

DEN SCHLAFENDEN RIESEN WECKEN

DAS DLR FORSCHT FÜR DIE WÄRMEWENDE

Weitere Themen:

- ▶ EIN TEAM FÜR ALLE FÄLLE
Roboter unterwegs auf dem Ätna
- ▶ HOTSPOT NORDPOL?
Ein Forschungsteam untersucht die Klimaerwärmung

Das DLR im Überblick

Das DLR ist das Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Wir betreiben Forschung und Entwicklung in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie und Verkehr, Sicherheit und Digitalisierung. Die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR ist im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zwei DLR Projektträger betreuen Förderprogramme und unterstützen den Wissenstransfer.

Global wandeln sich Klima, Mobilität und Technologie. Das DLR nutzt das Know-how seiner 55 Institute und Einrichtungen, um Lösungen für diese Herausforderungen zu entwickeln. Unsere 10.000 Mitarbeitenden haben eine gemeinsame Mission: Wir erforschen Erde und Weltall und entwickeln Technologien für eine nachhaltige Zukunft. So tragen wir dazu bei, den Wissens- und Wirtschaftsstandort Deutschland zu stärken.

Impressum

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

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

Redaktion: Nils Birschmann (V.i.S.d.P.), Julia Heil (Redaktionsleitung)

Kommunikation und Presse

Linder Höhe, 51147 Köln

Telefon 02203 601-2116

E-Mail info-DLR@dlr.de

Web DLR.de

Twitter [@DLR_de](https://twitter.com/DLR_de)

Druck: AZ Druck und Datentechnik GmbH, 87437 Kempten

Gestaltung: bplused agenturgruppe GmbH, Am Kabellager 11–13, 51063 Köln, www.bplused.de

ISSN 2190-0094

Online lesen:

DLR.de/dlr-magazin

Onlinebestellung:

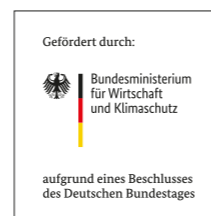
DLR.de/magazin-abo

Nachdruck nur mit Zustimmung des Herausgebers und Quellenangabe. Die fachliche Richtigkeit der Beiträge verantworten die Autorinnen und Autoren.

Bilder: DLR (CC BY-NC-ND 3.0), sofern nicht anders angegeben. Titelbild: © DLR.



Gedruckt auf umweltfreundlichem, chlorfrei gebleichtem Papier.



IN EIGENER SACHE



Wie ist es, die Mission des ESA-Astronauten Matthias Maurer von der Erde aus zu koordinieren? Vor welchen Herausforderungen stehen unsere Forscherinnen und Forscher, wenn sie mehrere Tage auf einem riesigen Gletscher in den Alpen unterwegs sind, um dort die aktuelle Schneebedeckung zu bestimmen?

DLR.de/blogs gewährt einen Blick hinter die Kulissen. Hier beschreiben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ihre persönlichen Eindrücke von Missionen und Projekten, die so in Pressemitteilungen nicht zu finden sind. Die Seiten von DLR.de/blogs sind aber auch der richtige Ort, wenn Sie ganz tief in die Wissenschaft eintauchen wollen. Wenn Sie beispielsweise genau verstehen möchten, wie das Strahlungsmessgerät funktioniert, das sich an Bord der NASA-Mondmission Artemis I befindet. Neben den Einblicken in die verschiedensten Themen aus Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Verkehr, Digitalisierung und Sicherheit werden hier aber auch Servicebeiträge veröffentlicht, die Fakten und Hintergründe liefern. Das kann zum Beispiel ein anstehender Meteoritenschauer sein, eine nahende Sonnenfinsternis oder auch ein Rückblick auf historische Augenblicke wie die Mondlandungen der Apollo-Missionen.

Liebe Leserinnen und liebe Leser,

beim Thema Energiewende ging es bislang oft um Strom. Nachhaltige Wärme fristete hingegen lange ein Schattendasein. Angesichts der unsicher gewordenen Versorgungslage beginnt sich die Lage allerdings zu ändern. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des DLR haben sich schon seit einer Weile das Ziel gesetzt, den schlafenden Riesen Wärme zu wecken. Ob Wärmepumpen, Windthermie, Energiesystem-Analysen oder Heizen mit Kalk, sie erforschen Technologien und Konzepte für klimafreundliche Wärme aus erneuerbaren Quellen. Das Titelthema dieses DLRmagazins 171 gibt einen Überblick über die verschiedenen Aspekte und die Potenziale von Wärme. Außerdem sprechen wir mit Prof. Dr. Sattler, Bereichsvorstandsmitglied Energie, darüber, ob wir ein Wärmeproblem haben.

Ein ganz anderes Problem mit Wärme entwickelt sich übrigens seit einer Weile in der Arktis. Diese erwärmt sich deutlich schneller als der Rest der Welt. Nun ist ein internationales Forschungsteam an den Nordpol gereist, um das Phänomen der arktischen Verstärkung zu untersuchen. Außerdem erforscht es die Auswirkungen, die diese Erwärmung auf den Rest der Welt haben könnte. Für das DLR sind aber nicht nur Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Fleisch und Blut im Einsatz: In dem Projekt ARCHES war ein Team aus verschiedenen Robotern gemeinsam in einer der unwirtlichsten Gegenden unterwegs, die man sich in Europa aussuchen kann: dem sizilianischen Vulkan Ätna. Warum sie ausgerechnet hier auf Erkundungsmission gingen und welche besonderen Fähigkeiten die einzelnen Teammitglieder haben, lesen Sie in dieser Ausgabe.

Weitere Themen in diesem Heft sind die beiden Marsmonde Furcht und Schrecken, die mit einer neuen Mission nun endlich umfassend erkundet werden sollen, und ein Interview mit der DLR-Verkehrsforscherin Laura Gebhardt, die untersucht, ob E-Scooter, E-Bikes und Pedelecs Umweltretter oder bloß pures Ärgernis sind. Ferner erfahren Sie, wie eine künstliche Intelligenz die Reaktionen eines Konzertpublikums in ein Musikstück hineinkomponiert, und vieles mehr.

Viel Vergnügen beim Lesen wünscht

Ihre Redaktion



DEN SCHLAFENDEN RIESEN WECKEN 8



DER GUTE TON 44



WOHER STAMMEN FURCHT UND SCHRECKEN? 14



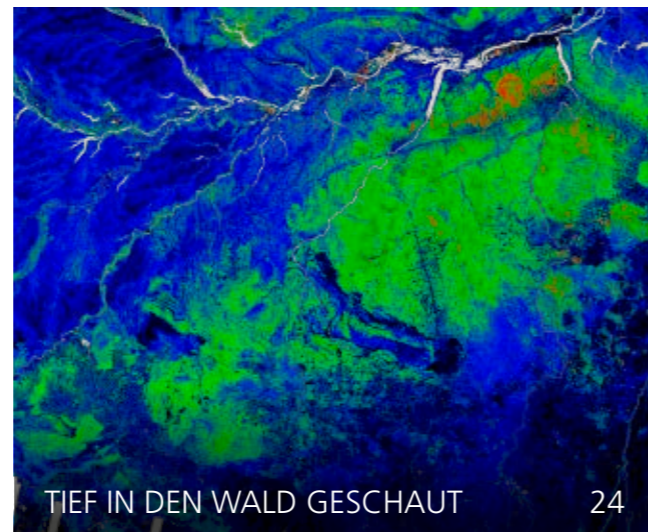
HOTSPOT NORDPOL? 28



GEKOMMEN, UM ZU BLEIBEN? 40



EIN TEAM FÜR ALLE FÄLLE 18



TIEF IN DEN WALD GESCHAUT 24



DIE RAUMSTATION IM KLASSENZIMMER 48

MELDUNGEN	6
▶ DEN SCHLAFENDEN RIESEN WECKEN Das DLR forscht für die Wärmewende	8
WOHER STAMMEN FURCHT UND SCHRECKEN? Die Mission MMX erforscht die Monde des Mars	14
▶ EIN TEAM FÜR ALLE FÄLLE Roboter unterwegs auf dem Ätna	18
TIEF IN DEN WALD GESCHAUT Kombinierte Fernerkundungsdaten zeigen die Waldstruktur	24
EINBLICK Lichtspiel	26
▶ HOTSPOT NORDPOL? Ein Forschungsteam untersucht die Klimaerwärmung	28
VON WEGEN ABGELEGEN Remote Tower überwachen Flughäfen aus der Ferne	32
ONLINE-UMFRAGE ZUM DLRmagazin	36
MELDUNGEN	37
INTELLIGENTER KNOTEN Forschung für den Hafen der Zukunft	38
GEKOMMEN, UM ZU BLEIBEN? Interview zum Thema Mikromobilität	40
KOLLEGE ROBOTER Effiziente Zusammenarbeit in der Flugzeugmontage	42
DER GUTE TON Neue Werkstoffe mit der Klangprobe testen	44
KI BRINGT GEFÜHL IN DIE MUSIK Eine Software reagiert auf das Verhalten des Publikums	46
DIE RAUMSTATION IM KLASSENZIMMER DLR_School_Labs im „Online-Modus“	48
BRANDNEUE IDEEN Die DLR Design Challenge	50
ÖKONOMIE UND KLIMAWANDEL Die wirtschafts- und gesellschaftswissenschaftliche Perspektive	52
EIN MAXIMUM AN ERKENNTNISGEWINN Die letzte Mondlandung	54
VON BABYLON ZU BREITBAND Besuch im Museum für Kommunikation in Frankfurt	56
FEUILLETON	58

EUROPÄISCHE UNABHÄNGIGKEIT BEI DER WEBSUCHE

Im Projekt OpenWebSearch.EU arbeitet das DLR mit 13 Forschungs- und Rechenzentren daran, die Web-Suche im Internet nach europäischen Regeln zu ermöglichen. In den nächsten drei Jahren entwickeln die Partner den Kern eines offenen europäischen Web-Indexes. Dazu stellen Rechenzentren Rechenkapazitäten zur Verfügung und indizieren das Web gemeinsam. Der Index dient als Grundlage für neue Formen der Internetsuche. Außerdem bereiten die Projektbeteiligten eine offene und erweiterbare europäische Infrastruktur zur Web-Suche und -Analyse vor, die auf europäischen Werten, Standards und Rechtsvorschriften beruht. Die Web-Suche wird derzeit weltweit von wenigen Suchmaschinen-Anbietern dominiert. Information und Wissen als öffentliche Güter sind nach Ansicht der Projektbeteiligten daher aktuell nicht frei auffindbar. OpenWebSearch.EU soll die digitale Souveränität Europas unterstützen und einen offenen, fairen Suchmaschinen-Markt fördern.



openwebsearch.eu/Quellen: NASA/Unsplash/Pixabay

Im Projekt OpenWebSearch.EU wird ein Web-Index entwickelt, der die Grundlage für neue Formen der Internetsuche bilden soll.



Forschende aus dem DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte entwickelten eine Wasserstoff-Expansionsmaschine, die auch in schweren Baustellenfahrzeugen eingesetzt werden kann.

BAUSTELLENFAHRZEUG MIT WASSERSTOFFANTRIEB

Schwere Baustellenfahrzeuge könnten künftig mit Wasserstoff auch längere Einsätze bewältigen. Möglich machen soll dies eine Wasserstoff-Expansionsmaschine. Diese Maschine nimmt den hohen Druck des Wasserstoffs aus dem Speicher und reduziert ihn für die Brennstoffzelle. Die dabei frei werdende Energie wird von einem Generator in Strom gewandelt. Der Strom kann wiederum in einem Elektromotor für den Antrieb des Wasserstofffahrzeugs genutzt werden. Diese Idee wurde von Forscherinnen und Forschern des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte entwickelt und mit dem DLR.IDEA AWARD ausgezeichnet. Sie soll die Brennstoffzellentechnologie gegenüber der rein batterieelektrischen Mobilität konkurrenzfähiger machen und die Reichweite von Brennstoffzellenfahrzeugen steigern.

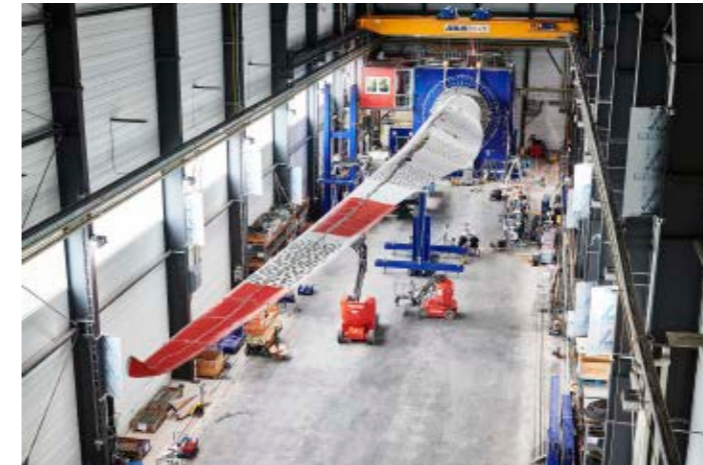
FLUGDATEN MESSEN MIT LASER

Laserbasierte Instrumente können exakte und zuverlässige Flugdaten liefern. Das zeigten DLR-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler in Praxistests im August und Oktober 2022. Dabei waren sie mit dem Forschungsflugzeug Falcon unterwegs. An Bord des Flugzeugs waren ein Laser-Doppler-Anemometer, ein Streuungsmessgerät sowie ein Laser-Spektrometer. Dieser neue Ansatz, Flugdaten mittels Laser zu erfassen, ermöglicht es, Informationen wie Flughöhe, Geschwindigkeit sowie Steig- und Sinkrate zuverlässiger zu bestimmen und den Aufwand für das Einrichten und Abstimmen der Sensoren erheblich zu reduzieren. Ein Vorteil der Lasersensorik ist, dass sich anhand des Messsignals sofort erkennen lässt, ob der Sensor richtig funktioniert. Das ist bei herkömmlichen Sensoren nicht immer der Fall, beispielsweise können sie verschmutzt oder vereist sein und trotzdem einen Messwert liefern, der dann allerdings nicht korrekt ist. Bisher kommen in Flugzeugen oft noch mechanische Verfahren zum Einsatz, die sich seit Beginn der Luftfahrt wenig verändert haben. Während der Flüge konnten die Forscherinnen und Forscher große Mengen an Daten gewinnen und zeigen, dass das Prinzip dieser Technologie funktioniert.



Auf dem Rücken des DLR-Forschungsflugzeugs Falcon befinden sich die Sensoren für die Laserabsorptions-Spektroskopie. Sie untersuchen, wie stark die Sauerstoffmoleküle in der Atmosphäre den Laserstrahl zwischen den Sensoren absorbieren.

1.500 SENSOREN IM ROTORBLATT DER ZUKUNFT



Rotorblatt im Biege- und Schwingungstest

Um Windenergieanlagen in Zukunft effizienter zu betreiben und auch Standorte nutzen zu können, die weniger windintensiv sind, braucht es noch größere und gleichzeitig leichtere Blätter. Wie sich das realisieren lässt und welche technischen Herausforderungen damit verbunden sind, untersucht das DLR mit Partnern aus Forschung und Industrie. Dazu entsteht im niedersächsischen Krummendeich der Forschungspark Windenergie WiValdi (Wind Validation) des DLR. Schritt für Schritt werden sowohl die Windenergieanlagen als auch die Messmasten installiert. Die Rotorblätter der Windenergieanlagen sind mit rund 1.500 Sensoren bestückt, um das Schwingungs- und Belastungsverhalten sowie die Aerodynamik und Statik einer Windenergieanlage im Realmaßstab und Praxisbetrieb messen zu können.

GEZIELTE KOLLISION IM ALL



NASA/Johns Hopkins, APL/Steve Gribben

Die Raumsonde DART kollidierte in 11,6 Millionen Kilometer Entfernung zur Erde mit einem Asteroiden und lenkte ihn von seiner Bahn ab.

Können wir zukünftig die Erde vor den Einschlägen von Asteroiden schützen? Die NASA-Mission DART (Double Asteroid Redirection Test) konnte diese Frage am 27. September 2022 teilweise beantworten. An diesem Tag kollidierte die am 24. November 2021 gestartete Raumsonde mit dem 160 Meter großen Asteroiden Dimorphos. Dieser umrundet den fünfmal so großen Körper Didymos. Die Geschwindigkeit beim Aufprall betrug 22.000 Kilometer pro Stunde. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit veränderte sich der Orbit von Dimorphos, der Didymos zuvor in 1.200 Meter Entfernung umkreiste, messbar um einige Meter. Damit ist es den Menschen erstmals gelungen, in 11,6 Millionen Kilometer Entfernung zur Erde die Bahn eines natürlichen Körpers im Sonnensystem zu verändern.

REGIONALMELDUNGEN:

AUGSBURG: Ende Juli wurde das DLR_School_Lab Augsburg eröffnet. Hier können Kinder und Jugendliche Experimente durchführen, die in altersgerechter Weise aktuelle Forschungsarbeiten der Universität sowie der DLR-Einrichtungen in Augsburg, dem Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie sowie dem Institut für Test und Simulation für Gasturbinen, widerspiegeln.

BRAUNSCHWEIG: Das DLR hat mit dem Forschungsflugzeug Dornier 228 Flugversuche durchgeführt, um Daten dazu zu sammeln, wie Kraftfahrzeuge mit Radfahrenden und Fußgängern interagieren. Auf Basis der Daten entwickeln die Forscherinnen und Forscher Technologien, die die Kooperation zwischen Verkehrsteilnehmenden verbessern.

JENA: Im September eröffnete das DLR_School_Lab Jena, wo Kinder und Jugendliche zu Themen der Raumfahrt und Digitalisierung experimentieren und spannende Berufsmöglichkeiten entdecken können. Inhaltlich orientiert sich das Labor vor allem an der Forschungstätigkeit des DLR-Instituts für Datenwissenschaften.

JÜLICH: Am Solarturm des DLR in Jülich hat das Unternehmen Synhelion erstmals erfolgreich ein solarthermisches Verfahren für die Produktion von Synthesegas in größerem Maßstab getestet. Aus Synthesegas kann anschließend flüssiger Treibstoff produziert werden. Dieser ist klimaneutral und damit ein vielversprechender technologischer Ansatz, um die Klimaschutzziele im Mobilitätssektor umzusetzen.

KÖLN: Der ehemaligen Leiterin der Abteilung Strahlenbiologie und stellvertretenden Leiterin des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin, Dr. Gerda Horneck, wurde die William-Nordberg-Medaille von COSPAR (Committee on Space Research) verliehen für ihre bahnbrechenden Arbeiten auf dem Gebiet der Astrobiologie, Strahlung und Biologie. Seit 2018 benennt die International Astronomical Union nach allen COSPAR-Preisträgerinnen und -Preisträgern einen Kleinplaneten.

OLDENBURG: Auf dem Gelände rund um Escherweg, Fritz-Bock- und Industriestraße errichten das DLR, das Informatik-Institut OFFIS und die Universität Oldenburg gemeinsam ein Innovationsquartier. Ziel ist die gemeinsame Forschung im IT-Bereich für die Felder Produktion und Energiewirtschaft, Gesundheit und Pflege, Mobilität der Zukunft sowie Umwelt und Nachhaltigkeit. Der Bau schafft dringend benötigten Raum und vor allem Labore für die Entwicklung der Verkehrsforschung im DLR-Institut Systems Engineering für zukünftige Mobilität.

STUTTGART: In Empfingen wurde das Johannes Kepler Observatorium eingeweiht. Die einmalige Forschungs- und Entwicklungsstation wird vom DLR-Institut für Technische Physik betreut und erfasst die Flugbahn und Beschaffenheit von Weltraumschrott mittels Lasertechnologie. Die Informationen helfen dabei, aktive Satelliten vor Zusammenstößen mit Weltraumschrott zu schützen.

DLR.DE: MELDUNGEN AUF UNSERER WEBSITE
Alle Meldungen können in voller Länge und mit Bildern oder auch Videos online im News-Archiv eingesehen werden.

[DLR.de/meldungen](https://www.dlr.de/meldungen)

DEN SCHLAFENDEN RIESEN WECKEN

Das DLR forscht für die Wärmewende

von Denise Nüssle

© DLR



Die Testanlage für Wärmespeicherung in Salzschnmelzen (TESIS) des DLR-Instituts für Technische Thermodynamik in Köln ist die erste Forschungsanlage für Flüssigsalzspeicher und -technologie in diesem Maßstab in Deutschland. Hier kann die Industrie Komponenten zur Flüssigsalzspeicherung unter realen Einsatzbedingungen erproben.

In öffentlichen Diskussionen zum Thema Energiewende fristete der Bereich der nachhaltigen Wärme lange ein Schattendasein. Der Fokus lag auf Strom aus erneuerbaren Ressourcen und wie man ihn am besten in großen Mengen erzeugt und verteilt. Wer nicht zum Kreis der Häuslebauer und Renovierenden gehörte und sich deshalb zwangsläufig mit Heizungstechnik, Gebäudedämmung und Wärmepumpen beschäftigen musste, an dem ging das Thema „Wärmewende“ oft vorbei – bis jetzt.

Aufgrund der unsicher gewordenen Versorgungslage, vor allem im Bereich von Erdgas, stehen Bürgerinnen und Bürger, Politik und Wirtschaft vor der Frage, wie industrielle Prozesse, die oft viel Wärme benötigen, am Laufen gehalten werden können. Gleiches gilt fürs Heizen öffentlicher wie privater Gebäude. Auch der politische und gesellschaftliche Konsens, dem globalen Klimawandel Einhalt zu gebieten, macht einen neuen Blick auf unsere Wärmeversorgung sowie nachhaltigere und teilweise komplett neue technologische Lösungen notwendig. Das DLR hat mit seiner Energiesystem-Analyse den Finger am Wärmepuls der Republik. Gleichzeitig forscht es gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie an innovativen Technologien für klimafreundliche Wärme aus erneuerbaren Quellen und unterstützt Ausgründungsprojekte beim Start ins Unternehmensleben.

Ein Blick auf die Zahlen: ein Energieriese namens Wärme

Mehr als die Hälfte der in Deutschland verbrauchten Energie wird dafür verwendet, Wärme und Kälte herzustellen – einschließlich der Prozesswärme für Industrieprozesse. In diesem Zusammenhang entstehen auch 40 Prozent der energiebedingten CO₂-Emissionen. Auf Ebene der privaten Haushalte schlägt Wärme für Heizen und Warmwasser ebenfalls enorm zu Buche: Sie ist für rund 80 Prozent des Energieverbrauchs verantwortlich. Die finanzielle Belastung ist angesichts steigender Gaspreise in letzter Zeit enorm gewachsen.

„Im Vergleich zur ‚Stromwende‘ ist die Bilanz der ‚Wärmewende‘ allerdings bisher eher bescheiden“, fasst Evelyn Sperber vom DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme zusammen. Sie arbeitet in der Abteilung Energiesystem-Analyse und erforscht die Wechselwirkungen zwischen der Wärmeversorgung von Gebäuden und der Stromversorgung der Zukunft. Der Anteil von Wärme aus erneuerbaren Energien liegt bei rund 15 Prozent. Der Löwenanteil stammt aus Biomasse, mit Holz als wichtigstem Energieträger. Biomasse ist allerdings nur begrenzt verfügbar, ist nicht unbedingt klimaneutral und ihr Anbau kann in Konkurrenz zur Erzeugung von Nahrungsmitteln stehen. Gebäude aller Art werden immer noch überwiegend mit fossilen Rohstoffen – also Erdgas oder Erdöl – und veralteten Anlagen geheizt. „Wenn es uns gelingt, Technologien für



Die Forscherinnen und Forscher des DLR-Instituts für Vernetzte Energiesysteme entwickeln Modelle zur Kopplung des Wärmesektors mit dem Stromsektor.



Eine kleine Drohne erfasst Gebäude hinsichtlich ihrer geometrischen, bauphysikalischen, energetischen und funktