sein werden, Zulassungsprozesse mit modernen numerischen Verfahren zu digitalisieren.“ Ausgestattet ist das Querschnittsprojekt dafür mit Mitteln im Gesamtvolumen von 26 Millionen Euro aus der Grundfinanzierung des DLR. Es soll zunächst vier Jahre, von 2018 bis 2021, laufen. Ausgelegt und geplant sind aber auch schon die Folgeschritte für die kommenden Jahrzehnte, denn die Forscher wollen nicht nur innovativ, sondern vor allem vorausschauend arbeiten.

**Yvonne Buchwald** ist im DLR-Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik verantwortlich für die interne und externe Kommunikation.

#### DLR-QUERSCHNITTSPROJEKTE: ÜBERBLICK

- Global Connectivity – Globaler Breitbandzugriff
- Factory of the Future (DLR-Magazin 159, November 2018)
- Simulation Based Certification
- Big-Data-Plattform (DLR-Magazin 160, März 2019)
- Condition Monitoring for Safety Relevant Structures
- Cyber-Sicherheit für autonome und vernetzte Systeme
- Verkehr 5.0
- Digitaler Atlas
- GigaStore
- Future Fuels (DLR-Magazin 158, Juli 2018)



Missionsplanung der Zukunft: Mit Hilfe von Virtual-Reality-Technologie können Wissenschaftler an weit entfernte Orte reisen, ohne ihren Arbeitsplatz zu verlassen. Ein möglicher Anwendungsfall ist die gemeinsame Planung von Fahrtrouten für Rover auf anderen Planeten.

# DAS SONNENSYSTEM ZUM GREIFEN NAH

**1. April 2029: Gespannt sitzen wir in unserem Büro im DLR-Institut für Planetenforschung und betrachten mit unseren Virtual-Reality-Brillen die neuesten Bilder der Marsoberfläche, die gerade von einem Rover der Europäischen Weltraumorganisation ESA zur Erde gefunkt wurden. Der Rover ist Teil des internationalen Programms zur Probenrückholung vom Mars und soll Behälter mit Gesteins- und Bodenproben einsammeln, die vor acht Jahren der Mars-2020-Rover der NASA im Jezero-Krater entnommen und dort deponiert hat. Es sind nur noch wenige Hundert Meter bis zu der Stelle, wo die Proben vor acht Jahren abgelegt wurden! Wir haben die Aufgabe, den Rover zu den Probenbehältern zu steuern. Zusammen mit Kollegen der ESA in Darmstadt und der NASA am JPL in Pasadena, deren virtuelle Avatare wir im Jezero-Krater treffen, diskutieren wir gemeinsam „vor Ort“ über den besten Weg des Rovers zu den Proben. Mühelos können wir von der Roverperspektive zu den Bildern aus der Umlaufbahn wechseln, die in den letzten Jahren von der gesamten Umgebung aufgenommen wurden. Wir analysieren die dreidimensionalen Daten und legen die Route fest: Liegen irgendwo größere Steine im Weg? Ist der Abhang auf dem geplanten Pfad nicht doch zu steil? Gibt es unterwegs wissenschaftlich interessante Gesteinsformationen, die einen Zwischenaufenthalt und spezielle Untersuchungen erfordern? Mit wenigen Gesten vermessen wir das virtuelle Gelände. Ein Ingenieur macht sich Sorgen über die Dauer der Fahrt – werden wir das geplante Ziel bis zum Sonnenuntergang erreichen? Wir lassen eine virtuelle Kopie des Rovers mittels einer Simulation den optimalen Weg finden. Im Zeitraffer lassen wir die Visualisierung schneller ablaufen und beobachten gespannt den Stand der Sonne am Himmel ... und tatsächlich, kurz bevor sie untergeht, wird der Rover sein Ziel erreicht haben.**

Ernst Hauber, Planetenforscher im DLR

## Virtual Reality für die Planung zukünftiger Weltraummissionen

Von Simon Schneegans und Markus Flatken

Forscher, die eine zukünftige Mars-Mission mit dem Ort des Geschehens vor Augen planen, ohne dabei ihren Arbeitsplatz zu verlassen, sollen bald keine Zukunftsvision mehr sein. Mittels Virtual-Reality-Technik (VR) sollen sie auf der Oberfläche ferner Planeten umherwandern und dort Rover-Missionen sorgfältig vorbereiten, Entfernungen vermessen oder Landestellen identifizieren können. Dazu entwickeln Planetenwissenschaftler und Softwareingenieure des DLR gemeinsam die Software CosmoScout VR, mit der man virtuell durch das Sonnensystem und zu einzelnen Planeten reisen kann.

### Große Datenmengen müssen miteinander kombiniert werden

Die neue Software made by DLR ist in der Lage, riesige Datensätze ganzer Monde und Planeten detailgenau darzustellen. Diese Stärke ist für die Ingenieure gleichzeitig auch eine der größten Herausforderungen bei der Entwicklung, denn die Menge der Satellitendaten ist mittlerweile so groß, dass sie mit konventionellen Methoden nur noch in Ausschnitten ausgewertet werden können.

Ein Beispiel dafür ist die Sonde Mars Express der Europäischen Weltraumorganisation ESA, die seit 2003 unseren Nachbarplaneten umkreist. Eines ihrer sieben Messgeräte ist die im DLR entwickelte High-Resolution-Stereo-Kamera (HRSC), die hochauflösende Oberflächenaufnahmen des Mars liefert. Allein die Datensätze der von ihr produzierten Bilddaten belaufen sich inzwischen auf etwa fünf Terabyte. Für die wissenschaftliche Analyse benötigen die Forscherinnen und Forscher ein möglichst detailliertes virtuelles Abbild der Realität. Dazu muss die Software verschiedene Datensätze wie Multispektraldaten, simulierte Atmosphärendaten oder Untergrund-Radardaten kombinieren. Die Daten kommen meist aus unterschiedlichen Missionen. In der Summe umfasst die Datenbasis für eine Analyse dann oft mehrere Hundert Gigabyte bis

CosmoScout VR ist ein virtuelles 3D-Sonnensystem, das von Forschern der Einrichtung Simulations- und Softwaretechnik des DLR in Braunschweig entwickelt wird.

Begonnen hatten die Arbeiten daran unter dem Namen „Terrain Renderer“ im Rahmen des EU-Projekts CROSSDRIVE (Collaborative Rover Operations and Satellites Science in Distributed Remote and Virtual Environments). Seitdem wurde die Software kontinuierlich weiter verbessert. Sie simuliert nun nicht mehr nur den Mars, sondern das komplette Sonnensystem.

CosmoScout VR verwendet OpenGL zur Darstellung des Sonnensystems und läuft unter Windows und Linux. Der Quellcode ist unter der MIT-Lizenz frei verfügbar.

<https://github.com/cosmoscout>

### Das Sonnensystem ist groß, sehr groß

Eine weitere Herausforderung für die Entwickler ist die unvorstellbare Größe des Sonnensystems. Um die Bewegung von Himmelskörpern zu berechnen, nutzt CosmoScout VR die Softwarebibliothek „SPICE“ der NASA. Zusätzlich entwickelten die DLR-Forscher Algorithmen, mit denen es möglich ist, die Planetenoberflächen bis zu einer Genauigkeit im Millimeterbereich darzustellen. In Anbetracht der immensen Dimensionen des Sonnensystems erfordert dies eine enorme Präzision, die für andere VR-Anwendungen nicht nötig ist. Um schnell durch das komplette Sonnensystem reisen zu können, passt CosmoScout VR die maximale Bewegungsgeschwindigkeit immer an die Entfernung zum nächsten Himmelskörper oder Satelliten an: Befinden sich die Anwender außerhalb des Sonnensystems, bewegen sie sich mit vielen Lichtjahren pro Sekunde, nähern sie sich hingegen einem Planeten oder Satelliten, wird ihre maximale Geschwindigkeit kontinuierlich auf wenige Kilometer pro Stunde reduziert. Dabei folgen sie immer automatisch der Position und Rotation des entsprechenden Himmelskörpers. So können sie aus dem Orbit beobachten, wie sich der Mars einmal pro Tag um die eigene Achse dreht; landen sie jedoch auf der Marsoberfläche, können sie beobachten, wie die Sonne auf- und wieder untergeht. Diese Fortbewegungstechnik ist wichtig, um einerseits die Oberfläche eines Planeten Zentimeter für Zentimeter vermessen zu können und andererseits in wenigen Sekunden von der Planetenoberfläche in eine Umlaufbahn zu fliegen und sich dort einen Überblick zu verschaffen.

Damit die Wissenschaftler mit ihrer Umgebung interagieren können, muss der nächste virtuelle Himmelskörper immer maximal eine Armlänge entfernt liegen. Würde das Sonnensystem immer in einer 1:1-Skalierung dargestellt werden, wäre die virtuelle Planetenoberfläche viel zu weit entfernt, um mit der Simulation effektiv arbeiten zu können. Statt tatsächlich eine virtuelle Strecke von vielen 100 Kilometern zurückzulegen, um in die Planetenumlaufbahn zu gelangen, schrumpft die Software den Planeten. Der Forscher, der durch das Sonnensystem reist, sieht den fußballgroßen Planeten aus der Perspektive eines interplanetaren Riesen vor sich und kann ihn mit seinem ausgestreckten Arm berühren.

### Virtual Reality bietet Vorteile in der Zusammenarbeit

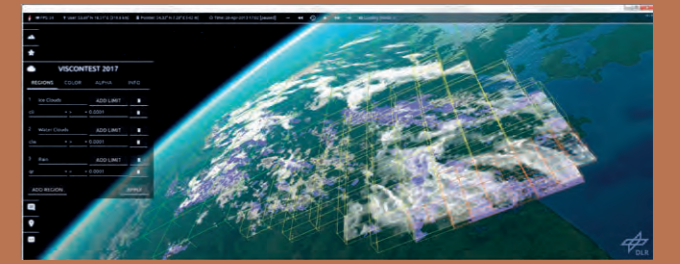
Ein entscheidender Vorteil für den Einsatz der Virtual Reality (VR) bei der Missionsplanung der Zukunft ist, dass beispielsweise bei der Interaktion Gestik und Mimik der Wissenschaftler, die ja an unterschiedlichen Orten arbeiten, mitübertragen werden. So wird die Zusammenarbeit deutlich effizienter. Darüber hinaus besitzt der Wissenschaftler mit der VR-Anwendung ein Werkzeug, mit dem er auf einem fremden Planeten so arbeiten kann, als wäre es ein Feldversuch auf der Erde. Dabei beschränkt sich die Anwendung nicht nur auf ein bloßes Abbild der Realität, sondern sie kann diese um eine Vielzahl von Möglichkeiten erweitern, die in der Realität so gar nicht möglich sind: Beispielsweise können Informationen wie Höhenwerte oder Neigungswinkel zusätzlich eingeblendet werden. Außerdem stehen den Wissenschaftlern effizientere

Mit der VR-Brille wirkt der Mars zum Greifen nah

### VON DEN MONDEN DES MARS BIS ZUR KLIMAFORSCHUNG AUF DER ERDE

Das virtuelle Sonnensystem CosmoScout VR ist universell einsetzbar und nicht auf einzelne Planeten beschränkt. Neben zukünftigen Missionen zu unserem Nachbarplaneten wie Mars 2020 bietet sich die Software auch für Expeditionen zu anderen Planeten an. Beispiele sind die für das Jahr 2020 geplante ESA-Mission JUICE zum Jupiter, die Sonde Martian Moons Exploration (MMX) der japanischen Raumfahrtbehörde JAXA, die Proben des Marsmonds Phobos zur Erde bringen soll, oder die Mission to the Moon der PTScientists GmbH. Auch Missionen im Erdorbit, wie zum Beispiel die Reparatur defekter Satelliten (On-Orbit-Servicing), lassen sich mit CosmoScout VR simulieren.

Natürlich sind auch viele Anwendungsfälle jenseits der Missionsplanung denkbar. In Zusammenarbeit mit dem DLR-Institut für Physik der Atmosphäre arbeiten die Entwickler aus der DLR-Einrichtung für Simulations- und Softwaretechnik aktuell an einer Erweiterung für die Visualisierung und Analyse von Klimasimulationsdaten des Projekts ESCiMo (Earth System Chemistry Integrated Modelling).



Ergebnisse einer Wettersimulation des HD(CP)<sup>2</sup>-Projekts (High definition clouds and precipitation for advancing climate prediction) in CosmoScout VR

Mit CosmoScout VR sollen die etwa zwei Petabyte umfassenden Klimadaten dargestellt, interaktiv erforscht und analysiert werden. Auch die Simulation einer Kamera auf einem Raumfahrzeug ist mit der Software möglich. Sie kann in Echtzeit virtuelle Kamerabilder eines autonomen Landeanflugs erstellen, mit denen die Entwickler ihre Algorithmen überprüfen können. Nicht zuletzt bietet die Software auch Nicht-Wissenschaftlern einen Einblick in die Forschung oder die Möglichkeit, vergangene, aktuelle und zukünftige Weltraummissionen hautnah zu erleben.

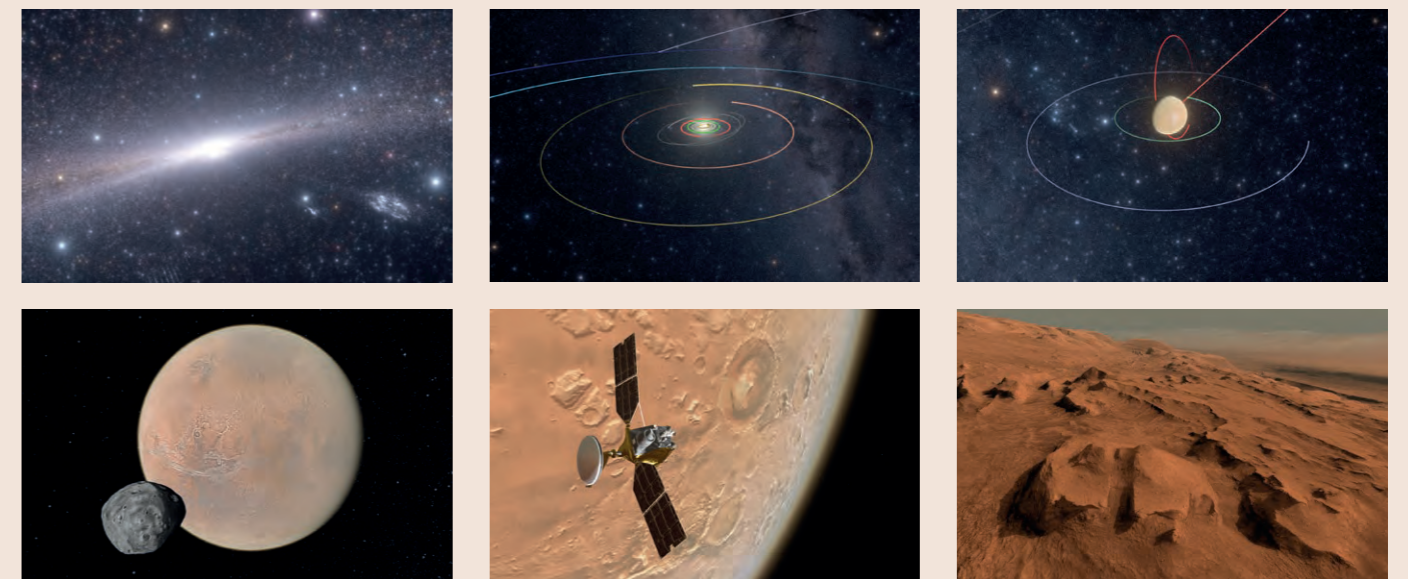
Navigationsmöglichkeiten zur Verfügung – das Reisen mit Überlichtgeschwindigkeit wird möglich.

All das kann in den Arbeitsplatz integriert werden und bringt nicht zuletzt auch Abwechslung in den Arbeitsalltag. Nachteile der Technologie sind hingegen noch die teure Hardware, aufwändige Installationen, indirekte Interaktion mit der virtuellen Szene, kaum mögliches haptisches Feedback und nicht zuletzt das Schwindelgefühl, das viele Nutzer beim Reisen durch den virtuellen Weltraum erleben. Mit CosmoScout VR untersuchen die DLR-Forscher diese Vor- und

Nachteile der VR-Technik und arbeiten an Lösungen, damit diese negativen Begleiterscheinungen des Arbeitswerkzeugs der Zukunft demnächst der Vergangenheit angehören.

**Simon Schneegans** arbeitet in der DLR-Einrichtung Simulations- und Softwaretechnik in der Arbeitsgruppe für interaktive Visualisierung. Er erforscht Verfahren zur fotorealistischen Darstellung von Objekten in Virtual Reality (VR).

**Markus Flatken** entwickelt und erforscht in der gleichen Gruppe Methoden der wissenschaftlichen Visualisierung. Einen Fokus legt er dabei auf die Analyse großer Datensätze unter Verwendung von High-Performance-Computing-Ressourcen.



Diese Bilder sind Momentaufnahmen einer nahtlosen virtuellen Reise durchs All: Der Flug beginnt in den äußeren Bereichen unserer Galaxie, mehrere zehntausend Lichtjahre von der Sonne entfernt (Bild 1). In unserem Sonnensystem werden die Umlaufbahnen der Planeten mit farbigen Ellipsen dargestellt (Bild 2). Das folgende Bild zeigt den Mars. Zu sehen sind sowohl die Bahnen der Monde Phobos und Deimos als auch die stark elliptische Bahn von Mars Express in Rot (Bild 3). Bild 4 zeigt den Mars zusammen mit Phobos. Nach einem Vorbeiflug am Mars Reconnaissance Orbiter (Bild 5) endet die Reise im Gale-Krater (Bild 6). Die hochauflösenden Satellitendaten der HiRISE-Kamera erlauben eine Untersuchung des Geländes im Zentimeterbereich.

# DIGITAL VOM TOWER ZUM COCKPIT

**27** März 2019, 10.11 Uhr: Das DLR-Forschungsflugzeug Falcon hebt vom Flughafen Oberpfaffenhofen zu einer Weltpremiere ab. An Bord befindet sich ein Demonstrator für den neuen digitalen Flugfunkstandard LDACS (L-band Digital Aeronautical Communications System). Dieser soll zukünftig einen kryptografisch abgesicherten und effizienten Datenaustausch zwischen Flugsicherung und Cockpit ermöglichen. Zudem testen die Forscher ein alternatives Navigationssystem, das Flugzeuge auch dann sicher ans Ziel bringt, wenn Satellitennavigationssysteme ausfallen. Als die Falcon nach etwa anderthalb Stunden wieder in Oberpfaffenhofen landet, ist das Team auf dem Weg zur Standardisierung von LDACS einen großen Schritt vorangekommen.

## Digitaler Flugfunk LDACS: sichere Übertragung von Daten und Sprache

Ein Beitrag aus dem DLR-Institut für Kommunikation und Navigation

Was sich hinter dem etwas kryptisch wirkenden Kürzel LDACS verbirgt, lässt sich mit unserem Mobilfunknetz am Boden vergleichen, gilt aber speziell für die Luftfahrt. Die Bodenstation ist analog zu der erdgebundenen Mobilfunk-Basisstation und das Funkgerät im Flugzeug entspricht unserem Smartphone. Mit dem neuen System können Anweisungen und Informationen zwischen Lotsen und Piloten besser ausgetauscht werden, da nicht nur Sprache, sondern zugleich auch Daten übertragen werden können. Seit 2007 arbeitet ein Forscherteam des DLR zusammen mit externen Partnern an LDACS. Neben der Frequentis AG und der Universität Salzburg sind sowohl die europäische Luftfahrtbehörde EUROCONTROL als auch die Deutsche Flugsicherung GmbH bei der Entwicklung von Beginn an mit an Bord. Seit etwa sechs Jahren sind mit der Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, der BPS GmbH und der iAd GmbH weitere Partner aus der deutschen Industrie dabei.

### Ein neues Luftverkehrsmanagement verlangt einen modernen Flugfunk

Hintergrund für die Neuentwicklung ist die Modernisierung des Luftverkehrsmanagementsystems. Um den stetig wachsenden Luftverkehr auch in Zukunft sicher und effizient bewältigen zu können, ist fortschrittliche und leistungsfähige Kommunikation eine wesentliche Voraussetzung. „Heutzutage wird immer noch Analogtechnologie aus den Dreißigerjahren im Flugfunk eingesetzt. Diese Technik gilt als äußerst ineffizient und ist umständlich zu handhaben. Sie bedarf dringend einer Modernisierung“, sagt Dr. Michael Schnell, der Projektleiter aus dem DLR-Institut für Kommunikation und Navigation. Beispielsweise müssen sich Piloten jedes Mal, wenn sie den Flugsektor wechseln, mündlich beim Lotsen an- und abmelden und die neue Funkfrequenz per Hand eingeben. Kursänderungen gibt der Lotse dem Piloten mündlich per Sprechfunk durch. Dieser liest sie zurück, um Verständigungsfehler auszuschließen. Danach gibt der Pilot die Änderungen manuell ins Flugmanagementsystem an Bord des Flugzeugs ein. In Zukunft werden die Daten automatisch übertragen und nach Bestätigung durch den Piloten aktiviert.

Der bisherige analoge Sprechfunk nutzt zudem das Frequenzspektrum nur sehr ineffizient. „Für den Flugfunk sind nur begrenzt Frequenzen verfügbar. Gleichzeitig steigt die Anzahl der Flugbewegungen von Jahr zu Jahr“, bemerkt Michael Schnell und ergänzt: „Höchste Zeit also, ins digitale Zeitalter zu starten!“ Mit LDACS sollen Piloten und Fluglotsen künftig nicht nur effizienter kommunizieren können, sondern auch komplexe Informationen austauschen, die mit dem analogen Sprechfunk von heute nicht übermittelbar sind. Beispielsweise sollen mit Zeitinformationen versehene Wegstrecken übertragen



Das DLR-Forschungsflugzeug Falcon hebt zum Jungfernflug mit LDACS ab

## ERSTE KRYPTOGRAFISCH ABGESICHERTE ÜBERTRAGUNG VON PRÄZISIONSLANDEDATEN

Während der Flugversuche ist dem Team um Dr. Michael Schnell noch eine besondere Demonstration gelungen: Weltweit erstmalig wurde für das Präzisionslandesystem GBAS (Ground-Based Augmentation System) eine kryptografisch abgesicherte Datenübertragung zum Flugzeug durchgeführt. GBAS stellt Korrekturdaten zur Satellitennavigation zur Verfügung und ermöglicht neue, leisere und spritsparende Anflugverfahren, die zudem eine engere Staffelnung der Flugzeuge erlauben.

Aktuell werden bei Landungen mit GBAS die Korrekturdaten für GPS über den digitalen Datenlink VDB (VHF Data Broadcast) gesendet. Aufgrund der begrenzten Bandbreite dieses Services bleiben Satellitennavigationsysteme wie Galileo, GLONASS oder Beidou bislang unberücksichtigt. Der neue digitale Flugfunkstandard LDACS kann GBAS-Korrekturdaten für mehrere Satellitennavigationsysteme senden und erreicht damit eine höhere Verfügbarkeit des Systems. Die GBAS-Korrekturdaten werden bei LDACS zudem kryptografisch abgesichert übertragen. So ist der Informationsaustausch vor möglichen Cyber-Angriffen geschützt und ein automatischer Landeanflug kann nicht manipuliert werden.

werden. Weg und Zeit kombiniert ergibt die 4D-Flugroute. Diese gibt sowohl an, welchen Weg das Flugzeug fliegt, als auch, wann es an welchem Punkt der Route ankommen wird. Situationen, in denen sich zwei Flugzeuge auf ihrem Weg annähern, können damit schon vor dem Start der Flüge erkannt und vermieden werden.

### Cyber-sicher fliegen und funken

Dank seiner hohen Kapazität kann der digitale Flugfunk LDACS alle aktuellen und absehbaren Kommunikationsdienste, die für die moderne Luftverkehrskontrolle notwendig sind, unterstützen. Die Struktur des Systems erlaubt es, auch neue Anwendungen zu integrieren, beispielsweise für sektorloses Fliegen. Dabei betrachten die Fluglotsen den Luftraum als Ganzes und nicht wie heute, in kleine abgegrenzte Bereiche unterteilt, für die jeweils ein anderer Lotse verantwortlich ist. Außerdem stellt LDACS Kommunikationsdienste für Luftfahrtgesellschaften zur Verfügung. Diese können damit ihre Flotte besser managen. Eine ganz wesentliche Errungenschaft von LDACS gegenüber herkömmlichen Systemen ist der Datenaustausch über eine kryptografisch abgesicherte Verbindung. „Cyber-Security ist angesichts der zunehmenden Automatisierung im Luftverkehrsmanagement unverzichtbar, da der Mensch immer stärker aus dem Loop genommen wird“, so Michael Schnell.

Was die besondere Herausforderung bei der Entwicklung von LDACS ist, erklärt Prof. Christoph Günther, Leiter des DLR-Instituts für Kommunikation und Navigation: „Für diesen digitalen Dienst konnten keine neuen Frequenzen zur Verfügung gestellt werden. Deshalb

musste es das neue Verfahren erlauben, den Dienst parallel zu anderen Diensten im selben Frequenzband zu betreiben.“ Die Wissenschaftler konnten also keine kommerziell verfügbare Technologie einsetzen. Mit Hilfe einer Spezialentwicklung gelang es ihnen, für LDACS einen Frequenzbereich zwischen bereits existierenden Luftfahrtnavigationsystemen zu nutzen.

### Ein System – viele Funktionalitäten

Obwohl LDACS primär als Kommunikationssystem entwickelt wurde, kann es auch zur zuverlässigen und genauen Bestimmung der Position des Flugzeugs genutzt werden. Diese wird aus den LDACS-Signalen unterschiedlicher Bodenstationen ermittelt, unterstützt durch Messungen der Trägheitssensoren und des barometrischen Höhenmessers. Deshalb lässt sich LDACS auch als Back-up für die Satellitennavigation einsetzen, sodass bestehende, kostspielige Navigationsinfrastruktur am Boden zurückgebaut werden kann.

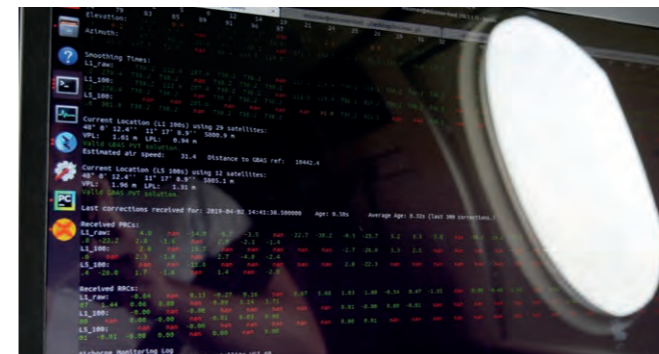
Seit Anfang 2019 arbeitet das Team an einer weiteren Neuerung: LDACS soll in Zukunft auch Flugzeuge direkt miteinander vernetzen können. Diese sollen dann während des Fluges Informationen über Position, Ziel und Geschwindigkeit, aber auch über Luftströmungen und Wetterbedingungen austauschen können.

### Von der Theorie in die Praxis

„Doch grau ist jede Theorie“, sagt Schnell. „Man muss der Welt zeigen, dass es funktioniert. Dies ist insbesondere in der Luftfahrt

## WIE FUNKTIONIERT DER KRYPTOGRAFISCHE SCHUTZ DER GBAS-DATEN?

Zur Sicherung der GBAS-Übertragung verwendet LDACS das Broadcast-Authentifizierungsprotokoll TESLA (Timed Efficient Stream Loss-Tolerant Authentication). Bei TESLA wird die Zeit in Intervalle gleicher Länge aufgeteilt und jedem Intervall ein Schlüssel zugeordnet, der die Nachricht kryptografisch absichert. Zur Erstellung dieser Schlüssel können wiederum Verfahren der Post-Quantum-Kryptografie eingesetzt werden. Nach einer vordefinierten Anzahl von Zeitintervallen gibt der Sender die Schlüssel an alle Empfänger frei. Diese können damit die Authentizität und den Ursprung der Nachricht überprüfen. So wird verhindert, dass GBAS-Nachrichten verfälscht werden oder Daten von nicht-autorisierten Personen oder Systemen in den Kreislauf gelangen.



Die Premiere für die kryptografisch abgesicherte GBAS-Übertragung läuft und das Flugzeug empfängt erstmals GBAS-Korrekturdaten vollständig digital



Der Versuchsaufbau, eingebaut im Forschungsflieger

wichtig, wo Sicherheit allererstes Gebot ist.“ Im Projekt ICONAV entwickelte das Team die Navigationsfunktionalität von LDACS und einen ersten Labordemonstrator. Im Projekt MICONAV wurde ein voll funktionsfähiger und flugtauglicher Demonstrator aufgebaut und in Labor- und Flugversuchen getestet.

Darüber hinaus installierten die Forscher vier Bodenstationen im Südwesten von München. Zwei dieser Stationen sind voll funktionsfähige LDACS-Bodenstationen, zwei sind Navigationsstationen. Letztere senden lediglich LDACS-Signale aus, die am Flugzeug zur Positionsbestimmung benötigt werden. Die Kommunikation erfolgt mit den beiden LDACS-Bodenstationen, die senden und empfangen können. Insgesamt sechs Messflüge führten die Forscher mit dem Versuchsdemonstrator des LDACS-Systems im DLR-Forschungsflugzeug Falcon durch. „Unsere Messkampagne war ein voller Erfolg“, resümiert Michael Schnell. „Wir konnten alle wesentlichen Kommunikations- und Navigationsfunktionalitäten im Flug testen und bestätigen.“ Das An- und Abmelden an den LDACS-Bodenstationen verlief schnell und fehlerfrei, ebenso wie die Übergabe von einer Bodenstation zur anderen. Während des Fluges kommunizierten Flugzeug

und LDACS-Bodenstation in verschiedenen Situationen, wie Überflug in großer Höhe, An- und Abflug oder Rollen am Flughafen, zuverlässig miteinander. Für den Datenaustausch verwendeten die Wissenschaftler typische Applikationen der Luftfahrt wie Controller-Pilot Data Link Communications (kurz: CPDLC) oder Automatic Dependent Surveillance-Contract (kurz: ADS-C). Um sicher zu kommunizieren, hatten die Forscher zudem einen modernen Post-Quantum-Kryptografie-Algorithmus implementiert, mit dem die LDACS-Kommunikation auch für die Zukunft gegen Cyber-Angriffe modernster Art gewappnet ist.

### Wie geht es weiter?

Bis zur tatsächlichen Premiere in der Flugführung weltweit dürften noch einige Jahre vergehen. Für die Standardisierung gibt es seit 2016 eine DLR-geleitete Arbeitsgruppe bei der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation ICAO (International Civil Aviation Organization). „Sobald der Standard endgültig festgeschrieben ist, sind Hersteller und Fluggesellschaften aufgefordert, ihn zu übernehmen“, erklärt Schnell. 2022 könnte es nach seiner Einschätzung so weit sein.

Während des ersten Tests überflog die Falcon vier Bodenstationen. Zwei von ihnen sind reine Navigationsstationen (LDACS-NAV), die für die Positionsbestimmung LDACS-Signale zum Flugzeug senden. Zwei von ihnen sind LDACS-Stationen, die digitale Flugfunkdaten senden und empfangen.



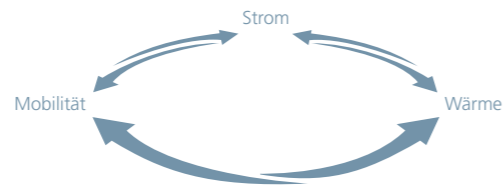
## POST-QUANTUM-KRYPTOGRAPHIE

Post-Quantum-Kryptografie steht für Verschlüsselungsverfahren, die im Gegensatz zu den heute eingesetzten Methoden selbst durch sogenannte Quantencomputer nicht geknackt werden können. Quantencomputer sind zurzeit Gegenstand der Forschung und erlauben es, mehrere Hypothesen parallel zu überprüfen, wodurch diese neue Computerart besonders effizient und schnell ist.

## DIE PROJEKTE ICONAV UND MICONAV

ICONAV (Integrated Communications and Navigation) und MICONAV (Migration towards Integrated COM/NAV Avionics) setzte das DLR gemeinsam mit den Partnern Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, BPS GmbH und iAd GmbH um. Beide Projekte waren Teil des Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi).

# SYSTEMWECHSEL IM LAUFENDEN BETRIEB



**D**ie Energiewende hat unter den erneuerbaren Energien bislang zwei klare Sieger: Fotovoltaik und Windenergie. Insgesamt decken die Erneuerbaren mittlerweile rund 40 Prozent der deutschen Stromversorgung ab. Doch wie gelingt es, sie auch flächendeckend für die Wärmeversorgung und für die Mobilität von Mensch und Gütern zu erschließen? Wie können sie die bald ausragierten fossilen Energieträger ersetzen? Für Professor Carsten Agert, Leiter des DLR-Instituts für Vernetzte Energiesysteme, liegt die Antwort in der Sektorenkopplung. An den Schnittstellen zwischen Strom, Wärme und Verkehr eröffnen sich immense Speicher- und Flexibilisierungspotenziale. Doch wie so oft steckt der Teufel im Detail: Die Erwartungshaltung ist hoch, das Thema komplex – und die Uhr tickt.

## Ein Interview mit Prof. Dr. Carsten Agert zur Sektorenkopplung im Energiewesen

**Der mittlere Anteil erneuerbarer Energien an unserer Stromversorgung hat in diesem Jahr die 40-Prozent-Marke überschritten. – Ein Beleg für den Erfolg der Energiewende, oder?**

■ Es ist eine erfreuliche Momentaufnahme. Allerdings müssen wir sie im Gesamtkontext sehen: Die Industrieländer haben sich eine Emissionsminderung um 80 bis 95 Prozent der Kohlendioxid-Äquivalente bis zum Jahr 2050 im Vergleich zum Basisjahr 1990 zum Ziel gesetzt. Wenn wir uns anschauen, was wir bis 2050 zu leisten haben, dann haben wir noch einen so fundamentalen, tiefgreifenden Wandel vor uns, dass er in seiner Dimension wahrscheinlich nur mit der Industrialisierung im 19. Jahrhundert verglichen werden kann.

**Wir sind die Energiewende also zu langsam angegangen?**

■ Ich meine: Wir sind sie zu einseitig angegangen. Seit rund zwanzig Jahren, ungefähr seit dem ersten Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) von 1998, haben wir das Naheliegende gemacht, nämlich Windräder und Solaranlagen installiert. Wir haben also die „low hanging fruits“ geerntet. Den Verkehrssektor haben wir dagegen weitestgehend außen vor gelassen. Deshalb stagnieren wir dort bei einem Erneuerbare-Energien-Anteil im Treibstoffbereich von etwa sechs Prozent. Im Wärmesektor sieht es analog dazu ganz ähnlich aus. Unser Zwischenfazit lautet also: Ja, wir haben begonnen mit der Energiewende. Aber wir sind noch am Anfang. Schwierig wird es eigentlich jetzt erst.

### Prof. Dr. Carsten Agert

leitet das DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme in Oldenburg. Der Physiker ist seit 2008 Professor für Energietechnologie an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. Zeitgleich übernahm er die Leitung des neugegründeten EWE-Forschungszentrums NEXT ENERGY, das im Jahr 2017 als Institut für Vernetzte Energiesysteme ins DLR übergegangen ist. Agert war unter anderem von 2009 bis 2011 Vize-Präsident des European Renewable Energy Research Centres Agency EUREC, von 2015 bis 2016 Mitglied des Runden Tisches Energiewende der Niedersächsischen Landesregierung und ist seit 2017 Vorstandssprecher des Energieforschungszentrums Niedersachsen.



Im Netzlabor des DLR in Oldenburg ist es möglich, Wohnquartiere mit all ihren Energieflüssen realitätsnah abzubilden. Die Wissenschaftler untersuchen beispielsweise neue Netzstrukturen oder die Integration der Elektromobilität ins Energiesystem per Echtzeit-Simulationssystem.

**... und dennoch sind Sie zuversichtlich, dass die DLR-Energieforschung belastbare Konzepte für eine stabile, sichere und ökonomisch attraktive Energieversorgung entwickeln kann?**

■ Absolut. Zwar hat der Ausbau von Sonne und Wind im Elektrizitätssektor ein Maß erreicht, das den weiteren Ausbau strukturell und technisch anspruchsvoller werden lässt. Wenn wir jedoch die ebenfalls schwierigen Sektoren Wärme und Mobilität hinzuziehen, können wir attraktive sektorenübergreifende Lösungen erarbeiten. Unsere Aufgabe als Forscher ist es, nach Flexibilitäten im Energiesystem zu suchen, die uns helfen, besser damit umzugehen, dass Erzeugungs- und Verbrauchsmuster nicht immer übereinstimmen. Die großen Speicher- und Flexibilisierungspotenziale, die wir benötigen, um diese Übereinstimmung herzustellen, liegen in der Sektorenkopplung. Auch wenn sie gemeinhin mit ‚Wir machen aus Strom Mobilität‘ assoziiert wird: In unserem Verständnis heißt Sektorenkopplung: Wir rücken Strom, Wärme und Verkehr so zusammen, dass diese drei Sektoren zu einem großen integrierten Energiesystem verwachsen werden.

**Was macht die Schnittstellen zwischen den einzelnen Energiesektoren für das Gelingen der Energiewende denn so bedeutsam?**

■ Die Sektorenkopplung steht für den Eintritt von der reinen Strom- in die tatsächliche Energiewende. Aktuell basiert beispielsweise der Wärmesektor im Wesentlichen noch auf Erdgas, teilweise auch auf Erdöl. Wenn wir jedoch auf die 2050er-Klimaziele schauen, dann lautet eine ganz klare Konsequenz, dass wir im Jahr 2050 eines bestimmt nicht mehr tun dürfen: nämlich mit fossilem Methan oder fossilem Öl heizen. Die Mobilität steht vor einem ganz ähnlich tiefgreifenden Wandel. Bis zum Jahr

2050 rund 80 bis 95 Prozent der deutschen Kohlendioxid-Emissionen einzusparen bedeutet: Pkw dürfen dann keine fossilen Kohlendioxid-Moleküle mehr ausstoßen. Die Lebensdauer eines Autos liegt im Schnitt bei 15 Jahren, also sollte um das Jahr 2035 herum für den deutschen Markt der letzte Neuwagen mit Verbrenner fossilen Brennstoffs vom Band laufen. Wir haben erst kürzlich in der EU darüber diskutiert, ob wir im Jahr 2030 eine Emissionsminderung von 30, 35 oder 40 Prozent für Neuwagen verlangen können. Dabei müssten wir fünf Jahre später eigentlich 100 Prozent verlangen. Das heißt: Wenn wir eine Chance haben wollen, unsere Klimaziele zu erreichen, müssen wir die Sektoren Wärme und Verkehr sehr zeitnah vollständig auf erneuerbare Energie umstellen. Diese Veränderungen bieten uns die Chance, das immense Flexibilisierungspotenzial zu nutzen, das in der Sektorenkopplung steckt. Deren Flexibilität benötigen wir, wenn wir aus dem fluktuierenden Angebot der erneuerbaren Energien ein stabiles Energiesystem gestalten wollen. Und: Durch die Sektorenkopplung bekommen wir Zugriff auf große Speicherpotenziale.

**Wie genau funktioniert Sektorenkopplung? Was verbirgt sich – technisch gesehen – hinter der Flexibilisierung des Energiesystems, wie lassen sich mit Wärme und Mobilität Schwankungen im Stromnetz ausgleichen?**

■ Wenn zu viel Energie aus erneuerbaren Energien eingespeist wird, zum Beispiel, weil der Wind stark ist, können wir die Erzeugungsanlagen abregeln – oder aber die überschüssige Energie verwenden oder speichern. Und dabei müssen wir bedenken, dass es beispielsweise deutlich billiger ist, Wärme zu speichern statt Strom. Habe ich also ein strombasiertes Heizungssystem, das mit einer Wärmespeicherung gekoppelt ist, ist es sinnvoll, die Wärme dann zu erzeugen,



Das Oldenburger DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme beschäftigt aktuell rund 150 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Entwickelt werden hier Technologien und Konzepte für die zukünftige Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien.

wenn der Strom im Überfluss zur Verfügung steht – und nicht ausgerechnet dann, wenn ich die Wärme benötige. Mit Wärmespeichern bekommen wir also mehr Flexibilität ins Energiesystem.

Sektorenkopplung funktioniert aber auch in anderer Richtung, zum Beispiel in der Mobilität: Wir können Wasserstoff in den Zeiten herstellen, wenn Strom ausreichend vorhanden ist. Damit ist die Energie als chemischer Energieträger eingespeichert. Dieser Wasserstoff lässt sich jederzeit wieder zu Strom machen, wenn die Nachfrage das Angebot an erneuerbarer Energie im Netz übersteigt. Unser Ziel ist es, den Verkehrssektor in beide Richtungen mit dem Stromsektor zu koppeln: Wir machen aus Strom Wasserstoff, haben aber auch die Option, die Infrastruktur des Verkehrs zu nutzen, um aus Wasserstoff wieder Strom zu machen. Auf diesem Feld arbeiten Energie- und Verkehrsinstitute des DLR bereits eng zusammen.

**Ihre Beispiele basieren auf Wasserstoff. Ist das Ihrer Einschätzung nach der chemische Energieträger, der das künftige Energiesystem neben der Elektrizität prägen wird?**

■ Wir täten gut daran, uns im Kontext der Sektorenkopplung auf einen gemeinsam genutzten chemischen Energieträger der Zukunft zu einigen. Ich kann mir nicht vorstellen, dass wir zum Beispiel Wasserstoff für den Verkehr und synthetisches Erdgas für die Heizung nutzen und womöglich noch ein weiteres Molekül für eine dritte Anwendung, da wir jedes Mal eine spezialisierte Logistik und Infrastruktur dafür bräuchten. Welcher Energieträger das sein wird, ist noch offen. Ich persönlich glaube jedoch an den Wasserstoff.

**Blicken wir in eine fiktive Zukunft: Die Entscheidung über die Wahl dieses einen chemischen Energieträgers ist gefallen, Anlagen zur Einspeisung erneuerbarer Energien stehen ausreichend zur Verfügung. Hätte die Energieforschung ihren Auftrag dann erfüllt?**

■ Wenn die Einzeltechnologien funktionieren und etabliert sind, geht die Arbeit eigentlich erst richtig los: Der Systembetrieb dieser zukünftigen vernetzten Energiesysteme wird sich grundlegend vom heutigen

Betrieb unterscheiden. Dezentralität, schwankende Erzeugung und Digitalisierung sind die Stichworte, die uns auf der Systemebene der Energiewende noch viele Jahrzehnte mit Herausforderungen konfrontieren werden. Um uns dieser Aufgabe zu stellen, entwickeln wir am DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme die Technologien, die die Energie über diese Sektorengrenzen hinweg transportieren. Wir kümmern uns darum, dass diese Technologien zum richtigen Zeitpunkt das Richtige tun, zuverlässig funktionieren und anwenderfreundlich ausgestaltet sind. Und wir betten sie in der Systemanalyse in übergeordnete strategische Überlegungen technischer, soziologischer, ökologischer und ökonomischer Natur ein. Darüber hinaus benötigen wir für die Gestaltung künftiger Energiesysteme natürlich auch Einzeltechnologien wie Solarkraftwerke, Speicher oder Gasturbinen, die das DLR in anderen DLR-Instituten erforscht. Aber die weitere Entwicklung der Energiewende wird im Wesentlichen davon abhängen, ob wir es schaffen, unser Energiesystem auf Basis sehr guter Einzeltechnologien auch auf der Systemebene fundamental umzugestalten.

**Die angestrebte Umgestaltung des Energiesystems wird von Ihren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus vielen weiteren Blickwinkeln begleitet, vom Energiemanagement über Systemdienstleistungen bis hin zu ganz konkreten Handlungsempfehlungen für Wirtschaft und Politik. Warum bereitet es so große Probleme, das bestehende System auf erneuerbare Energien umzustellen?**

■ Die technischen Anforderungen an das künftige Stromsystem sind dafür einfach zu komplex. Ein Beispiel: Selbst für Tage, an denen es scheinbar keine Speicherprobleme geben sollte, weil ungefähr genauso viel Energie aus Sonne und Wind zur Verfügung steht wie verbraucht wird, benötigen wir zahllose neue Lösungen, um auf der Basis erneuerbarer Energien ein stabiles Energiesystem gewährleisten zu können. Das liegt unter anderem daran, dass wir hinsichtlich des Stabilisierungsmanagements unseres Stromsystems aktuell noch sehr viel Honig aus der Trägheit der traditionellen großen Generatoren saugen. Stellen wir auf Sonne und Wind um, haben wir es im Wesentlichen mit Leistungselektronik zu tun, die diese inhärente Trägheit

nicht mit sich bringt. Das hat viele Implikationen gerade auch für die sehr kurzfristige Regelung von Energiesystemen. Zudem werden wir das Energiesystem sehr stark dezentralisieren. Es sind dann nicht mehr ein paar wenige Großkraftwerke zu regeln, sondern unzählige Kleinkraftwerke.

**Werfen wir einen Blick auf ein aktuelles Thema: den Ausbau der großen Stromtrassen vom windreichen Norden in den Süden der Republik. Wie sehr lässt sich das Energiesystem durch überregionale oder gar europäische Vernetzung stabilisieren?**

■ Eine bessere überregionale Vernetzung ist eine elementare Voraussetzung dafür, um das heute gewohnte Maß an Versorgungssicherheit künftig auch auf Basis erneuerbarer Energien zu gewährleisten. In den dezentralen, regionalen Teilen des Energiesystems werden wir nämlich nie das Ausmaß an bezahlbarer Flexibilität finden, das uns ein autarkes Energiemanagement auf kleinskaliger lokaler Ebene erlaubt. Deshalb benötigen wir für die Versorgungssicherheit auch eine großskalige und leistungsfähige Vernetzung. Anders werden wir ein zuverlässiges stabiles und auch bezahlbares Energiesystem nicht gestalten können.

**Wünschen Sie sich angesichts dieser immensen Herausforderungen nicht manchmal eine Greta Thunberg am Kabinettstisch? Sollte die Politik künftig strengere Rahmenbedingungen für den Erfolg von Klimaschutz und Energiewende schaffen?**

■ Der Geist der „Fridays for Future“-Bewegung täte der Klima-Politik gut, gar keine Frage. Im Stromsektor holpert die Energiewende und der Ausbau erneuerbarer Energien bringt noch nicht die gewünschte Effektivität hinsichtlich der Emissionsreduktion, aber unterm Strich geht es hier durchaus vorwärts. In den Sektoren Verkehr, Luftfahrt und Wärme hingegen hat die Energiewende praktisch noch gar nicht begonnen. Ich plädiere dafür, die Beschlüsse zum Kohleausstieg zum Anlass zu nehmen, jetzt endlich ein flächendeckendes – das heißt sektorenübergreifendes – System zur Kohlendioxid-Mindestpreisbindung beziehungsweise -besteuerung zu installieren. Das würde die kreative Kraft unserer Volkswirtschaft viel stärker stimulieren als kleinteilig umkämpfte Regulierungsmosaiksteine. Die nachfolgende Generation erinnert uns Woche für Woche daran, dass wir jetzt handeln müssen. Und wir täten gut daran, auf sie zu hören.

Das Interview führte **Heinke Meinen**, Institutskommunikation, DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme.

Das Sky-Imager-Messnetz, das vom DLR derzeit im Nordwesten Deutschlands errichtet wird, misst flächendeckend die Bewegung und Entwicklung von Wolkenzügen am Himmel. Somit lässt sich der Ertrag von Solaranlagen minutengenau prognostizieren. Solch genaue Vorhersagen sind mit Satellitenbildern nicht möglich, da für den Ertrag von Solaranlagen nicht die Position der Wolken entscheidend ist, sondern die ihrer Schatten.



„Wärme zu speichern ist viel billiger, als Strom zu speichern“, betont Carsten Agert. Vor diesem Hintergrund erforscht das DLR in seinem KWK-Labor (Kraft-Wärme-Kopplung) strombasierte, mit Wärmespeicherung gekoppelte Heizungssysteme. Wird die Wärme zu dem Zeitpunkt erzeugt, zu dem Strom im Überfluss vorhanden ist, bringen sie mehr Flexibilität ins Energiesystem.



Wie sich die Elektromobilität in künftige Stromsysteme integrieren lässt, wird im DLR Oldenburg ebenfalls untersucht. So könnten in Zukunft zum Beispiel die Akkus von Elektroautos zum Ausgleich von Netzschwankungen genutzt werden.



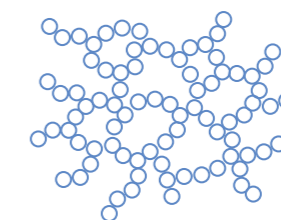


Barbara Milow und der Super-Werkstoff: Aerogele sind äußerst wandlungsfähig und damit für viele unterschiedliche Anwendungen interessant, etwa als Dämmstoff, Filtermaterial oder auch als Implantat. Das macht diese luftig-leichten Materialien für die DLR-Forscherin mit einer Professur an der Universität zu Köln so faszinierend.

## WIE TROCKNEN AEROGELE?

Aerogele so zu trocknen, dass ihre innere Struktur nicht leidet, ist ein entscheidender Punkt und schwierig. Die Lösung liegt in der sogenannten überkritischen Trocknung. Dabei werden Druck und Temperatur so weit erhöht, dass die Dichte von flüssiger und gasförmiger Phase, zwei der drei klassischen Aggregatzustände, sich angleichen. Diese homogene Phase macht aus dem Fluid ein superkritisches Fluid. Durch das Zusammendrücken der Moleküle entsteht eine Flüssigkeit ohne Grenzflächenspannungen, es wirken also keine Kapillarkräfte auf die Porenstruktur. Beim Trocknen schrumpft damit das Gel nicht, sondern behält annähernd die Form und Struktur des nassen Gels, wird aber zum Aerogel.

# LUFTIG-LEICHT UND WANDELBAR



**O**b für das Elektroauto oder den Next-Generation-Train – wenn es nach Professorin Barbara Milow geht, dann sollen Aerogele, hochporöse und federleichte Materialien, in vielen Bereichen bald nicht mehr wegzudenken sein. Die DLR-Wissenschaftlerin entwickelt mit ihrer Arbeitsgruppe den Werkstoff für unterschiedlichste Einsatzgebiete.

Wenn Forscherinnen und Forscher nach neuen Rezepturen Aerogele kochen, ist das eigentlich ganz einfach. – Oder doch nicht so ganz?

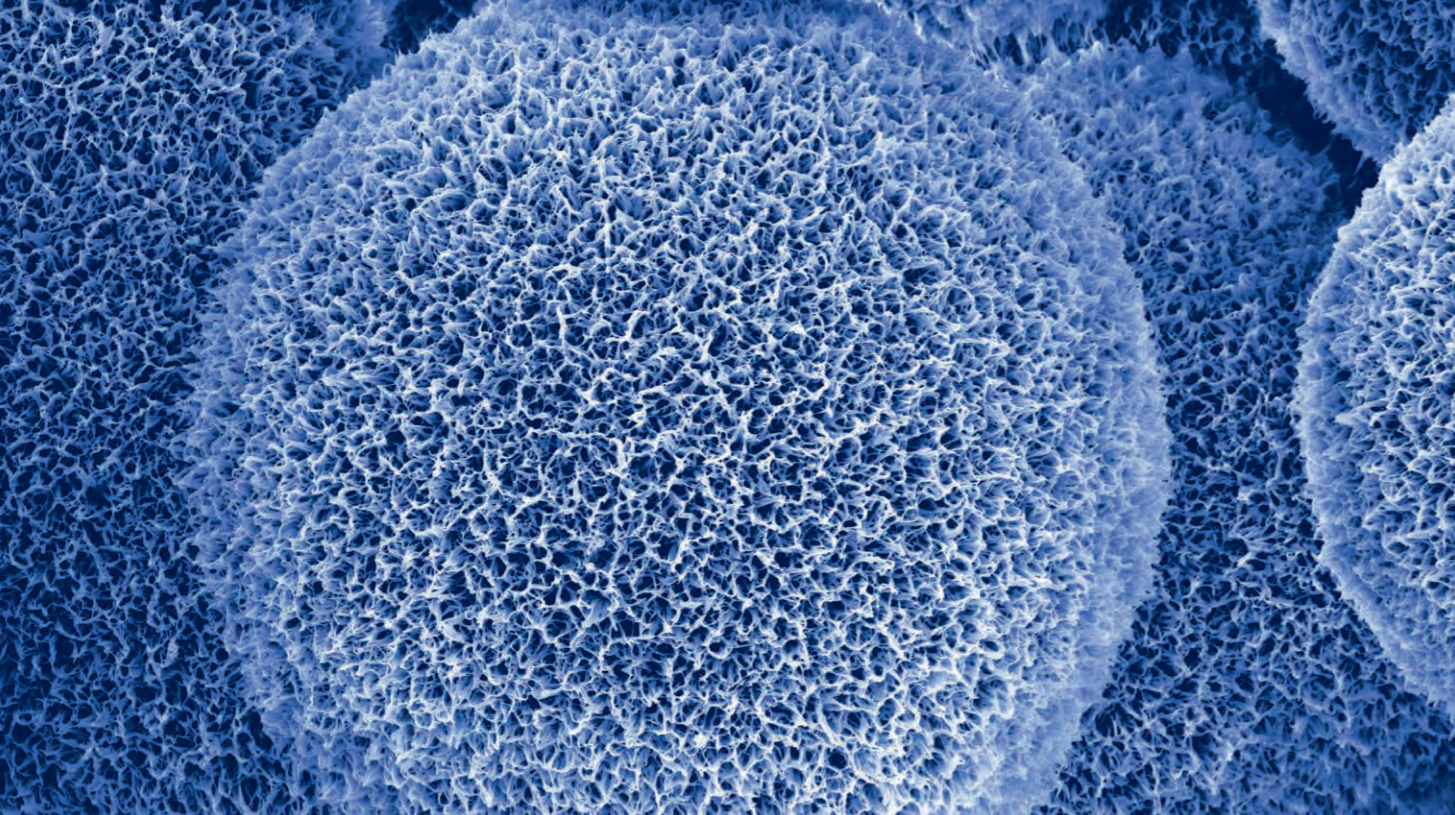
Von Frank Seidler

Barbara Milow konzentriert ihren Blick auf ein Becherglas, beobachtet beim Versuch jedes Detail. Sie mag das gespannte Warten darauf, ob das Experiment gut gelaufen oder eben auch schief gegangen ist. Genau weiß man immer erst hinterher, ob ein Versuch ein Erfolg war oder ein vermeintlicher Misserfolg, aus dem man dennoch Entscheidendes für die weitere Forschung lernen kann. „Das hat mich immer schon fasziniert“, sagt Milow, „... die chemische Synthese, die Frage, wie Stoffe und ihre Eigenschaften zusammenhängen und das Entwickeln ganz neuer Materialien.“ Die Wissenschaftlerin mit einem Lehrstuhl für Nanostrukturierte Zelluläre Materialien an der Universität zu Köln und ihre Kollegen im DLR-Institut für Werkstoff-Forschung können sich heute freuen. Der Versuch ist nach Plan gelaufen. Die Gelation der Silica-Lösung ist deutlich zu erkennen. Und eigentlich will Milow auch nichts dem Zufall überlassen. Dennoch, es läuft nicht immer alles wie erwartet, wenn sie und ihr Team von Technikern, Ingenieuren und Wissenschaftlern im Labor Aerogele im wahrsten Sinne des Wortes nach neuen Rezepturen kochen.

Aerogele sind hochmoderne Werkstoffe. Im Wesentlichen bestehen sie aus Luft, die von einer feinen und festen Struktur umschlossen wird, ähnlich einem Schwamm. Als Feststoff werden unterschiedliche Materialien wie Silicate, Kunststoffe oder Metalloxide verwendet. Ihr Anteil im fertigen Aerogel beträgt zwischen einem und zwanzig Prozent. Die Dichte des Aerogels ist sehr gering, das macht das Material äußerst leicht. Einer von vielen Gründen, warum der Werkstoff für Barbara Milow besonders reizvoll ist. „Prinzipiell ist der Herstellungsprozess recht einfach“, sagt sie. „Man gibt die Komponenten zusammen, sie gelieren, man trocknet das Gel und erhält ein Material, das unfassbar viele Anwendungsmöglichkeiten hat. Es kann einerseits die elektrische Leitfähigkeit des Kohlenstoffs haben und andererseits durch die nanoporöse Struktur auch ein guter Dämmstoff sein. Solche unterschiedlichen Eigenschaften in einem Stoff – das gibt es sonst nirgends.“

Seit Ende 2018 leitet die Wissenschaftlerin im Institut für Werkstoff-Forschung des DLR die Abteilung Aerogele und Aerogelverbundwerkstoffe, mit 32 Mitarbeitenden die größte Forschungsgruppe dazu in Deutschland. Zusammen arbeiten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler daran, den Gelierungsprozess des Materials besser zu verstehen und mögliche Anwendungsfelder zu erschließen: Sogenannte Silica-Aerogele sind sehr stabil bei extremen Temperaturen und werden für die akustische und Kälte-Dämmung von Flugzeugkabinen oder Treibstofftanks entwickelt. Duroplast-Aerogele sind hervorragende Dämmmaterialien: weder toxisch noch brennbar. Biopolymer-Aerogele besitzen eine innere Struktur, die Filz ein wenig ähnelt, und sie werden für die Adsorption von Luftschadstoffen, Luftfeuchtigkeit oder oxidationsempfindlicher Stoffe genutzt. Kohlenstoff-Aerogele wiederum können aufgrund ihrer definierbaren Nanostrukturen zu neuartigen





## AEROGELE UND AEROGEL-VERBUNDWERKSTOFFE

**Biopolymer-Aerogele** bestehen aus natürlich vorkommenden Makromolekülen wie Cellulose, Chitin oder Carrageen. Nanometerdünne Fasern, die untereinander chemisch gebunden sind, verleihen dem Werkstoff Stabilität. Aufgrund dieser filzartigen Struktur eignet er sich gut als Filter, beispielsweise zur Regulation der Luftfeuchtigkeit in Flugzeugkabinen, aber auch zur Adsorption von Kohlenstoffdioxid.

**Duroplast-Aerogele** sind leicht, wärme- und schalldämmend. Entsprechend interessant sind sie für den Bau von Fahrzeugen, Zügen und Flugzeugen oder auch als Alternative zu Styropor. Je nach Trocknungsvorgang werden sie spröde bis super-flexibel. Ihre Basis bildet eine wässrige Resorcin-Formaldehyd-Lösung. In Kombination mit anderen Aerogelen – beispielsweise auch mit Silica-Aerogel-Granulaten – entstehen Verbundwerkstoffe mit besseren thermischen und mechanischen Eigenschaften.

**Kohlenstoff- und Siliziumoxycarbid-Aerogele** entstehen bei der thermischen Behandlung von duroplastischen, biopolymerbasierten oder hybriden Aerogelen. Sie sind hoch temperaturstabil und finden in Gießereien im Sandgussverfahren Einsatz. Dank ihrer großen inneren Oberflächen nehmen sie die Gase auf, die beim Gießvorgang entstehen, und verhindern so Gussdefekte wie Gasblasen, nicht-metallische Einschlüsse oder Sandanhaftungen. Das DLR arbeitet daran, ihren Herstellungsprozess vom Labor- in den Technikumsmaßstab zu überführen.

**Silica-basierte Aerogele** sind in der Aerogel-Familie am besten untersucht. Anwendung finden sie wegen ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit als Dämmstoff, aber auch als Partikel in der Kosmetik. In den letzten Jahren entwickelten Forscher eine neue Variante: weiche, flexible Aerogele, die bei Temperaturen von bis zu 500 Grad Celsius stabil bleiben. DLR-Wissenschaftler arbeiten an neuen Rezepturen zu deren weiterer Verbesserung.

Die kugelförmige Struktur und der faserartige Aufbau gehören einem neuartigen Biopolymer-Aerogel, das DLR-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler im Laborexperiment entwickelten. Diese Struktur entsteht, indem Chitosan eine Verbindung mit einem Duroplast eingeht.

Batteriekonzepten beitragen oder auch Gießprozesse optimieren. In Kombination mit anderen Materialien lassen sich ihre positiven Eigenschaften zu innovativen Aerogel-Verbundwerkstoffen kombinieren. In Zusammenarbeit mit der Universität Duisburg-Essen entwickelten die DLR-Wissenschaftler auch einen Aerogel-Beton, der nicht nur sehr leicht ist, sondern auch hervorragend die Wärme dämmt. „Die Möglichkeiten, die wir heute sehen, sind fast grenzenlos und es kommen immer neue Anwendungsfelder dazu. Das ist schon erstaunlich, wenn man bedenkt, dass bereits vor fast 90 Jahren mit der Forschung an Aerogelen begonnen wurde“, bemerkt Milow.

### Gut Ding braucht Weile

In den Dreißigerjahren beschäftigten sich Wissenschaftler damit, Flüssigkeit aus nassen Gelen – auch Hydrogele genannt – zu entfernen. Als Aerogele betrachtete man alle Materialien, die aus nassen Gelen hergestellt wurden und die nach dem Trocknen die netzwerk- und porenartige Struktur des Hydrogels im Inneren des Werkstoffs aufwiesen. Für die Forscher der ersten Stunde war es äußerst schwierig, die Kräfte, die während der Trocknung auf die Porenwände im Innern des Werkstoffs wirken, so zu kontrollieren, dass die Struktur des Gels nicht zerstört wurde und die Poren während des Trocknens nicht kollabierten. Der Trocknungsprozess nahm in den Anfängen etwa eine Woche Zeit in Anspruch. An eine industrielle Verwertung war so nicht zu denken. Erst in den Sechzigerjahren gelang es, die Herstellungsweise gravierend zu vereinfachen und damit auch zu beschleunigen. Man erkannte, dass in nassen Gelen die Porenflüssigkeit im Wesentlichen aus Methanol bestehen konnte. Auch entdeckten die Forscher, dass sich Materialeigenschaften wie die netzwerkartige Struktur der Aerogele über den pH-Wert steuern lassen.

In dieser Zeit wurde Barbara Milow gerade erst geboren. Während Firmen wie BASF, Hoechst und Henkel in den Achtzigerjahren verschiedene Lösungen für nasse Gele nutzten, um Aerogele mit unterschiedlichsten Eigenschaften zu entwickeln, entschied sie sich nach einem Praktikum im chemischen Untersuchungsamt Trier für ein Chemiestudium an der Universität zu Köln. „Um zu promovieren, bin ich an das DLR-Institut für Raumsimulation gegangen und habe dort Experimente mit Flüssig-Flüssig-Systemen in Schwerelosigkeit gemacht. Ich hatte sogar das Glück, als Doktorandin die Bodenbegleitforschung zur D2-Weltraummission unterstützen zu dürfen,

das hatten sich schon viele meiner Vorgänger gewünscht“, erzählt Barbara Milow und ergänzt: „Mit Aerogelen hatte ich zu dieser Zeit wenig zu tun.“

Doch eine kleine Arbeitsgruppe am Institut arbeitete mit dem interessanten Werkstoff. Bis Barbara Milow selbst sich intensiv mit Aerogelen beschäftigte, sollte es noch zehn Jahre dauern. So lange arbeitete sie am heutigen Institut für Solarforschung des DLR an der Entgiftung von Abwasser mit Hilfe von Sonnenenergie. „Als mein Arbeitsvertrag auslief, brauchte ich noch ein Zeugnis von meinem alten Institut und kontaktierte meinen ehemaligen Kollegen“, erinnert sie sich. Er hatte sich mit seiner Gruppe schon während meiner Promotion mit Aerogelen beschäftigt. Ich schrieb ihm ‚Lorenz, ich brauche ein Zeugnis oder einen Job‘ und er antwortete mir ‚Ich habe beides für dich‘, das war 2005. Von da an haben mich die Aerogele nicht mehr losgelassen.“

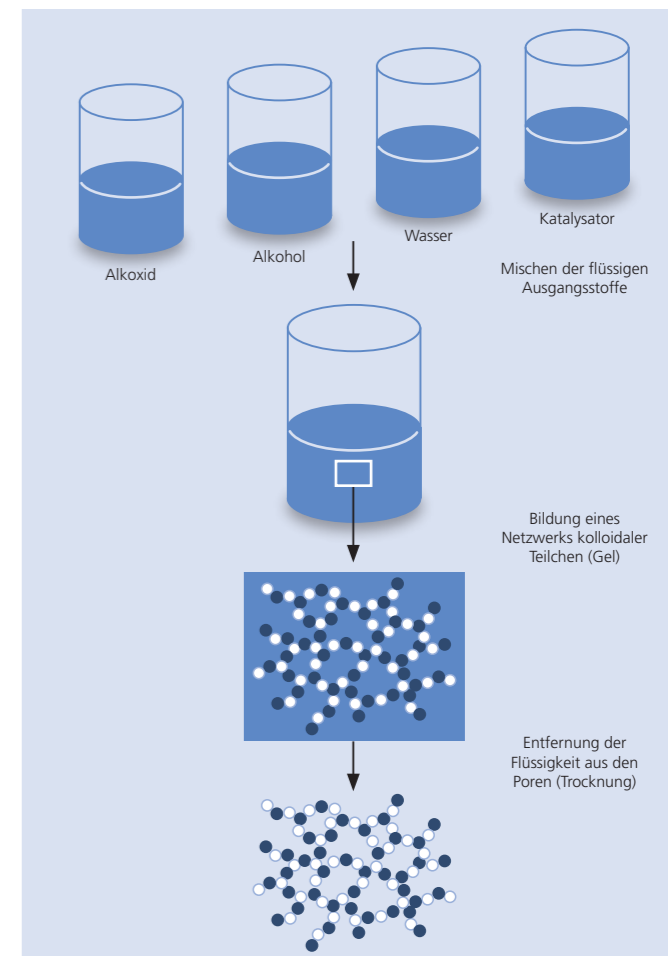
### Forschung im Ungewissen

Zu diesem Zeitpunkt stand die Gruppe vor existenziellen Fragen: Auf der einen Seite eröffneten sich Finanzierungsmöglichkeiten für ihre Projekte, andererseits sollte die Arbeitsgruppe nach einem Wechsel in der Institutsdirektion aufgelöst werden. „Wir konnten natürlich nicht den Kopf in den Sand stecken, also haben wir richtig losgelegt, um das Thema unübersehbar aufzubauen“. Um den Produktionsprozess zu erforschen und weiterzuentwickeln, besuchte das Team zahlreiche Gießereien in Deutschland. Nach und nach erschlossen die DLR-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler die unterschiedlichsten Anwendungsfelder für ihre Werkstoffe. Beispielsweise entwickelte die Arbeitsgruppe Aerogelstrukturen als Modellsysteme für Knochen-Implantate. Heute werden in ihrem Arbeitskreis an der Universität zu Köln Implantate aus Biopolymer-Strukturen hergestellt und so weit entwickelt, dass sie nach der Implementierung ins Gewebe nicht abgestoßen werden.

Dabei ist es für Barbara Milow und ihr Team wichtig, Synthesen mit giftig wirkenden Stoffen durch andere Prozesse zu ersetzen. „Die Chemikalien, die wir nutzen, sind – außer Formaldehyd – alle umweltfreundlich. Immer suchen wir nach Stoffen, mit denen man nachhaltig arbeiten kann.“ Dabei geht die Gruppe durchaus auch unorthodoxe Wege: „Einmal haben wir zur Herstellung der Aerogele Zimtaldehyd benutzt. Daraufhin roch das ganze Labor weihnachtlich. Das hat sich aber leider in den geforderten Konzentrationen als noch schädlicher herausgestellt.“

### Eine ambitionierte Vision

„Zunächst war ich skeptisch, ob die Mannschaft zusammenhält, ob alles klappt und ob ich die Finanzierung sicherstellen kann. Ich schrieb viele Anträge. Aber es hat besser funktioniert, als ich zu hoffen gewagt hatte und heute platzen wir aus allen Nähten.“ Inzwischen hat die Leiterin Themengebiete an die nächste Generation übertragen. Heute arbeitet Barbara Milow mit ihrer Abteilung an Bauteilen für



alle Forschungsbereiche des DLR. Aktuell entwickeln sie ein Material für den Flugzeugrumpf. Es soll verhindern, dass dieser bei langen Flügen vereist. Die hydrophoben, also wasserabweisenden Aerogele sollen vermeiden, dass sich Wasser anlagert und kiloschwere Eisschichten bildet.

„Mein Traum ist ein eigenes Aerogel-Kompetenzzentrum hier im DLR, in dem wir Prototypen und Kleinstserien von neuen Rohstoffen und Bauteilen produzieren können“, schwärmt die Forscherin. Dort sollen auch ihre Mitarbeitenden der Universität zu Köln arbeiten können, an der Milow jüngst zur Professorin berufen wurde. Und darauf ist sie stolz. Wenn sie dann von zukünftigen Projekten und neuen Anwendungsfeldern spricht, merkt man, wie begeistert sie ist. Freilich ist das alles viel Arbeit und vielleicht hätte sie sich auf ein oder zwei Themenbereiche beschränken können. Doch da schüttelt Barbara Milow den Kopf: „Kleinhalten ist nicht so mein Ding.“

**Dr. Frank Seidler** ist am DLR-Institut für Werkstoff-Forschung unter anderem verantwortlich für Marketing und Kommunikation.



Flexibles gummiartiges Aerogel aus der Familie der Silica-basierten Aerogele. Dieser Aerogeltyp eignet sich zur thermischen Dämmung oder Abschirmung und kann bei Temperaturen bis zu 500 Grad Celsius eingesetzt werden – zum Beispiel zur Kabinenisolation von Flugzeugen.



# DIE NÄCHSTE GENERATION DER NAVIGATION



Mit dem Integrated Positioning System (IPS) entwickelten Dr. Anko Börner und sein Team vom DLR-Institut für Optische Sensorsysteme eine Technologie, mit der man sich zuverlässig im Raum orientieren kann. Im Gespräch mit DLR-Redakteurin Julia Heil erzählt er, wie aus seiner Idee ein marktreifes Produkt wurde – und warum es wichtig war, dafür öfter mit dem Aufzug zu fahren.

## Dr. Anko Börner

leitet die Abteilung für Echtzeit-Datenprozessierung im DLR-Institut für Optische Sensorsysteme in Berlin-Adlershof. Er ist verantwortlich für das Projekt IPS. Vor 15 Jahren haben er und sein Team mit den ersten Forschungen im Bereich satellitenunabhängige Navigation begonnen.

Das Integrated Positioning System, kurz IPS, macht die Positionsbestimmung ohne Satellitennavigationssysteme möglich

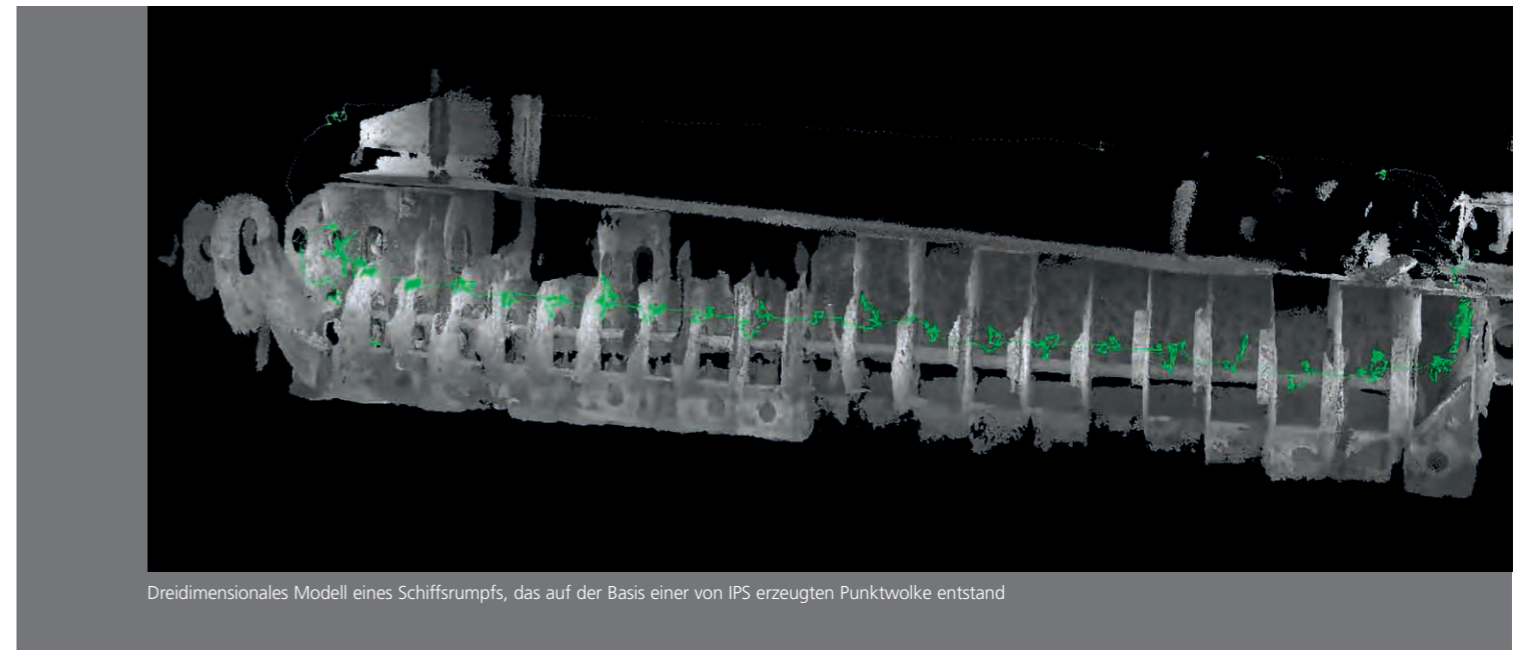
**Navigation ist im Alltag kaum mehr verzichtbar. Wenn wir den Weg wissen wollen, Messdaten verorten oder genaue Modelle von Umgebungen erstellen möchten, ist das Wissen um die eigene Position im Raum unerlässlich. Wo liegen bei aktuell verfügbaren Systemen die Probleme und was war Ihre Idee, um diesen zu begegnen?**

■ Wenn wir von A nach B wollen, geben wir unser Ziel im Navigationssystem ein. Das bestimmt als Erstes, wo wir sind, und führt uns dann zum Ziel. Das funktioniert gut, solange Systeme wie das Global Positioning System, kurz GPS, verfügbar sind, das von Satelliten gesendete Signale auswertet. Allerdings gibt es immer wieder Situationen, in denen wir kein Satellitensignal zur Verfügung haben, beispielsweise in Gebäuden, unter Tage, in Industrieanlagen oder auf dem Mond oder Mars. Dort müssen wir uns aber ebenfalls verorten können. Nun wissen wir, dass der Mensch auch ohne GPS navigieren kann. Unsere Vorfahren fanden immer den Weg zurück zur Höhle. Dafür nutzten sie zwei Sensoren: die Augen und den Gleichgewichtssinn. Wir haben uns gesagt: Wenn der Mensch das mit diesen beiden Sensoren beherrscht, so müsste das auch eine technische Kopie können. Wir ersetzen die Augen durch eine handelsübliche Stereokamera und den Gleichgewichtssinn durch ein sogenanntes Inertial-Messsystem. Diese Daten können wir verknüpfen und zur Positionsbestimmung verwenden.

**Herausgekommen ist das Integrated Positioning System, genannt IPS, das sich ähnlich orientiert wie der Mensch ...**

■ Ja, das ist das Grundprinzip von IPS. Das System enthält ein Stereokamerasystem, also zwei Kameras, die in definiertem Abstand parallel zueinander ausgerichtet sind. Diese nehmen etwa alle 100 Millisekunden Bilddaten auf. Die Bilder werden in Echtzeit auf einen Rechner übermittelt. Dort sucht ein Algorithmus nach Landmarken, sprich auffälligen Punkten. Das kann zum Beispiel in einem Raum eine Türklinke sein oder in der Natur ein Baum. Das Stereokamerasystem liefert dreidimensionale Informationen zu den beobachteten Landmarken. Wenn ich mich mit dem System weiter bewege, die Objektpunkte verfolge und somit diese Punkte aus unterschiedlichen Positionen aufnehme, kann ich den Weg abschätzen, der zwischen den Aufnahmen liegt. Mit der Zeit entsteht dann ein Bewegungspfad. So erschließt sich IPS Stück für Stück den Raum.

Weil wir nur relative Bewegungen bestimmen können, weiß IPS natürlich nicht, ob es sich in Dresden befindet oder in Berlin. Deshalb kann es wichtig sein, die Informationen in die reale Welt einzubinden. Dazu nutzen wir beispielsweise Systeme wie GPS, WLAN oder optische Marken. Das ist nicht für jede Anwendung nötig, aber solche Lösungen sind im System vorhanden. IPS eignet sich außerdem auch zur 3D-Modellierung der Umgebung.



Dreidimensionales Modell eines Schiffsrumpfs, das auf der Basis einer von IPS erzeugten Punktwolke entstand

**Je nachdem, wie Sie sich mit dem System im Raum bewegen und was Sie aufnehmen, können Sie also ein komplettes 3D-Modell der Umgebung erstellen oder auch nur einzelne Gebiete genau untersuchen. Für welche Bereiche ist das interessant?**

■ Aktuell ist unser System auf Inspektionsaufgaben ausgelegt. Zum Beispiel ist es bei der Versicherung von Schiffen wichtig, dass bestimmte Teile, wie die Ballasttanks, in regelmäßigen Abständen geprüft werden. Dafür muss eine Person in den Tank hinuntersteigen und seinen Zustand dokumentieren. Heutzutage geht das noch mit einer Kladde und einem Fotoapparat. Währenddessen muss die Person sich selbst darum kümmern, dass sie die Orientierung behält. Mit unserem System funktioniert das viel einfacher und zuverlässiger. An den Schadstellen macht der Inspekteur mit IPS ein Foto. Dann ist die

Schadstelle dokumentiert und die genaue Position automatisch gespeichert. Diese Inspektionsanwendung funktioniert schon wunderbar. Ein weiterer Anwendungsbereich für das Navigieren mit solchen Technologien ist das automatische Fahren. Hier ist ein hochgenaues und absolut zuverlässiges Navigationssystem eine essenzielle Einstiegsbedingung. Jeder mobile Roboter, jedes autonome System muss wissen, wo es sich befindet und wie seine Umgebung aussieht. Denken Sie an ein autonomes Fahrzeug in einem Parkhaus oder einer Häuserschlucht! Dafür brauchen wir Technologien wie IPS, die nicht auf Satellitendaten angewiesen sind. Außerdem ist das System eine perfekte Erprobungsplattform für künstliche Intelligenz. Wir können Trainingsdatensätze erzeugen, das System bestimmte Aufgaben lernen lassen und so verstehen, wie maschinelles Lernen funktioniert.



Auch in Industrieanlagen, in denen Satellitendaten nicht empfangen werden können, hilft das neue DLR-System bei der Orientierung

**Begonnen hat das Projekt 2004. Wie verlief die Entwicklung von der ersten Idee bis zum fertigen Produkt?**

Am Anfang unserer Forschung stand die Frage, ob ein System unabhängig von Satellitennavigationssystemen zuverlässig navigieren kann. Unser erstes „Testgerät“ war ein Aluminium-Profil, an dem wir mit Klemmen zwei Kameras und ein Inertial-Messsystem befestigten. An diese Konstruktion haben wir einen Laptop angeschlossen und untersucht, ob ein solches Zusammenspiel überhaupt funktionieren kann. Damals war an eine Kommerzialisierung noch nicht zu denken. Dieser Gedanke wurde erst konkret, als wir auf einem DLR-Workshop den großen Schiffsversicherer Det Norske Veritas – German Lloyd (DNV-GL) kennenlernten. Dessen Experten sagten, dass sie genau solch ein System für die Schiffsinspektion brauchten und kamen damit als potenzieller Anwender infrage. Das war vor etwa fünf Jahren. Bis dahin hatten wir das Projekt aus unterschiedlichen Quellen, also aus der Grundfinanzierung, mit Hilfe des DLR-Technologiemarketings und über Drittmittel, finanziert.

**Mit dem Schiffsversicherer hatten Sie dann Ihren Anwender gefunden?**

Genau. Und damit machten wir einen riesigen Schritt nach vorn. Unser Partner nannte uns die exakten Anforderungen an ein solches System: Wie schwer darf das Gerät sein, was muss es aushalten und welche Daten sind wichtig für die Inspektoren? Mit diesen Informationen konnten wir das Gerät so konzipieren, wie es heute ist, und uns auch um die Qualitätssicherung eines solchen Produkts kümmern. Ein kommerzielles System muss absolut zuverlässig funktionieren, auch wenn eine Kamera keinen freien Blick hat oder Personen durch das Sichtfeld laufen. Eines unserer Lieblingsexperimente war es, mit IPS im Aufzug zu fahren. Dort muss es nämlich bemerken, dass es nicht seinen Augen, sondern seinem Gleichgewichtssinn, das heißt den Inertial-Messdaten, vertrauen muss.

Das Projekt zu finanzieren, war allerdings immer noch eine Herausforderung. Wir hatten uns mit IPS für eine Finanzierung beworben, bei der es darum ging, Technologieentwicklungen aus Großforschungseinrichtungen in die Industrie zu überführen. Eigentlich waren wir sehr zuversichtlich, dass wir den Zuschlag bekommen, denn wir hatten eine tolle Idee, ein exzellentes Konsortium, viele Anwendungen – und trotzdem sind wir mehrmals mit unseren Anträgen gescheitert, mal, weil wir die erforderliche Marktreife nicht nachweisen konnten, mal, weil wir zu anwendungsnahe waren. Kollegen, die an den Themen gearbeitet hatten, mussten an andere Projekte abgegeben werden, IPS stand kurz vor dem Aus. Zum Glück ist dann das DLR-Technologiemarketing eingesprungen und hat die Finanzierung für die entscheidende Phase übernommen. Dafür sind wir sehr dankbar! Wir haben in dem gesamten Technologietransferprozess aber auch gesehen, wo wir uns in Zukunft verbessern müssen, um Erfolg zu haben. Wir müssen vor allem in administrativen Belangen viel schneller werden.

**Ihr Navigationssystem wurde im November 2018 mit dem Innovationspreis Berlin Brandenburg ausgezeichnet. Was waren in der Rückschau entscheidende Faktoren für den Erfolg?**

Zu Beginn wussten wir überhaupt nicht, ob die grundsätzliche Idee realisierbar ist. Wir reden hier schließlich über eine Technologie, die es so noch nicht gab, und nicht über den X-ten Nachbau eines Produkts mit kleinen, evolutionären Veränderungen. Als wir dann festgestellt hatten, dass die Technologie funktioniert, wollten wir das Projekt auch zu einem kommerziellen Erfolg führen. Dabei ist ein erfahrenes Team, das über lange Zeiträume an dem Thema arbeiten kann – und wir reden hier über fünf bis zehn Jahre – unerlässlich. Wichtig war auch, dass Kollegen mit unterschiedlichen fachlichen Fähigkeiten eingebunden waren. Unser Kernteam bestand aus Ingenieuren, Mathematikern und Geografen. Und es konnte sich immer auf Unterstützung im Institut verlassen, sei es

„WIR REDEN HIER SCHLIESSLICH ÜBER EINE TECHNOLOGIE, DIE ES SO NOCH NICHT GAB“

Bild: DMT



Das vom DLR entwickelte Integrated Positioning System (IPS) besteht aus einem Stereokamerasystem (links und rechts außen) sowie einem eingebauten Inertial-Messsystem. Eine zusätzliche Kamera (zweite Öffnung von rechts) erstellt das Inspektionsfoto. In der Mitte befinden sich LEDs zur Beleuchtung der Szenerie.

durch das Sekretariat, durch die Techniker, Wissenschaftler oder die Institutsleitung. Das zusammen hat sich hundertprozentig ausgezahlt. Und wir befanden uns in einem permanenten Lernprozess: Normalerweise haben wir hier in unserer Forschung viele Freiheiten. In einem Technologietransferprozess herrschen von heute auf morgen strenge Spielregeln, an die man sich halten muss, ob sie einem gefallen oder nicht. Neben den Entwicklungsarbeiten stehen dann professionelles Management und Qualitätssicherung auf der Tagesordnung und das sind Aufgaben, denen man sich in der Forschung weniger gerne stellt. Wenn auch nur eines der Themenfelder nicht adäquat beherrscht wird, scheitert man. Unser Ziel war es, erfolgreich zu sein. Und Erfolg hieß, dass die Industrie unser System übernehmen kann. Das haben wir geschafft und darauf sind wir sehr stolz.



Bild: DMT

Einsatz von IPS bei der Inspektion eines Bergwerks

Mit IPS wird auch in den Bereichen autonomes Fahren und Erfassung von Straßeninfrastruktur geforscht wie hier mit dem Forschungsfahrzeug des DLR-Instituts für Kommunikation und Navigation



**WO IPS NOCH ZUM EINSATZ KOMMEN KANN**

Neben der Inspektion von Schiffen ist auch die Kontrolle von Schachtanlagen im Bergbau ein Anwendungsgebiet. Die DLR-Wissenschaftler haben IPS in Zusammenarbeit mit dem Spin-off VINS auch bei der Forstinventur eingesetzt. Aktuell wird nur über Stichproben erfasst, wie viele Bäume in einem bestimmten Waldstück stehen. IPS kann genaue Angaben dazu machen, wie viele Bäume mit welcher Höhe und welchem Durchmesser in dem untersuchten Gebiet vorhanden sind. Die Wissenschaftler haben darüber hinaus einen Funktionsdemonstrator entwickelt, der auf unterschiedlichen Fahrzeugen montiert werden kann. Mit einem dieser Systeme waren sie 2018 auf den Straßen Neuseelands unterwegs, um die Verkehrsinfrastruktur an Unfallschwerpunkten zu analysieren.



Dreidimensionales Modell einer Brücke, das ebenfalls auf der Basis einer von IPS erzeugten Punktwolke entstand

# GEBAUT, UM ZU BLEIBEN

## INSTITUTE UND EINRICHTUNGEN IM DLR KÖLN

- Institut für Antriebstechnik
- Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr
- Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin
- Institut für Materialphysik im Weltraum
- Institut für Solarforschung
- Institut für Werkstoff-Forschung
- Institut für Technische Thermodynamik
- Nutzerzentrum für Weltraumexperimente (MUSC)
- Qualitäts- und Produktsicherung
- Simulations- und Softwaretechnik
- Systemhaus Technik
- Technologiemarketing
- Über- und Hyperschalltechnologien
- Astronautentraining
- DLR\_School\_Lab

## PARTNEREINRICHTUNGEN AM STANDORT

- Europäisches Astronautenzentrum (EAC)
- Europäischer Transsonischer Windkanal (ETW)
- Kryo-Kanal Köln der Deutsch-Niederländischen Windkanäle (DNW-KKK)

**Was den DLR-Standort Köln 1959 und 2019 eint, sind Baustellen. Während sie damals den Neuanfang einleiteten, tragen sie heute dem Wachstum des DLR Rechnung. Hier, am Sitz des Vorstands und der Hauptverwaltung, laufen die Fäden der Forschungsbereiche Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Verkehr, Sicherheit und Digitalisierung zusammen.**

## 60 Jahre DLR-Standort Köln

Von Julia Heil und Michel Winand

Franz Josef Strauß, 1959 Bundesverteidigungsminister, legte mit seinem Spatenstich auf dem Gelände der ehemaligen Dynamitfabrik Wahn den Grundstein für einen der modernsten Forschungs- und Entwicklungsstandorte in Europa. 1953 hatten die Siegermächte die nach dem Zweiten Weltkrieg verhängte Sperre, Luftfahrtforschung zu betreiben, aufgehoben. Das Interesse von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik wuchs, im Nachkriegsdeutschland wieder eine moderne Forschungsanstalt für die Luftfahrt zu etablieren. Der vorläufige Standort der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) – der Vorgängerorganisation des DLR – in Aachen platze schon bald aus allen Nähten. Ein vorübergehender Standort am Flughafen Essen-Mühlheim erwies sich langfristig als ungeeignet, um dort dauerhaft zu bleiben. Eine neue Lösung musste her: ein Gelände mit Flughafen-Anbindung für den Forschungsflugbetrieb und genug Platz für neue Institute und Einrichtungen. Das damals 35 Hektar große Gebiet am Rand der Wahner Heide in unmittelbarer Nähe des Flughafens Köln erfüllte alle Voraussetzungen.

### Auf 55 Hektar Forschung vom Feinsten

In den folgenden Jahren etablierte sich das DLR Köln mit den Instituten für Luftstrahltriebwerke, Angewandte Gasdynamik, Raumfahrtforschung, Werkstoff-Forschung und Festigkeit nicht nur als renommierter Standort der deutschen Luftfahrtforschung. Auch die Weltraumforschung nahm Fahrt auf. Beispielsweise bereiteten sich die deutschen Astronauten in Köln auf die Missionen Spacelab-1, D1, D2, MIR'92 und MIR'97 vor. Heute werden von dem mittlerweile 55 Hektar großen Gelände aus Explorationsmissionen wie Rosetta, MASCOT oder InSight, aber auch wissenschaftliche Experimente auf der Internationalen Raumstation ISS begleitet. Materialphysiker forschen zu den Einflüssen von Schwerelosigkeit auf Werkstoffe oder erproben, wie man Gebäude aus Mondstaub auf dem Erdtrabanten bauen kann. Im Astronautentrainingszentrum der Europäischen Weltraumorganisation ESA finden die Auswahl und das vorbereitende Training von Raumfahrern statt. Als der deutsche ESA-Astronaut Alexander Gerst 2014 von seinem



Der DLR-Standort Köln ...

gestern

... und

heute

Luftbildaufnahmen von 1965 und 2017

ersten Raumflug zurückkehrte, flog er zu den Nachuntersuchungen nicht wie seine Vorgänger nach Houston oder Moskau, sondern kam als erster Europäer direkt ins DLR nach Köln, wo er in der luft- und raumfahrtmedizinischen Forschungseinrichtung :envihab betreut wurde. Heute kommen die meisten europäischen Astronauten direkt nach ihrer Landung ins DLR nach Köln.

Auch die Luftfahrtforscher schreiben in Köln ihre Tradition beständig fort. Ein Beispiel ist der Hochdruckbrennkammerprüfstand HBK-5 des Instituts für Antriebstechnik. Er wurde gemeinsam mit den Industriepartnern Alstom und Rolls-Royce gebaut und 2014 eingeweiht. Seitdem werden dort sowohl Gasturbinen für Anwendungen in der Energietechnik als auch in der Luftfahrt getestet. Europäische und internationale Bedeutung erlangte der Standort durch die Zusammenarbeit mit der Vereinigung Deutsch-Niederländische Windkanäle (DNW) und dem Europäischen Transsonischen Windkanal (ETW). Viele Institute arbeiten zudem eng mit der Industrie zusammen und stellen so sicher, dass wissenschaftliche Forschungsergebnisse und Technologien schnell ihren Weg in marktfähige Produkte finden. Auch innerhalb des Standorts gibt es kurze Wege und Synergien bei der Zusammenarbeit: Ideen für neue Turbinenschaukeln werden im Institut für

Antriebstechnik entwickelt und im Systemhaus Technik des DLR in Köln für den Testbetrieb als Prototypen gebaut.

### Investitionen in die Zukunft

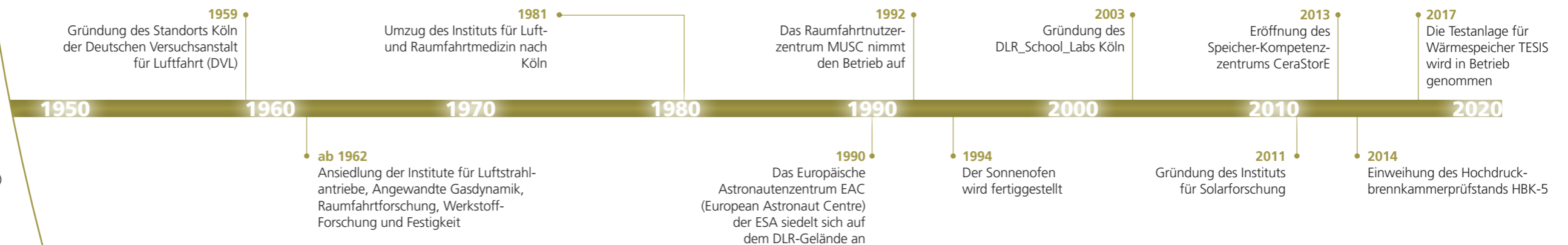
Insgesamt arbeiten die Forschungseinrichtungen im DLR Köln in allen Themenbereichen des DLR. Anwendungsnahe Institute wie das für Technische Thermodynamik, für Werkstoff-Forschung und für Solarforschung nutzen die im Rahmen ihrer Weiterentwicklung erforderlichen Forschungsanlagen gemeinsam mit internen und externen Partnern.

Das sorgt immer wieder für Baustellen am Standort Köln. So forschen seit 2013 im Kompetenzzentrum CeraStorE die oben genannten Institute zusammen an Speichertechnologien für eine nachhaltige Energieversorgung. Eine der jüngsten Großanlagen ist die 2017 in Betrieb gegangene Testanlage TESIS, mit der Speichertechnologien in industriellem Maßstab weiterentwickelt werden. Aktuell sind ein Forschungsgebäude für das Zentrum für Luft- und Raumfahrtmedizin der

Luftwaffe sowie ein neues Vorstandsgebäude im Bau. In diesem Sinn wird sich der Standort Köln als „Zentrale des DLR“ auch künftig weiterentwickeln. Und so werden seine Besucher wohl auch in den nächsten Jahren noch auf die eine oder andere Baustelle treffen.

**Wir sind gut gerüstet für die Zukunft!  
Egal ob Energiewende, Turbinenforschung,  
neue Werkstoffe oder Flüge zu  
Mond beziehungsweise Mars – das DLR in  
Köln wird zu all diesen Themen einen  
Beitrag leisten.**

Dr. Rolf-Dieter Fischer,  
Standortleiter



# WENN DER BUS KOMMT WIE GERUFEN

**D**er Bus kommt genau dann, wenn man ihn braucht, und setzt seine Fahrgäste dort ab, wo sie hin wollen, und das Ganze schnell, flexibel und zuverlässig. – Der Traum all jener, die öffentliche Personennahverkehrsmittel nutzen. Fachleute aus drei DLR-Verkehrsinstituten testeten mit einem digital gestützten „Bedarfsbus“, wie das funktionieren könnte. – Die Bilanz eines Praxistests.

Reallabor Schorndorf: DLR-Verkehrsforscherinnen und -Verkehrsforscher entwickelten und erprobten ein digitales, innovatives Konzept für den bedarfsgerechten Busverkehr

Von Denise Nüssle

Neugier, Spannung, Freude, manchmal auch Enttäuschung und Ärger – eine ganze Palette von Emotionen zeichnete sich ab, wann immer die beiden Kleinbusse des Reallabors Schorndorf um die Ecken der teils engen Straßen in der Schorndorfer Südstadt bogen. Die Herausforderung: Die Passagiere entsprechend den individuellen Fahrtwünschen pünktlich und punktgenau abholen und an ihrem jeweiligen Ziel absetzen – also Busfahren ohne feste Routen und Haltestellen. Für rund drei Jahre war das östlich von Stuttgart gelegene Mittelzentrum mit seinen rund 40.000 Einwohnern Schauplatz eines europaweit einmaligen Forschungsprojekts. Am Geburtsort Gottlieb Daimlers, dessen Namen einer der Busse trägt, entwickelten und erprobten Verkehrsforscherinnen und -forscher des DLR gemeinsam mit Partnern und den Bürgern vor Ort eine Lösung für die Mobilität der Zukunft. Statt nach Fahrplan fuhr der Bus nur nach Bedarf – nicht als zusätzliches Angebot wie in anderen Projekten, sondern als Ersatz für zwei bestehende Buslinien. Das Ziel: den öffentlichen Nahverkehr flexibler und nachhaltiger gestalten und damit enger an den Bedürfnissen der Nutzer ausrichten. Gleichzeitig sollten Leerfahrten vermieden, der Verkehr damit reduziert und so Ressourcen gezielter eingesetzt werden.

## Busfahren on demand: flexibel mobil auch in Nebenzeiten

„Viele innovative Mobilitätsangebote konzentrieren sich auf bestimmte Zielgruppen oder den innerstädtischen Bereich von Metropolen. Schorndorf hingegen steht mit seiner Struktur stellvertretend für viele Gemeinden in Deutschland, die angesichts ihrer Größe und Lage bei dieser Entwicklung bisher selten berücksichtigt wurden. Doch gerade in solchen Gegenden empfinden viele den Nahverkehr als unzureichend und wenig flexibel“, beschreibt Mascha Brost, DLR-Wissenschaftlerin und Projektleiterin des Reallabors, die Ausgangslage. Exemplarisch zeigt sich hier auch das Dilemma des öffentlichen Nahverkehrs in Zeiten schwacher Auslastung, zum Beispiel abends oder an Wochenenden: Bedienen Busse ein engmaschiges Netz mit dichtem Takt, fahren sie oft nur mit wenigen Passagieren oder ganz leer. Ein niedriger Takt mit nur einzelnen Routen hält zwar die Kosten und Umweltbelastung geringer, ist aber aus Sicht der Fahrgäste unflexibel und daher wenig attraktiv. Eine Lösungsmöglichkeit sind Bedarfsbusysteme. „Wir wollten im Reallabor Schorndorf herausfinden, wie Busfahren ‚on demand‘ für alle Bevölkerungsgruppen funktionieren kann und welche Chancen und Herausforderungen die Einführung eines solchen Systems mit sich bringt“, fasst Mascha Brost zusammen. Besonders im Fokus standen dabei drei Schwerpunkte: das Bedienkonzept für den Bedarfsbus, die Beteiligung der Menschen vor Ort und die Entwicklung innovativer Fahrzeugkonzepte für zukünftige Bedarfsbusysteme.

Mit dem Startschuss im Februar 2016 begann für das Projektteam eine spannende, arbeitsreiche sowie fachlich und persönlich fordernde Zeit: Denn neben dem wissenschaftlichen Interesse sollte von Null an ein funktionierendes Bedarfsbusystem aufgebaut werden, das sich im Pilotbetrieb über einen Zeitraum von neun Monaten bewähren und die öffentliche Daseinsvorsorge gewährleisten musste. Deshalb galt es, möglichst zügig die Ausgangslage vor Ort genau unter die Lupe zu nehmen, Fahrzeuge zu organisieren sowie die Rahmenbedingungen und regulatorischen Anforderungen im öffentlichen Personennahverkehr zu berücksichtigen. Konkret bedeutete das zum Beispiel, herauszufinden, wo die Kleinbusse des Reallabors überhaupt fahren und halten konnten und durften. Beim Abgehen des Einsatzgebiets in der Schorndorfer Südstadt erfasste das Team Verkehrszeichen, Fußgängerwege, Kantens und Absätze, um so neben den vorhandenen Haltestellen mehr als 200 zusätzliche potenzielle Ein- und Ausstiegsorte festzulegen. Diese virtuellen Haltepunkte und flexiblen Fahrstrecken ermöglichten neue, individuelle Direktverbindungen und kürzere Fußwege zu den Haltepunkten.

## Erfolgsfaktor Partizipation: Schorndorfer Bürger als Experten vor Ort

Von Beginn an begleitete das Team des Reallabors das Projekt mit einer umfangreichen Kommunikations- und Partizipationskampagne, um die Schorndorfer Bürger und kommunalen Gremien zu informieren und aktiv einzubinden: Dazu gehörten öffentliche Informationsveranstaltungen, Befragungen, Interviews und die Begleitung von Testnutzern genauso wie



App zur Bestellung des flexiblen Bedarfsbusses im Reallabor Schorndorf



Abbildungen: Reallabor Schorndorf

Infos, Infos, Infos ... um möglichst viele Menschen vor Ort mitzunehmen



Im Reallabor Schorndorf verkehrten zwei Kleinbusse



Bedienoberfläche für die Busfahrer



Katharina Karnahl (links), DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig; fachlicher Hintergrund: Verkehrswesen und Management; im DLR seit 2002; Schwerpunkte: Geschäftsfeldentwicklung für Forschungsthemen mit Schwerpunkt öffentlicher Nahverkehr und Intermodalität

Mascha Brost (Mitte), DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart; fachlicher Hintergrund: Maschinenbau und Integral Design; im DLR seit 2015; Schwerpunkte: Studien und Technologiebewertung für nachhaltige Fahrzeugkonzepte

Laura Gebhardt (rechts), DLR-Institut für Verkehrsforschung, Berlin; fachlicher Hintergrund: Geografie, Soziologie und Stadtforschung; im DLR seit 2014; Schwerpunkte: Mobilitätshandeln von Menschen im städtischen Kontext, zukünftige Mobilitätskonzepte

### Bedienkonzept: digitales Herz des Bedarfsbussystems

Mit diesem Wissen als Grundlage machte sich die Reallabor-Gruppe daran, das digitale Bestellsystem zu erarbeiten. Als zentrale Komponente verband das Team sämtliche Akteure des Bedarfsbussystems miteinander. Per Smartphone-App, Website, Telefon oder in teilnehmenden Geschäften, Restaurants und Cafés konnten Nutzer ihren Fahrtwunsch übermitteln, also wo und wann sie abgeholt und wohin sie gebracht werden wollten. Ein spezieller und ständig optimierter Algorithmus berechnete dann aus allen Anfragen eine Route und teilte den Nutzern die tatsächliche Abholzeit sowie den Zustiegsort mit. Die Fahrer der beiden Kleinbusse erhielten die jeweils aktuelle Strecke ebenfalls über eine eigens für diesen Einsatz programmierte Nutzeroberfläche angezeigt. „In die Entwicklung des Bedienkonzepts ist das Know-how aller Projektpartner eingeflossen. Da wir vor dem Live-Betrieb keine lange Testphase hatten, standen wir alle immer wieder vor der Herausforderung, das System im laufenden Betrieb weiterzuentwickeln, sprich Fehler schnell zu beheben und Rückmeldungen der Nutzer einzuarbeiten, um so die Performance zu gewährleisten und zu verbessern“, erläutert DLR-Verkehrsforscherin Mascha Brost.

### Bewährungsprobe: der Bedarfsbus im Live-Betrieb

Nach zweijähriger Vorbereitungs- und Entwicklungszeit startete im März 2018 der Live-Betrieb des Bedarfsbusses: Die beiden speziell für den öffentlichen Personennahverkehr umgerüsteten Kleinbusse des Reallabors Schorndorf waren von Freitagmittag bis Betriebschluss Sonntagnacht im Einsatz. Außerhalb dieses Zeitraums galt der normale Fahrplan. Speziell die ersten Wochenenden des Live-Betriebs waren mit sehr vielen Herausforderungen und Emotionen verbunden. Mitglieder des Projektteams fuhren teilweise rund um die Uhr in den beiden Bussen mit, um das Konzept zu erklären und bei Problemen zu helfen. „Die Erwartungen waren extrem hoch und gerade in der Anfangsphase, als das Buchungssystem nicht immer rundlief, haben wir neben konstruktiver Kritik viel Ärger abbekommen, den man erst mal verdauen musste.“ Eine wichtige Unterstützung erfuhr das Projektteam dabei von den Busfahrern, erinnert sich Laura Gebhardt: „Wir waren absolut begeistert. Die Busfahrer haben mitgedacht, spontan Lösungen gefunden, geduldig mit uns zusammen den Nutzern immer wieder das Konzept erklärt und sich schnell an eine komplett andere Betriebsweise angepasst.“

Als Anfang Dezember der Live-Betrieb des Bedarfsbusses nach 39 Wochenenden zu Ende ging, konnte das Team auf eine sehr spannende und bewegte Zeit zurückblicken. Aus wissenschaftlicher Perspektive gab es eine Vielzahl an Daten und Erfahrungen, deren Auswertung neue Erkenntnisse liefert, wie sich zukunftsweisende Mobilitätskonzepte für den öffentlichen Nahverkehr gestalten

umsetzen lassen. Die beiden Kleinbusse beförderten mehr als 10.000 Fahrgäste und legten über 20.000 Kilometer zurück. Durchschnittlich nutzten jedes Wochenende 250 Personen das Angebot. Zwei Drittel bestellten den Bus mittels App, ein Drittel nutzte den telefonischen Bestellservice, die weiteren Möglichkeiten der Bestellung mittels Website und in teilnehmenden Einrichtungen fanden hingegen nur selten Anwendung.

„Der praktische Betrieb hat sehr gut die Chancen und Herausforderungen eines solchen Mobilitätssystems aufgezeigt“, bilanziert Mascha Brost. Im Vergleich zum Liniensystem konnten etwa zehn Prozent der Fahrzeugkilometer und gut 20 Prozent der möglichen Umläufe eingespart werden, weil keine Buchungen vorlagen. Da kleinere Busse im Einsatz waren, sank der Kraftstoffverbrauch um mehr als die Hälfte und das Vermeiden von Leerfahrten kam bei vielen Bürgern sehr gut an. Ein positiver Trend zeigte sich auch in den Nutzerbefragungen: Waren im Mai rund 35 Prozent mit dem Buskonzept des Reallabors zufrieden oder sehr zufrieden, steigerte sich der Anteil Ende Oktober auf 50 Prozent. Den Grund sehen die Wissenschaftlerinnen vor allem in der kontinuierlichen Verbesserung des Systems und dem Gewöhnungseffekt. Deutlich zeigte sich dabei ein Generationensplit: Jüngere kamen mit dem System tendenziell besser zurecht und waren zufriedener als Ältere.

Rückblickend sind sich die DLR-Forscherinnen einig, dass das Projektteam dank des großen persönlichen Engagements aller Beteiligten die bestmögliche Lösung auf die Beine gestellt hat. „Schwieriger als gedacht war es allerdings, mit den begrenzten Mitteln eines Forschungsprojekts wirklich alle potenziellen Nutzer zu informieren und mitzunehmen, besonders im Hinblick zum Beispiel auf das Thema Barrierefreiheit“, bilanziert Katharina Karnahl, die am DLR zu Betriebskonzepten im öffentlichen Nahverkehr forscht und im Reallabor Schorndorf die Umsetzung des Bedienkonzepts betreute.

Deutlich habe sich auch herausgestellt, dass Veränderungen im öffentlichen Nahverkehr sehr viel Zeit brauchen: „Wir haben unterschätzt, wie sehr die Menschen durch ihre Routinen geprägt sind“, so Karnahl weiter. Gleichzeitig freute sich das Projektteam immer wieder über die sehr engagierte Mitarbeit und die teils sehr detaillierten, konstruktiven Vorschläge von Seiten der Nutzer, um das Projekt gemeinsam nach vorne zu bringen. „Es hat sich im Laufe der Zeit eine eigene Reallabor-Community entwickelt – aus Bürgern, Busfahrern und dem Projektteam“, resümiert Laura Gebhardt.

Schon während des Projekts erhielt das Team des Reallabors Schorndorf viele Anfragen, seine Arbeit in Vorträgen und Publikationen vorzustellen – von Kommunen, Verbänden, Unternehmen und aus der Wissenschaft. Auch nach dem offiziellen Ende geht für die Forscherinnen die Arbeit weiter: Die erhobenen Daten wollen final aus-

gewertet und Publikationen geschrieben werden. Der Wissensdurst ist weiterhin da: „Wir haben alle Lust, in diesem Themenbereich weiter zu forschen und innovativen Mobilitätskonzepten auf den Grund zu gehen. Spannend wäre es beispielsweise, weitere Szenarien für die Anwendung von Bedarfsbuskonzepten zu entwickeln“, so die Wissenschaftlerinnen mit Blick in die Zukunft und auf weitere mögliche gemeinsame Projekte.



Forschen unter Alltagsbedingungen bedeutet, das Erfahrene permanent zu überprüfen

## REALLABOR SCHORNDORF

**Begriff:** Ein Reallabor ist ein Forschungsformat, bei dem Fachleute aus der Wissenschaft mit Partnern aus der Praxis (Unternehmen, Kommunen) und der Zivilgesellschaft (Bürger vor Ort) zusammenarbeiten. Gemeinsam stoßen sie Veränderungen an und begleiten, beobachten und analysieren den Transformationsprozess. Im Vordergrund steht das gegenseitige Lernen in einem experimentellen Umfeld.

**Förderung:** Das Reallabor Schorndorf war eines von sieben Forschungsprojekten, die vom baden-württembergischen Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst gefördert wurden, um zukunftsfähige Lösungen für Herausforderungen in Ballungsräumen zu erproben.

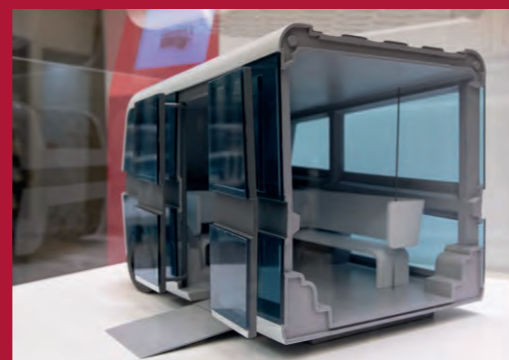
**Partner:** Zu den Partnern der DLR-Verkehrsinstitute zählten die Stadt Schorndorf, der Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart (VVS), Knauss Linienbusse, die Hochschule Esslingen sowie das Zentrum für interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS) der Universität Stuttgart.

## INNOVATIVE FAHRZEUGKONZEPTE FÜR DEN BEDARFSBUS DER ZUKUNFT

Die Entwicklung neuartiger Fahrzeugkonzepte war ein weiterer Schwerpunkt im Reallabor Schorndorf. Dazu entwarf das Team virtuelle Designs und setzte einige davon als Modelle im Maßstab 1:10 um. Die Konzepte wurden möglichst optimal auf die Anforderungen eines Bedarfsbuskonzepts ausgelegt. Größe, Zahl der Sitzplätze, Barrierefreiheit und Innenraumgestaltung flossen dabei genauso in die Überlegungen ein wie Fragen nach Antriebstechnologie, Energieverbrauch und Emissionsausstoß.



Barrierefreiheit war ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung des Fahrzeugkonzepts



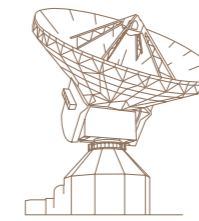
Design-Modelle zukunftsweisender Fahrzeugkonzepte für Bedarfsbussysteme





Selbst im Morgennebel weithin sichtbar: die 30-Meter-Antenne von Weilheim

# DAS NERVENSYSTEM DER SATELLITENKOMMUNIKATION



**W**er Satelliten oder die Internationale Raumstation (ISS) zuverlässig erreichen will, braucht ein weltumspannendes Netz von Empfangsstationen und Datenleitungen. Die Herausforderung: Es darf nie ausfallen. Teil 9 der DLR-Magazinserie **Großanlagen**.

Ein Netz von Stationen am Boden sichert den Informationsaustausch mit Orbitern und Sonden im Weltraum

Von Florian Kammermeier

Zwischen Erde und Weltraum herrscht reger Datenverkehr. Mehr als 1.700 Satelliten werden von den Nationen der Erde betrieben. Rund um die Uhr werden Kommandos ins All gesendet und Daten von den Orbitern empfangen.

Satelliten von der Erdoberfläche aus zuverlässig zu erreichen, kann jedoch eine echte Herausforderung sein. Denn viele von ihnen sind unstete Gesellen: Etwa 1.000 der Satelliten kreisen mit hohen Geschwindigkeiten in niedrigen Orbits in Höhen von 200 bis 2.000 Kilometern um die Erde. Zumeist beobachten sie – die Erde, die Atmosphäre, Wolken. Die meisten von ihnen sind Forschungssatelliten. So wie die Internationale Raumstation ISS umrunden viele von ihnen die Erde in nur etwa 90 Minuten, also 16 Mal täglich. Sie sind so schnell, dass sie über den Empfangsstationen am Boden immer nur kurz auftauchen und nach fünf bis 15 Minuten Kontaktzeit wieder hinter dem Horizont verschwinden.

Viele Satelliten kreisen auf sogenannten polaren Bahnen – jede Bahn läuft also von Pol zu Pol. Weil die Erde sich darunter immerzu dreht, ist jede Bahn zur vorherigen leicht versetzt, wodurch der Satellit mit der Zeit jeden Teil der Erde überfliegt. Gerade diese Satelliten müssen oft kommandiert werden, wenn sie beispielsweise Experimente an Bord haben oder einen Waldbrand beobachten sollen. Und sie senden große Datenmengen – Satelliten wie Sentinel P5 beispielsweise, der die Zusammensetzung der Atmosphäre misst, schickt 240 Gigabyte pro Tag zur Erde. Auch „junge“ Satelliten brauchen viele Kontaktzeiten, wenn sie kurz nach dem Start auf ihrem Weg in den Orbit sind und, dort angekommen, in Betrieb genommen werden.

## Keine Sache für eine allein

Aus all dem erwächst ein Bedarf an vielen und möglichst langen Kontaktzeiten. Selten reicht dafür eine einzige Empfangsstation aus. In den Empfangsbereich der DLR-Station in Weilheim südlich von München beispielsweise kommen Satelliten polarer Orbits etwa viermal am Tag für jeweils zehn Minuten.

Mehr Kontakte schaffen Antennen, die näher an den Polen der Erde stehen. Während bis zu zwölf von insgesamt 16 Umrundungen an einem Tag können in der Arktis Kontakte hergestellt werden. Aber: Bei lediglich einer polaren Antenne sind Satelliten auch im besten Fall zwischen zwei Überflügen über eine Stunde lang nicht erreichbar.

Um große Datenmengen übertragen zu können, um dauerhafte Kontakte zu ermöglichen oder um im Notfall zu jeder Zeit Kommandos schicken zu können, werden weltumspannende Netzwerke aus Empfangsstationen und Datenleitungen betrieben – Nervensysteme des Satellitenbetriebs. Auch das DLR hat so ein Netzwerk. Betrieben, verwaltet und tatsächlich auch gestaltet wird es vom Deutschen Raumfahrt-Kontrollzentrum (GSOC) und dem Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD). Eigentümer ist das DLR aber nur von einem Teil des Empfangsnetzwerks: Das sind die zwei großen deutschen Stationen Weilheim und Neustrelitz sowie der Antennenstandort Oberpfaffenhofen, eine kleinere in Nordkanada und eine in der Antarktis; dazu noch einige Kilometer Glasfaserkabel. Ein Großteil des „Nervensystems“ gehört anderen. Es gibt Empfangsstationen in den Händen weiterer Raumfahrtorganisationen oder privater Firmen; die Datenleitungen gehören überwiegend Netzbetreibern wie der Telekom. In diesem internationalen Anlagen-Pool werden Kooperationen und Geschäftsbeziehungen gepflegt. Die Daten der japanischen Weltraumsonde Hayabusa2 zum Beispiel, die 300 Millionen Kilometer zu dem kleinen Asteroiden Ryugu geflogen ist, wurden vom DLR in Weilheim empfangen. Das DLR wiederum kontaktiert seine Satelliten auch mal via NASA-Antenne oder über private Stationen wie die auf Spitzbergen. Von wo aus der Kontakt hergestellt wird, hängt von der Art der Mission ab: Wo und auf welcher Flugbahn ist das Zielobjekt? Wie stark muss der Empfänger sein, um die Daten aufzunehmen?

#### Verstärken, übersetzen, weitergeben

Die Empfangsstationen verantworten dabei alles, was zwischen der Datenabgabe durch den Satelliten und der Einspeisung in das Kabel passiert. Die Mitarbeiter warten die Antennen, organisieren die richtigen Empfänger für den Betrieb, richten die Parabolspiegel auf die Satelliten aus und sorgen dafür, dass die Schüsseln den Satelliten nachgeführt werden. Sobald die Datenfracht den Boden erreicht, werden die Signale künstlich verstärkt und in das Basisband-Gerät eingespeist. Dieses übersetzt in Computersprache: Analoge Signale mit Codierungen und eventuellen kleinen Fehlern kommen rein, bereinigte digitale Daten gehen raus – nun für jeden Computer les- und bearbeitbar. Ein Geschäft, das früher anfällig für Ausfälle gewesen sei, wie Martin Häusler, Leiter der Bodenstation in Weilheim, erzählt. „Mittlerweile sind wir beim Empfang von Satellitendaten aber sehr zuverlässig und routiniert“, sagt er. „Heute ist vieles standardisiert. Hält man sich an die Standards, funktioniert auch alles.“

Diese Prozesse laufen in allen Stationen ab, die rund um den Globus für das DLR Daten empfangen. Zusammen laufen sie beim DFD und

im GSOC am DLR-Standort in Oberpfaffenhofen. Dort ist sozusagen die Zentrale des Nervensystems. Egal ob die Daten aus dem 30 Kilometer entfernten Weilheim kommen, dem norddeutschen Neustrelitz oder dem 6.700 Kilometer entfernten Inuvik in Nordkanada.

Manchmal sind diese Wege weit, wie vom nordkanadischen Inuvik nach Oberpfaffenhofen. Dann legt die Datenfracht eines Satelliten auch einmal mehr Kilometer am Boden zurück als auf ihrem Weg zur Erde. Um die Nervenstränge auf der Erde kümmert sich eine eigene Abteilung: Kommunikation und Bodenstationen. Auch von den Kabeln wird viel gefordert: Sie müssen einen stabilen Signalfluss gewährleisten, für eine Satellitenübertragung muss also immer Bandbreite verfügbar sein; die Wartung bei Schäden muss schnellstmöglich erfolgen und die Leitung muss sicher sein gegen Abhörversuche. „Das klassische Internet ist für unsere Zwecke zu unzuverlässig und die Wartung von Internet-Datenkabeln dauert zu lange. Wir können nicht mehrere Wochen warten, bis ein Kabel repariert wird“, sagt Dr. Osvaldo Peinado von der Abteilung Kommunikation und Bodenstationen. Wann immer es möglich sei, greife man daher auf Kabel privater Unternehmen zurück, wie beispielsweise auf eine Leitung, die von der Telekom zwischen München und Stockholm gelegt wurde. Für mehrere Tausend Euro monatlich können Firmen und Institute Bandbreiten darin reservieren und auf direktem Weg Daten schicken.

#### Verbindungen buchen, mit Netzanbietern verhandeln

Ähnliche Kabel führen in viele Regionen der Welt und verbinden auch Europa und Amerika. Selten verläuft jedoch ein Kabel aus der Region um Oberpfaffenhofen direkt bis zum Zielort. In der Praxis bedeutet das, verschiedene Kabel zu einer Empfangsstation auf möglichst kurzem Weg zu buchen und dafür Verhandlungen mit verschiedenen Netzanbietern zu führen. „Wenn eine Empfangsstation nur für eine spezielle Mission gebraucht wird, kann es sein, dass so eine Verbindung nur für wenige Wochen gemietet wird“, sagt Osvaldo Peinado. Auch Firmen haben sich mittlerweile auf diesem Markt eingeschaltet und bieten Satellitenkontakte als eine Art Gesamtpaket an. Sie unterhalten Stationen rund um die Welt und haben feste Verbindungen von ihrer Zentrale dorthin gebucht. Das DLR als Satellitenbetreiber muss dann lediglich ein Kabel bis zu dieser Zentrale buchen – zwei Beispiele sind Kongsberg Satellite Services (KSAT) im norwegischen Tromsø und die Swedish Space Corporation (SSC) in Stockholm.

Dass es auch in privaten Kabeln eng werden kann, zeigt eine Geschichte, die Peinado erzählt. Als das Glasfaserkabel nach New York noch neu war, sei die Leistung für DLR-Übertragungen immer wieder eingeknickt. Über Wochen habe man das Phänomen beobachtet, die Einbrüche hätten meist gegen 10 Uhr vormittags an der Ostküste stattgefunden. Warum, das habe man anfangs nicht verstanden. „Die Technik funktionierte einwandfrei“, erzählt Peinado. „Ein Kollege fand dann die Ursache: Um 9.30 Uhr öffnet die Wallstreet. Der Aktienhandel überlastete die Leitung.“

International Satellite Station Facility (ISSF) Inuvik, Kanada



#### DOPPELT HÄLT BESSER

Der denkbar schlechteste Zeitpunkt, um die Verbindung zu verlieren: 2008 wird vom DLR in Oberpfaffenhofen aus das europäische Columbus-Modul an die ISS andockt. Der DLR-Standort ist voller Journalisten und Politiker, die den historischen Moment verfolgen. Fünf Minuten vor dem Andockmanöver blinken die Warnleuchten in der Abteilung, die für die Datenleitungen zur Empfangsstation zuständig ist. Das Hauptkabel ist ausgefallen. Ein Bagger hatte bei Bauarbeiten am Standort die Leitung erwischt. Das Andock-Team bekam davon allerdings erst nach erfolgreicher Mission etwas mit. Die Backup-Leitung hatte automatisch übernommen. Für den Rest des Andockmanövers verließen die Daten das Gebäude nicht mehr durch das zertrennte Kabel auf der Vorderseite, sondern durch die Ersatzleitung auf der Rückseite. – Doppelt hält eben doch besser.

Nicht nur der Aktienhandel kann der Datenübertragung der Satelliten gefährlich werden, manchmal fallen Leitungen ganz aus. Vor Florida erwischte einst ein Fischer ein transatlantisches Kabel mit seinem Fangnetz. Eine Woche lang fiel deshalb die direkte Verbindung von Oberpfaffenhofen nach Houston aus. Aber: kein Problem. „Wir haben auf die Ersatzleitung nach Houston über New York um-

gestellt, bis das Hauptkabel repariert war“, erinnert sich Peinado. Das Redundanz-Prinzip gilt für alle Leitungen. Selbst wenn sie nur wenige Kilometer lang sind, gibt es immer zwei Kabel, die getrennt voneinander zum selben Ziel führen.

Und im DLR bedeutet das: Alle Kabel führen nach Oberpfaffenhofen.



#### NEUSTRELITZ

Die Tradition des Standorts Neustrelitz als Empfangsstation reicht bis 1913 zurück, als das Kaiserliche Telegraphenversuchsamit mit Antennen bis zu 100 Kilometer weit Signale sandte. Heute ist Neustrelitz ein fester Knoten im globalen Netzwerk von Bodenstationen. Der Fokus liegt auf dem Nutzlastdatenempfang von Fernerkundungsmissionen und wissenschaftlichen Kleinsatellitenmissionen sowie Echtzeit-Datenverarbeitung.



#### WEILHEIM

In dem Ort 50 Kilometer südwestlich von München befindet sich die größte Empfangsstation des DLR. Sie ist bekannt durch ihre markante 30-Meter-Antenne. Von hier werden Signale von Sonden aus den Tiefen des Alls empfangen, so wie im Herbst 2018 von der japanischen Mission Hayabusa2, die 300 Millionen Kilometer entfernt von der Erde einem Asteroiden nachjagte. Vom DLR-Standort in Weilheim aus empfängt auch die Bundeswehr Signale ihrer geostationären Satelliten.

#### INUVIK

Bis zu plus 30 Grad Celsius im Sommer und minus 40 Grad Celsius im Winter – die Empfangsstation im Norden Kanadas verlangt ihrem Team viel ab. Dafür ist ihre Position für das Empfangssystem des DLR besonders wertvoll: Sie ist so nah am Nordpol, dass Satelliten bis zu zwölf Kontakte pro Tag schaffen. Die Einweihung der Station intensivierte die Zusammenarbeit der deutschen und kanadischen Raumfahrer – und sie genoss im wörtlichen Sinn den Segen der örtlichen Inuit-Stämme, deren Ältesten die Station weihten.



#### GARS O'HIGGINS

Wenn ein Ort noch unwirtlicher als Inuvik sein kann, dann ist es wohl die Station Gars O'Higgins. Stürme mit bis zu 300 Stundenkilometern fegen über sie hinweg. Die Station kann nur per Schiff oder Flugzeug versorgt werden, im Winter ist die vierköpfige Besatzung nur aus der Luft erreichbar. Die Lage der Station auf der antarktischen O'Higgins-Halbinsel ist jedoch für die Satellitenkommunikation so günstig, dass ganzjährig dort gearbeitet wird. Zum Festland gelangen die Satellitendaten dann allerdings wiederum per Satellit – oder per Magnetband auf dem Wasser- beziehungsweise Luftweg.

Hintergrundbild: Die 9-Meter-Antenne von GARS O'Higgins



# BEGEISTERUNG IM STADION – AUCH OHNE RUNDES LEDER

**E**s dürfte eine der größten Veranstaltungen zur Raumfahrt und zu wissenschaftlichen Themen überhaupt gewesen sein, die es jemals für junge Leute gab: 15.000 Kinder und Jugendliche waren dabei, als die DLR\_Raumfahrt\_Show am 7. Juni 2019 im Erfurter Stadion über die Bühne ging. Und in einer zweiten Vorstellung am selben Tag, die für die allgemeine Öffentlichkeit bestimmt war, kamen ebenfalls viele tausend Zuschauer, meist Familien mit Kindern.

DLR\_Raumfahrt\_Show startete mit Mega-Event: 15.000 Kinder und Jugendliche bei Premiere in Erfurt

Von Dr. Volker Kratzenberg-Annies

Nach einem Countdown, den das gesamte Publikum lautstark mitzählte, startete die „Gedankenreise zum Mond“: Mit spannenden Bühnen-Experimenten und kurzweiligen Erklärungen vermittelte das Moderations-Team auf unterhaltsame Art viel Wissenswertes über unseren kosmischen Trabanten. Zudem sorgten eindrucksvolle Videos immer wieder für Gänsehaut-Momente, in denen die Faszination der Apollo-Ära wach wurde. Denn das war das erste große Thema der Bühnenshow: die Mondlandung von Neil Armstrong und Buzz Aldrin vor 50 Jahren. Erstmals betrat der Mensch einen anderen Himmelskörper – ein Meilenstein in der Menschheitsgeschichte.

Im zweiten Teil der Show sorgte Raumfahrt-Prominenz für weitere Highlights: Ulf Merbold, der dreimal im Weltraum war, und ESA-Astronaut Alexander Gerst berichteten von ihren Erlebnissen im All. „Astro\_Alex“ übergab bei der Schülerveranstaltung auch die DLR-Zeitkapsel, die ihn auf der Mission horizons begleitet hatte, an das Bonner Haus der Geschichte. Die Kapsel enthält unter anderem die Wünsche von 8.000 Kindern und Jugendlichen für die Zukunft, für die Welt in 50 Jahren. Denn erst dann – nach einer langen Reise durch Raum und Zeit – darf die kleine Aluminiumkugel, die von Auszubildenden des DLR gefertigt wurde, wieder geöffnet werden. Und so bot diese einzigartige Show mit Bezug zum Apollo-Projekt einen Rückblick 50 Jahre in die Vergangenheit und zugleich einen Ausblick 50 Jahre in die Zukunft.

Die diesjährige Tour der DLR\_Raumfahrt\_Show feierte mit dem Doppel-Event in Erfurt eine überaus erfolgreiche Premiere. Im Herbst zieht das Team, das sich vor allem aus Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der DLR\_School\_Labs zusammensetzt, quer durch Deutschland. Und wie im vergangenen Jahr ist die Nachfrage der Schulen derart groß, dass insgesamt mehrere zehntausend Schülerinnen und Schüler die Aufführungen sehen werden. Ziel der Maßnahme ist es, junge Menschen frühzeitig für Forschung und Technik und für die korrespondierenden Schulfächer zu begeistern. Und in Erfurt sah man: Der Funke der Begeisterung ist übersprungen!

Die gesamte Tourplanung – auch mit einigen weiteren Events für die allgemeine Öffentlichkeit – findet sich auf dem DLR-Jugendportal DLR\_next im Internet.



Impressionen von der DLR\_Raumfahrt\_Show in Erfurt. Neben Mitmach-Experimenten auf der Bühne waren auch prominente Gäste dabei. So übergab der deutsche ESA-Astronaut Alexander Gerst in Anwesenheit von Bundesfamilienministerin Franziska Giffey eine Zeitkapsel an den Vizepräsidenten vom Haus der Geschichte in Bonn, Professor Harald Biermann. Die Kapsel enthält unter anderem einen Datenträger mit den Wünschen von 8.000 Schülerinnen und Schülern für die Zukunft. Erst im Jahr 2068 wird das Zeitzeugnis wieder geöffnet.

# HOMMAGE AN APOLLO

Im Jubiläumsjahr der Mondlandung überrascht es nicht, dass die Apollo-Mission ins öffentliche Interesse rückt. So vielfältig die Würdigungen sind, so eint sie doch eines: der Respekt vor der technologischen und menschlichen Leistung zu einer Zeit, in der sich die moderne Navigations- und Kommunikationstechnik in den Anfängen befand. Ausgewählte Informationen zum Thema sind hier zusammengetragen.

Neben Ausstellungen und Büchern zum Apollo-Programm weckt der Mond selbst nach wie vor großes Interesse – wissenschaftliches (DLR-Magazin 160, April 2019) ebenso wie fotografisches. Ein begeisterter Mondfotograf ist Rolf Hempel. Auf seinem Bild vom zunehmenden Mond ist die Landestelle von Apollo 11 zu erkennen (kleines Kreuz). Wie ein solches Bild von der Erde aus entstehen kann, erklärt der DLR-Forscher unter [DLR.de/vollmondbild](https://www.dlr.de/vollmondbild).

## DIE MONDLANDUNG IM MUSEUM

Im **Technik Museum Speyer** befindet sich die nach eigenen Angaben größte Raumfahrtausstellung Europas „Apollo and Beyond“. Im Jubiläumsjahr der Mondlandung sind auch anderenorts Ausstellungen zu diesem Thema zu sehen: „Fly Me to the Moon. 50 Jahre Mondlandung“ bis zum 3. November 2019 im **Museum der Moderne in Salzburg** ● „Raumschiff Wohnzimmer. Die Mondlandung als Medienereignis“ bis zum 22. September 2019 im **Museum für Kommunikation Nürnberg** ● „Apollo – 50 Jahre Mondlandung“ bis zum 10. März 2020 im **RiesKraterMuseum Nördlingen** ● „Aufbruch ins All – Raumfahrt erleben“ bis zum 5. Januar 2020 im **Heinz Nixdorf MuseumsForum** in Paderborn ● Die Sonderausstellung „Wettlauf zum Mond. Viel Lärm um einen kleinen Schritt?“ bis zum 8. September 2019 im **Historisch-Technischen Museum Peenemünde**.

## MONDMISSIONEN IM BUCH

Was wäre die Geschichte der Mondlandung ohne die eindrucksvollen Bilder derer, die an ihr beteiligt waren? Welche Vorstellung hätten wir von unserem Universum ohne die faszinierenden Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops? – 50 Jahre nach der Mondlandung öffnete die NASA ihre Archive für einen Bildband über 60 Jahre Raumfahrtgeschichte, von den Anfängen der Raketenentwicklung bis zu den Marsmissionen von heute. „A profound meditation on why we choose to explore space“ steht im Klappentext der **NASA Archives (Taschen)**. „Meditation“ mit „Betrachtung“ zu übersetzen, ist anhand der Sogwirkung, die der Band mit über 400, teils doppelseitigen Fotos, technischen Skizzen und Illustrationen ausübt, kaum hinreichend. Nicht nur wegen seiner Größe ein Buch der Superlative!

Die historischen Aufnahmen der Moonwalker oder der kargen Oberfläche des Erdtrabanten sucht man hier vergebens. **Apollo – der Wettlauf zum Mond (Droemer Knaur)** erzählt die Mondlandung in Diagrammen und Schaubildern. Das Erstlingswerk des Grafikdesigners Zack Scott besticht durch seine klaren, einfachen Zeichnungen sowie die präzisen Zahlen und schafft es, das Technologieprojekt Apollo auch für jene aufzubereiten, die keine großen Raumfahrtfans sind.

Der Name trägt, denn nicht nur **Moonshots** sind in dem 240-seitigen Bildband zu finden, den **National Geographic** 2018 publizierte. Die großformatigen und wunderbar aufbereiteten Aufnahmen reichen von den Anfängen des Gemini-Programms bis zur Internationalen Raumstation (ISS). Die ausgezeichnete Bildauswahl wird durch die Texte des Wissenschaftsjournalisten und Autoren Piers Bizony in den historischen Kontext eingebettet. Ein echtes Schmäckerl für Raumfahrtfreunde.

Die historische Reise zum Mond einmal ganz anders: **Apollo 11 (Knesebeck)** erzählt die Geschichte der gleichnamigen Mission als Graphic Novel, mit Neil Armstrong, Buzz Aldrin und Michael Collins im Fokus. Die Zeichnungen von Comic-Künstler und Namensvetter Mike Collins geben dem Abenteuer eine ganz eigene Dramaturgie und zeigen neben den Erfolgsmomenten auch Schatten-seiten – ganz in der Tradition des Genres Grafischer Roman, das gern auch mal mit düsteren Bildern daherkommt.

## AUS DEM APOLLO-ARCHIV

● Den Geschwindigkeitsrekord auf dem Mond hält Apollo-17-Kommandant Eugene A. Cernan, der mit halbrecherischen 18 Kilometern pro Stunde durch das Taurus-Littrow-Tal fuhr. Wegen der geringen Schwerkraft verloren die Räder des Mondrovers dabei mehrmals die Bodenhaftung.

● Cernan hält auch den astronautischen Streckenrekord: Er legte mit dem Mondrover 35,74 Kilometer zurück. Nur ein Roboter kam noch weiter: Der sowjetische Lunokhod 2 – Teil der Mission Luna 21 – fuhr nicht weit von Apollo 17 entfernt 1973 autonom insgesamt 39 Kilometer.

● 400.171 Kilometer: Nie waren Menschen weiter von der Erde entfernt als am 14. April 1970 – und dies ausgerechnet bei der abgebrochenen Mission Apollo 13, die um den Mond gelenkt werden musste, um dessen Schwerkraft für eine ‚freie Rückkehrbahn‘ zu nutzen: Sauerstoff, Strom und Wasser gingen zur Neige. James A. Lovell, Jack Swigert und Fred Haise überlebten knapp.

## DER MOND ALS CHANCE

### Eine Astronautenmeinung

Der Mond fasziniert seit jeher die Menschen. Als stetig wiederkehrender Wächter am Nachthimmel ist er für viele ein Zeichen von Beständigkeit. Für Weltraumerkunder ist er vor allem ein Geschichtsbuch. Er gibt Einblick in die Entstehungsgeschichte unseres Sonnensystems. Und er ist eine ideale Testplattform für neue Technologien, die uns Menschen in die Lage versetzen, seine Ressourcen zu nutzen.

Deutschland und Europa haben die große und einmalige Chance, die nächste Weltraumdekade zu prägen und eine Vision wahr werden zu lassen: Mit modernen Technologien wie der virtuellen Realität werden die Menschen in Zukunft gemeinsam mit Astronauten unseren Erdtrabanten begeistert erkunden.

Wir sollten unsere Mond-Chance nutzen und 2019 die Weichen dafür stellen.



Bild: ESA/Philippe Sebirot

Dr. Matthias Maurer



# DER ERSTE MENSCH AUF DEM MOND

## Die Ausstellung 50 Jahre Mondlandung

Das Gesicht eines Mannes, der gerade Menschheitsgeschichte geschrieben hat: Neil Armstrong. Freude, Triumph, Erleichterung, aber auch Konzentration. In diesem Moment sind die Astronauten der Apollo-11-Mission noch nicht wieder zurück auf der Erde, noch befinden sie sich in der Kommandokapsel 400.000 Kilometer entfernt. Und wie beim Bergsteigen liegt das Schwerste noch vor ihnen: der Abstieg, die Rückkehr zur Erde. Aber das Entscheidende ist geschafft: Die ersten Menschen haben den Mond betreten.

Dieses Bild spiegelt die höchst anspruchsvolle Mission wider: die Schwierigkeit, die Gefahr und schließlich den sensationellen Erfolg. Wir sehen keinen Mondfahrer im weißen Schutzanzug, sondern das Gesicht eines jener 400.000 Menschen, die Apollo zum Erfolg verhalfen. Das Programm war ohne Zweifel das beeindruckendste Technologieprojekt seiner Zeit. Daran tut auch die Tatsache keinen Abbruch, dass die erste Landung per Hand gesteuert wurde; die Entscheidung der Astronauten, sich über einen Fehler des Bordcomputers hinwegzusetzen, unterstreicht eher den experimentellen Charakter des Unterfangens. Vor allem aber die Professionalität seiner Akteure und welche wichtige Rolle die Menschen beim Erschließen unbekannter Terrains spielen.

Das von Buzz Aldrin unmittelbar nach Abschluss der Exkursion auf den Mond gemachte Foto ist – zusammen mit weiteren 19 Farbtafeln – Teil der Ausstellung über das Apollo-Programm, die das DLR-Institut für Planetenforschung in diesem Jahr erstellt. Sie zeigt Bilder von Apollo 8 bis Apollo 17. Missionen, die die Grenzen des bis dahin Menschenmöglichen ausloteten und neu definierten. Man sieht berühmte Motive wie den Erdaufgang über dem Mondhorizont, aber auch weniger bekannte Aufnahmen wie den „Briefkasten“, eine improvisierte Eigenkonstruktion, mit der sich die Astronauten von Apollo 13 vor dem Erstickungstod retteten, nachdem aufgrund einer Explosion Sauerstoff aus ihrer Kommandokapsel entwichen war. Auch die Vorbereitungen für die Mondlandung mit den Missionen Apollo 8 bis 10 haben ihren Platz in dieser historischen Reise. Kurze Texte unter den Bildern erzählen von Haarscharf-Momenten, außergewöhnlichen wissenschaftlichen Leistungen und von den Persönlichkeiten, die das Programm geprägt haben. Im Dezember 1972 wurde mit Apollo 17 das Jahrhundertprojekt beendet.

Neil Armstrong starb am 25. August 2012. Doch von seiner Unerschrockenheit und seinem Gefühl angesichts einer Pioniertat erzählt seinen Nachfahren noch heute dieses Foto. Es ist, als wolle es uns sagen: Hinter dem Horizont geht es weiter.



APOLLO 11 – NEIL ARMSTRONG, ERSTER MENSCH AUF DEM MOND • APOLLO 11 – NEIL ARMSTRONG, FIRST MAN ON THE MOON  
 Die Worte „Das ist ein kleiner Schritt für einen Menschen, aber ein gewaltiger Sprung für die Menschheit“ machten Neil Armstrong zu einer weltweiten Ikone nach der Landung „Schwechhender“ (Selen) „Büch“ (Büch) und die Höhe der Kommandokapsel (Columbia) und schließlich Armstrong, nachdem sich während einer gewaltigen Mission die Erde verabschiedet, verabschiedet und auf dem Apollo 11 eine „Tafel“ des 50. Jahrestages der ersten Menschenaufnahme von 1969, eines Lebens Bildes in der Öffentlichkeit durch das ungeschickte Aufsteigen Armstrong, war in der Öffentlichkeit nach dem ersten Schritt auf dem Mond, 21. August 2012.

### TERMINE 2019

#### 21. Juli

Tag der offenen Tür im DLR Oberpfaffenhofen

#### 10. August

Lange Nacht der Astronomie in Berlin

#### 6. September

Wissenschaftsnacht im DLR Neustrelitz

#### 29. September

Besuchertag im DLR Lampoldshausen

Die Ausstellung wird kostenfrei auch an interessierte Einrichtungen und Schulen verliehen. Lediglich die Transportkosten sind zu übernehmen.

**Kontakt: planetenforschung@dlr.de**

### Tafel der Ausstellung „50 Jahre Mondlandung“

Neil Armstrongs Worte „Das ist ein kleiner Schritt für einen Menschen, aber ein gewaltiger Sprung für die Menschheit“ gingen in die Geschichte ein.

# EINE PERLE FÜR TECHNIKFANS



Bild: Deutsches Museum/Lichtenscheidt

Noch bis zum 25. August 2019 ist die Sonderausstellung „Playmobil-Technikgeschichte(n) – Sammlung Oliver Schaffer“ zu sehen. Sie zeigt mit insgesamt 5.000 Figuren die Entwicklung des Spielzeugklassikers. Die Motive reichen von Archäologie über Polarforschung bis zu Mars Expeditionen.

**Der Fischer-Plastikdübel, die Ionenfalle und der Transrapid 06 haben etwas gemeinsam: Die drei Erfindungen sind Teil der Dauerausstellung im Deutschen Museum in Bonn. Rund 100 Exponate erzählen hier die Geschichte zeitgenössischer Forschung und Technik seit Ende des Zweiten Weltkriegs und stellen exemplarisch deutsche Entwicklungen der vergangenen 70 Jahre vor. Die „kleine Schwester“ des Deutschen Museums München entfaltet dabei ihren ganz eigenen Charme.**

## Ein Rundgang durch das Deutsche Museum in Bonn

Von Doris Pfaff

Als südlichster Teil der Bonner Museumsmeile besticht das Deutsche Museum mit einer erlesenen Auswahl an Ausstellungsstücken. Wer nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erhebt und nur über ein knappes Zeitbudget verfügt, ist im Wissenschaftszentrum der Bundesstadt, wo die Ausstellung ihr Domizil hat, richtig. Physik, Chemie und Biologie, Medizintechnik, Luft- und Raumfahrt sowie Ökologie: Das 1995 eröffnete Museum bietet einen komprimierten Überblick über Entwicklungen aus den Jahren nach 1945. Gezeigt werden auf einer Gesamtfläche von 1.400 Quadratmetern fünf Bereiche, die das genannte Spektrum abdecken: von der Elementarteilchenphysik über die Hirnforschung bis zu Entwicklungen in der Raumfahrt. Es werden Schlaglichter auf deutsche Forschungsergebnisse geworfen.

Vor dem Eingang im Souterrain kündigt der Transrapid weithin sichtbar die Techniksammlung an: Die Zugmaschine der Magnetschwebbahn erinnert an die erste Demonstrationsfahrt auf der 31,5 Kilometer langen Teststrecke im Emsland. Die damals neue Technologie der Magnetschwebetechnik war ein Vorbote moderner Hochgeschwindigkeitszüge, auch wenn der Magnetbahn in Deutschland kein Erfolg beschieden war und sie stattdessen in China Karriere machte.

Der Rundgang im Haus ähnelt einem Zeitraffer: Von den Fünfzigerjahren bis ins Heute führt die Ausstellung dem Besucher die Meilensteine der vergangenen sieben Jahrzehnte vor Augen. Anfassen und Ausprobieren ist an ausgewählten Stationen erlaubt und erwünscht. Insbesondere für Kinder wird das Museum mit seinen vielfältigen Mitmachmöglichkeiten zu einem Erlebnis. Es gibt Experimentiertische zu Phänomenen der Optik, des Magnetismus und der Akustik: Wer möchte, darf das „Theremin“ ausprobieren. Das einer Harfe ähnliche und elektrisch betriebene Musikinstrument sorgt allein durch Bewegungen in der Luft für Töne.

#### Das Fernsehen als neues Massenmedium

Auf dem Weg durch die zwei Etagen erlebt der Museumsbesucher das deutsche Wirtschaftswunder: Erster Wohlstand entwickelte sich vor allem im Westen Deutschlands und damit das zunehmende Bedürfnis der Menschen nach Konsum und Unterhaltung. Transistorradios zogen in die Wohnzimmer ein. Und in der Zeit des Mauerbaus begann das Fernsehen sich als Massenmedium zu etablieren; zunächst noch in Schwarz-Weiß, ab 1967 in Farbe. Die Uhr tickte nun anders. Auch im wahrsten Sinne des Wortes: Für die Zeitmessung stand eine Atomuhr zur Verfügung, ein Zeitmesser, der in einer Million Jahre nur eine Sekunde nachgeht. Das Exemplar, das bis 1991 in Deutschland die Zeit angab, ist Teil der Bonner Ausstellung. Und wie sie dank der Paulschen Ionenfalle „tickt“, wird hier ausführlich erklärt.

Wenige Meter weiter steht das Rotorsystem eines riesigen Rettungshubschraubers und belegt die Fortschritte in der Flugtechnik. Die ausgesprochene Reiselust der Westdeutschen beflügelte die Luftfahrtindustrie – ganz wie im Evergreen „Über den Wolken“ von Reinhard Mey aus dem Jahr 1974. Auf den Bau des Hubschraubers BO 105 folgte die Gründung der bundesdeutschen Luftrettungsflotte. Ende der Achtzigerjahre erreichte die Friedensbewegung ihren Höhepunkt, der Kalte Krieg nahm ein vorläufiges Ende, schließlich fiel die Mauer zwischen Ost und West. Die Exposition thematisiert all das.

1983 flog Ulf Merbold als zweiter Deutscher ins All, er war der erste Nichtamerikaner im Spaceshuttle der NASA. Mit an Bord befand sich das in Europa entwickelte „Spacelab“. Ein Teil davon ist im Museum zu sehen: das Werkstofflabor, das von der damaligen Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt entwickelt wurde, dem späteren Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

Die Autoindustrie setzt im gleichen Jahrzehnt verstärkt auf Sicherheit: Ansnallgurt und Airbag werden entwickelt, in simulierten Unfällen halten Dummies als Testpersonen her. Welche Kräfte dabei wirken und welche Spuren solche Crashtests hinterlassen, zeigt der ausgestellte Dummy Hybrid III. Festgeschnallt an einem Autositz, mit seinen vielen Kratzern, Farbabspregungen und gar fehlenden Gliedmaßen macht er einen arg mitgenommenen Eindruck.

#### Mikroelektronik und optische Speichermöglichkeiten

Die deutsche Wiedervereinigung und der Durchbruch in der Mikroelektronik prägen das Ende des letzten Jahrhunderts. 1973 wurde der erste Prototyp des Mobiltelefons entwickelt, 1989 kam der Game Boy auf den Markt. Der Fortschritt bei den optischen Speichermöglichkeiten führte zur CD- und DVD-Technologie und verdrängte Schallplatten und Videokassetten. Auch die Medizin feierte Fortschritte: Insulin konnte erstmals synthetisch hergestellt werden, die Entdeckung des Kunststoffes half, Implantate zu entwickeln und Ultraschalluntersuchungen ermöglichten einen neuen Blick ins Innere

des Körpers. Moderne Diagnoseverfahren wie Fruchtwasseruntersuchungen hielten Einzug in die Kliniken. Schaukästen mit Modellen, Tafeln und Instrumenten erklären das gut.

Die Forschungsmöglichkeiten im und über dem Wasser sowie im Weltall schienen am Ende des vergangenen Jahrhunderts fast grenzenlos: Mit dem Forschungsschiff Polarstern konnten seit Anfang der Achtzigerjahre erstmals umfangreiche Expeditionen in die Antarktis und Arktis unternommen werden. Der bis heute aktive Eisbrecher kann bei Temperaturen bis zu minus 50 Grad Celsius eingesetzt werden und bietet Platz für rund 70 Wissenschaftler. Das Schiff ist in einem Maßstab von 1:50 als Modell dargestellt und lässt anhand der Ausstattung ahnen, wie außergewöhnlich und groß es im Verhältnis zu den Schiffen der damaligen Zeit war.

Ebenso spannend ist das Modell des Fallturms samt Fallkapsel des Zentrums für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) in Bremen. Seit 1985 führt das ZARM Forschungen zur Schwerelosigkeit, Raumfahrttechnik und Hyperschalltechnologie durch. Ab dem Jahr 2004 ermöglicht ein Katapult am Fuße des Turms den Abschuss der Fallkapsel von unten und damit die Verdopplung der Experimentierzeit in Schwerelosigkeit auf fast zehn Sekunden.

#### Neues Jahrtausend, der Euro und Angela Merkel

Das beginnende digitale Zeitalter und das neue Jahrtausend stehen für starken Wandel: Der Euro löste die Deutsche Mark ab, Angela Merkel wurde erste Bundeskanzlerin und das iPhone eroberte den Markt. Das Internet lässt sich nun mobil erreichen und die digitalen Medien durchdringen alle Lebensbereiche. Spannend, mitunter sehr anspruchsvoll, erzählt die Ausstellung von physikalischen Zusammenhängen und bietet Originalexponate als Zeitzeugnisse. Und weil Anfassen ausdrücklich erwünscht ist, wundert es uns nicht, im Deutschen Museum viele Familien und Schüler anzutreffen. Vor allem mit Blick auf die jungen Besucherinnen und Besucher schwächelt das Museumskonzept allerdings in der Darstellung einiger Exponate. Nicht alle sind ohne Erklärung verständlich, sie setzen nicht nur Faszination für Technik und Naturwissenschaften voraus, sondern auch solides Grundlagenwissen. Wer beides mitbringt, genießt das kleine Museum am südlichen Ende der Bonner Kunstmeile als eine besondere Perle der Museumskette.



Bilder: Deutsches Museum Bonn



Fasziniert vom Modell des eisbrechenden Forschungsschiffs Polarstern. Seit 1982 unternimmt es regelmäßig Expeditionen und gilt als Wahrzeichen deutscher Polarforschung. Aktuell ist das Schiff unterwegs gen Norden, um sich für ein ganzes Jahr einfrieren zu lassen und quer durch die zentrale Arktis zu driften. Die Wissenschaftler wollen dabei neue Erkenntnisse über den Klimawandel gewinnen.



Im Werkstofflabor des Weltraummoduls Spacelab führten die Astronauten wissenschaftliche Experimente auf den Gebieten Metallforschung, Flüssigkeitsphysik und Kristallforschung in Schwerelosigkeit durch

Der Transrapid 06 aus dem Jahr 1982 weist auf den Eingang des Deutschen Museums in Bonn hin

### DEUTSCHES MUSEUM BONN

#### Anschrift

Deutsches Museum Bonn  
Ahrstraße 45  
53175 Bonn

#### Preise

Erwachsene	9 Euro
Ermäßigt, Gruppen ab 10 Personen	5 Euro
Familienkarte	20 Euro

#### Öffnungszeiten

Di – Fr und So	10 – 17 Uhr
Sa	12 – 17 Uhr

#### Kontakt

Telefon 0228 302-255

[info@deutsches-museum-bonn.de](mailto:info@deutsches-museum-bonn.de)  
[deutsches-museum-bonn.de](http://deutsches-museum-bonn.de)



# STAUNEN UND SCHAUDERN

Das blaugrün schimmernde Etwas sieht aus wie ein Pantoffeltierchen. Es ist jedoch ein Korallenriff. Aber auch das stimmt nicht: Denn es war einmal ein Korallenriff. Bis zum Jahr 2014. Ein aktuelles Satellitenbild zeigt eine Militärgarnison mit Flughafen. Auf das Inselgebiet im südchinesischen Meer erheben neben China noch fünf weitere Staaten Ansprüche, wegen der Rohstoffvorkommen und der reichen Fischgründe. Und so entstehen Bastionen.

Die beiden halbseitigen Bilder gehen in dem üppigen, meist doppelseitig präsentierten Bildmaterial des Bandes **New human footprint** zwar fast unter, doch sie zeugen besonders drastisch vom rabiatischen Eingriff der Menschen in die Natur. Man möchte sich die Augen reiben und fragt: Kann das wirklich sein? Doch die Satellitenaufnahmen belegen es: Der Mensch gestaltet seine Umwelt neu, und zwar auf äußerst vielfältige, oft spektakuläre, immer häufiger aber auch beängstigende Weise. Der Untertitel des Bildbandes „Unsere Welt im Umbruch“ hätte vom Herausgeber **eoVison media** kaum treffender gewählt werden können.

Manche der Bilder kennt man aus Vorgängerproduktionen der Edition human footprint, wie etwa die Aufnahme der Pyramiden in Ägypten, an die sich die Stadt Kairo fast bedrohlich heranschiebt. Anderes hat man noch nicht gesehen. Die iranische Oasenstadt Keshit beispielsweise, die aus dem All aussieht wie ein Baum mit Stamm und Krone. Sie wirkt fast künstlerisch, und ist doch von der Natur selbst, nämlich einem unterirdischen Flusslauf hervorgebracht worden. Umgepflügte Landschaft in braun-schwarzen Streifen wie im Braunkohlegebiet bei Hambach oder ein schwefelumrahmter Kratersee in Indonesien lassen staunen und schauern zugleich. Ein gespinnartiges Netz aus Ölbohrlöchern und Pipelines in Kasachstan, kachelförmig angelegte Verdunstungsbecken zur Lithiumgewinnung in Chile, Transportwege auf salzigem bolivianischem Boden, die sich wie Pinselhaare bündeln, hunderte streng linear angeordnete Reihen von Parabolrinnen eines Solarkraftwerks in Marokko und mosaikartige Aquakulturfleichen in China veranschaulichen gleichermaßen die Schaffenskraft des Menschen wie auch seine starke Einflussnahme auf die Umwelt. Überaus detaillierte städtische Strukturen in Steppen, am Polarkreis oder in bekannten Ballungsgebieten wie New York, Moskau oder Shanghai sind aus einer Perspektive zu sehen, wie sie sich deren Bewohnern im Alltag nie bietet.

Der „Fußabdruck“, den wir Menschen auf der Erde hinterlassen, verändert diese rasant. Auf der Umschlagrückseite des 255-seitigen sehr beeindruckenden Bildbandes heißt es: „Die faszinierenden und oft unerwarteten Ansichten machen deutlich, wie groß dieser Einfluss inzwischen geworden ist.“ – Unsere Erde: ein Garten oder nicht doch schon eine gewaltige Müllhalde?

Cordula Tegen

# VON WEGEN SCHWARZES LOCH

Was ist Materie? Was ist Energie? Wie entstand das Leben? Wie groß ist das Universum und wie entsteht der Treibhauseffekt? – Aufgeteilt in die Kapitel Materie, Energie und Kräfte, Leben, Weltraum und Erde bietet das hochwertige Nachschlagewerk **Naturwissenschaften. Spannende Phänomene – grafisch erklärt (Verlag DK)** komplexes Wissen für die ganze Familie. Abwechslungsreich und bunt besticht das Werk vor allem durch seine 300 detaillierten Grafiken, die komplizierte naturwissenschaftliche und aktuelle Sachverhalte verständlich machen. Egal, ob es um die Entstehung von Radioaktivität, schwarze Löcher, statische Elektrizität oder Schwerelosigkeit geht, jedes Thema wird mit farbigen Infografiken, Illustrationen und erstauslich wenig Text auf einer Doppelseite dargestellt. Die Erklärungen verzichten weitgehend auf Abkürzungen und komplizierte Fremdwörter, nicht jedoch zu Lasten von Fakten.

Anspruchsvoll und aufwändig gestaltet sind nicht nur die 256 Seiten, auch das Cover fällt auf: Ein in den Buchdeckel gestanztes Reagenzglas ist gefüllt mit interessanten Fakten aus den Naturwissenschaften und macht neugierig. Die einzelnen Kapitel sind farblich voneinander abgesetzt. Ein ausführliches Schlagwortregister hilft schnell weiter, wenn einzelne Begriffe unklar sind. Das Buch lohnt sich auch zum Schmökern und zieht mit spannenden Fragestellungen schnell ins Thema. Ein wunderbares Werk für alle, die es genauer wissen wollen, und das auch Nichtwissenschaftlern einen Zugang zu schwierigen Themen aus Biologie, Chemie, Physik, Astronomie und Mathematik bietet.

Doris Pfaff



# MIT ZEPPELIN UND TELEVISOR IM ANTIQUARIAT

Der Grammesche Ring ist bestimmt nicht die erste Erfindung, die einem einfällt bei **50 Maschinen, die unsere Welt veränderten**. Doch im gleichnamigen Band aus dem Hause **Haupt** ist zu erfahren, dass diese dynamoelektrische Maschine Basis für den ersten wirtschaftlich betriebenen Gleichstrommotor war und so die zweite industrielle Revolution einläutete; das war, als Strom die Dampfkraft ablöste. Autor Eric Chaline, englischer Soziologe und Journalist mit dem Spezialgebiet Geschichte, traf eine zuweilen unerwartete Auswahl technischer Hilfsmittel, Geräte, Transport- und Kommunikationsmittel für seine Top Fifty. Das macht aber auch den Reiz der Sammlung aus. Beginnend mit dem Jacquard-Webstuhl und endend mit Motorola Startac werden auf je einer bis drei Doppelseiten die Maschinen und ihre Erfinder vorgestellt – in Fotos, Skizzen und Illustrationen. Chaline ordnet sie zeitlich ein, erklärt ihre Bedeutung und lässt auch ihre Vorläufer nicht unerwähnt. Denn so mancher Durchbruch wurde durch die Verbesserung einer schon existierenden Erfindung erreicht. Stephenson's „Rocket“ beispielsweise gelangte nicht als erste, sondern als kultigste Dampflokomotive in die technische Ahnengalerie.

Der Bild-Text-Band macht Spaß, er überrascht und er bildet. Die liebevolle Gestaltung und auflockernde kleine Storys sorgen für ein gewisses Wohlgefühl bei der Lektüre. Beim Stöbern in dem auf nostalgischem grau-beigefarbenem Papier gedruckten Buch fühlt man sich, als säße man auf einer alten Ledercouch im Antiquariat um die Ecke. Während man von der Erfindung des Kühlschranks und des Televisors liest, fragt man sich, weshalb es Kaffeemaschine oder Samowar nicht ins Buch geschafft haben ...

Cordula Tegen



## DIE BAHN UND IHRE HÖFE



Ein Blick auf die Abfahrtszeiten, ein Spurt zum Gleis, noch schnell ein Kaffee zum Mitnehmen – Bahnhofsatmosphäre. Doch das Bild, das Reisende vom Bahnhof haben, ist bruchstückhaft. Dass man dabei die Architektur historischer Empfangsgebäude übersieht und auch nicht beachtet, wie man auf einem Geflecht von Gleisen in die gewünschte Richtung geleitet wird, ist eigentlich schade. Im Bildband **Bahnhöfe von oben (Gera Mond)** schafft Heiko Focken mit Luftbildern Abhilfe. Dabei verspricht er verblüffende, Überblicksansichten. Auf einer bildlichen Rundreise durch Deutschland, Österreich und die Schweiz erhält der Betrachter in der Tat jene seltenen Blicke auf verschiedenste Bahnhöfe: Während im ostfriesischen Norddeich der Intercity unmittelbar neben dem Fähranleger sein Ziel erreicht, schlängeln sich vor der Einfahrt in den Münchener Hauptbahnhof Züge durch ein mehrere hundert Meter langes Gleisdickicht. Mal dominieren weitläufige Bahnanlagen das Bild, mal wird die Infrastruktur in einer reizvollen Landschaft zur Nebensache.

Verkehrsinfrastrukturen sind für den Autor – er ist als Planer für eine baden-württembergische Nahverkehrsgesellschaft tätig – ein alltägliches Thema. Er hat einen ganz anderen Blick auf die 133 Bahnhöfe und Betriebswerke als der Bahnreisende. Zusätzlich setzt Focken auf großflächige Luftbildaufnahmen unterschiedlicher Quellen. Manche Motive spielen gekonnt mit Perspektive und Anschnitt, sodass Tiefe und Fluchtpunkte nahezu verschwinden und die Aufnahme eine künstlerische Anmutung hat. Andernorts schweift der Blick über malerische Panoramen, die in einem spannenden Kontrast zu den wie Fremdkörper wirkenden Bahnanlagen stehen. Häufig lässt der Blick auf einen Stadt-Ausschnitt jedoch die versprochenen Details oder den Bahnhof in seiner Gesamtansicht vermissen. Teilweise können die Texte diese verschenkten Chancen kompensieren, doch der Eindruck entsteht, dass ein kohärenter ästhetischer wie inhaltlicher Qualitätsanspruch dem Präsentieren einer möglichst großen Sammlung nachgeordnet wurde. Schade eigentlich.

Daniel Beckmann

## PUNKT AUFS „I“ MADE IN GERMANY

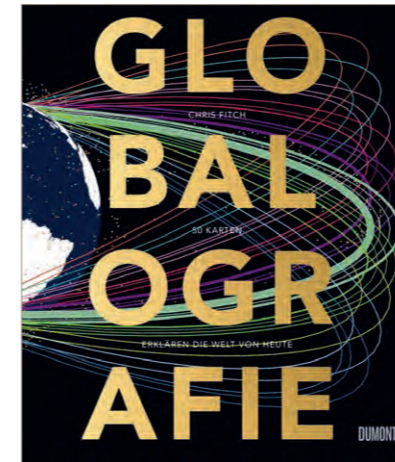


Die unzähligen klugen Köpfe, die sich im Land der Dichter und Denker – oft ihr Leben lang – damit beschäftigten, etwas zu erfinden, was die Welt etwas besser machte, haben Heike Haupt und den Verlag **riva** dazu bewogen, **Deutsche Erfindungen. Von Bier bis MP3 – geniale Ideen made in Germany** herauszubringen. Kein Prachtband, sondern ein handliches Sachbuch mit 160 Seiten. Mit ihm möchte die Autorin einen Überblick auf deutsche Errungenschaften geben, ohne dass sie den Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Sie beschreibt ausgewählte Erfindungen und ihre Hintergründe, darunter Röntgenstrahlen und Buchdruck, aber auch die Historie der Antibabypille, des Mobilfunks, der Mundharmonika und des Telefons. Wie mühsam der Weg bis zum Ziel oft war, zeigt die Geschichte des Bibeldrucks durch Gutenberg, der zunächst daran arbeitete, Heiligenbilder entlang von Pilgerstrecken schnell vervielfältigen zu können. Beflügelt von seinem Erfolg wagte er sich schließlich an den ersten Buchdruck.

Das Buch wirkt schlicht und erinnert an ein Märchenbuch: Die Seiten zierte ein schlichter schwarzer Rahmen, die Beiträge beginnen mit Initialen und die Überschriften sind in alter Druckschrift gesetzt, dazu kleine Tuschezeichnungen. Chronologisch sortiert startet Heike Haupt mit der Erfindung des Weihnachtsbaums im Jahr 724 und endet mit dem C-Leg, einer intelligenten Beinprothese aus dem Jahr 1997. Kein wissenschaftliches Nachschlagewerk erwartet uns hier, sondern eher ein spannendes Lesebuch, in das die Autorin auch Innovationen einbezogen hat, die den sprichwörtlichen i-Punkt in Deutschland gesetzt bekamen, wie etwa das Reinheitsgebot fürs Bier. Der Band lohnt sich dennoch: zum Entdecken, Lernen und Staunen. Staunen vor allem darüber, an welch großartigen Erfindungen kluge deutsche Köpfe beteiligt waren, weil sie im richtigen Augenblick an der sprichwörtlich richtigen Stellschraube drehten.

Doris Pfaff

## KARTEN, DIE DIE WELT ERKLÄREN – SOLLEN



Im Zeitalter der Globalisierung ist das isolierte Betrachten von Phänomenen und Entwicklungen kaum opportun. Denn erst der Vergleich – der Blick über den Tellerrand – lässt verstehen und Hintergründe erkennen. Für Chris Fitch, Geograf und Reisejournalist, mag das die Motivation für sein 200 Seiten starkes Werk **Globalografie (Dumont)** gewesen sein. Dafür trug er Zahlen und Fakten zusammen und verarbeitete sie grafisch auf Weltkarten. Der Untertitel „50 Karten erklären die Welt von heute“ weckt hohe Erwartungen. Doch die vom Autor getroffene Auswahl mutet willkürlich an. Es geht um Tourismushochburgen, Beteiligungen an UN-Friedenstruppen, Teekonsum, die weltweit umschlagstärksten Häfen, Palmölverbrauch und Trinkwasser-

abfüllung, aber auch um den Markt für Sportschuhe oder Luxusuhren.

Den farbigen Punkten und unregelmäßigen Flächen, Linien und Pfeilen auf den Karten erhellende Informationen zu entlocken, ist etwas mühselig (nicht nur, weil dort auf Seitenzahlen verzichtet wurde) und verlangt geografische Kenntnisse. Die Ausführungen des Autors am jeweiligen Kapitelende helfen ein Stück weiter, befriedigen aber nicht immer. Fitch thematisiert beispielsweise den Avocado-Boom, zeigt die Wege der Früchte auf, nennt Nährstoffe und Avocado-Rezepte, aber die Problematik rund um den Anbau lässt er unerwähnt. Die „Globalografie“ liefert vor allem in den Texten interessante Fakten. Wer jedoch selbsterklärende Grafiken mag, ist besser beraten, zum „Atlas unserer Zeit“ zu greifen (DLR-Magazin 158, Juli 2018), ebenfalls im Dumont-Verlag erschienen. Dort gelingt es tatsächlich, mit Karten die Welt, ihre globalen Prozesse und viele ihrer Beziehungen darzustellen.

Doris Pfaff

## BILDER, DIE BEWEGEN



In **A40 (Kettler)** sprechen die Bilder. Ausschließlich. Und das genügt. Sebastian Mölleken fotografierte entlang der Autobahn, die von der niederländischen Grenze nach Dortmund führt und von Ortskundigen wenig freundlich Ruhrschleichweg genannt wird. Seine Bilder zeigen keine Autos, sondern Gegend. Und Menschen. Auch diese nicht vordergründig freundlich. Aber mit ihrem direkten Blick in die Kamera von einer Ausdrucksstärke, die Sogkraft hat.

Mölleken beschönigt nicht, er setzt Authentizität in Szene, konsequent, zuweilen bis es wehtut. Wer dann im Bild verweilt, dem offenbart sich das Schöne im Ursprünglichen. Ein lediglich 60 Seiten umfassender, aber bewegender Bildband.

Cordula Tegen

## LINKTIPPS

**DER WEG DES HANDYS IN DEN MÜLL**  
**Handycrash.org**  
Das Onlinespiel „Handycrash“ informiert über den typischen Lebenslauf eines Handys: Vom Verkaufstisch bis in den Abfall dauert es im Schnitt 18 Monate. Mit in den Müll gelangen wichtige Rohstoffe wie Kupfer, Gold und Aluminium, aber auch Giftstoffe. Das gilt es zu ändern. Kurzweilig, informativ und kostenlos vermittelt das Spiel zwischen einfachen Spielsequenzen entwicklungspolitische Inhalte.

**SO COOL KANN CHEMIE SEIN**  
**Youtube.com/mailab**  
Die 31-jährige promovierte Chemikerin und Wissenschaftsjournalistin Mai-Thi Nguyen-Kim erklärt auf ihrem YouTube-Kanal „maiLab“ anschaulich wissenschaftliche Zusammenhänge, aber auch Alltägliches und Sperriges. Sei es, wozu Aktivkohle gut und warum Chemie cool ist. Die Ergebnisse ihrer Diplomarbeit hat sie auf eine tänzerische Formel gebracht. 2018 wurde mailab mit dem Grimme Online Award in der Kategorie „Wissen und Bildung“ ausgezeichnet.

**RAUMFAHRT FÜR DIE OHREN**  
**Aufdistanz.de**  
Gut verdaulicher Einstieg in Astronomie und Raumfahrt. In jeder Folge befasst sich Podcaster Lars Naber mit einem anderen Titelthema, von Raumfahrtmissionen wie Hayabusa2 bis zum Stern von Bethlehem. Dabei reist er auch zu interessanten Orten, wie beispielsweise nach Baikonur zum Start der horizons-Mission von ESA-Astronaut Alexander Gerst. Oder er begleitet den CanSat-Wettbewerb in Bremen. Am Ende jeder Folge gibt er Hinweise zu kommenden astronomischen Ereignissen sowie Veranstaltungstipps.

**AKTUELLE HIGHLIGHTS DER WISSENSCHAFT**  
**scinexx.de**  
Hier gibt es Neuigkeiten aus Geowissenschaften, Biologie, Medizin, Ökologie, Technik und aus dem Kosmos, gut aufbereitet und auch für Nichtwissenschaftler verständlich. Gerade wegen des breit gefächerten Spektrums macht das Onlinemagazin Lust aufs digitale Schmöckern: Lügen Frauen oder Männer mehr? Was brachte wohl das erste Großreich der Geschichte vor rund 4.300 Jahren zu Fall? Besonders lohnenswert ist die Rubrik „Lernwelten“, wo Schüler Informationen zu Fragen des Alltags oder zum Lernstoff finden.

**STERNSCHREDDER**  
**Youtu.be/hu6hhW00fk**  
Wie es aussieht, wenn ein massives schwarzes Loch einen Stern zu fassen bekommt und aufsaugt, hat ein Künstler für die NASA zu einer Animation verarbeitet. In nur einer Minute Video verlicht die Sonne in einem farbengewaltigen Tanz im schwarzen Nichts.

## 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, Digitalisierung 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 sind im DLR zwei Projektträger zur Forschungsförderung angesiedelt.

In den 20 Standorten Köln (Sitz des Vorstands), Augsburg, Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Bremerhaven, Dresden, Göttingen, Hamburg, Jena, Jülich, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Oldenburg, Stade, Stuttgart, Trauen und Weilheim beschäftigt das DLR circa 8.200 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: Nils Birschmann (ViSdP), Cordula Tegen (Redaktionsleitung), Julia Heil  
An dieser Ausgabe haben mitgewirkt: Daniel Beckmann, Florian Kammermeier, Denise Nüssle, Doris Pfaff sowie Michel Winand

DLR-Politikbeziehungen und Kommunikation  
Linder Höhe, 51147 Köln  
Telefon 02203 601-2116  
E-Mail [info-dlr@dlr.de](mailto:info-dlr@dlr.de)  
Web [DLR.de](http://DLR.de)  
Twitter [@DLR\\_de](https://twitter.com/DLR_de)

Druck: AZ Druck und Datentechnik GmbH, 87437 Kempten  
Gestaltung: CD Werbeagentur GmbH, 53842 Troisdorf, [www.cdonline.de](http://www.cdonline.de)

ISSN 2190-0094

Online:  
[DLR.de/dlr-magazin](http://DLR.de/dlr-magazin)

Onlinebestellung:  
[DLR.de/magazin-abo](http://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.

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



Gedruckt auf umweltfreundlichem, chlorfrei gebleichtem Papier.

## Titelbild

Die kugelförmige Struktur gehört einem neuartigen Biopolymer-Aerogel, das DLR-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler im Laborexperiment entwickelten. Sie entsteht, indem Chitosan eine Verbindung mit einem Duroplast eingeht. Mehr über die vielseitigen Aerogele und über Professorin Barbara Milow, die mit ihrem Team nach neuen Rezepturen sucht, lesen Sie ab Seite 30 in diesem Magazin.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages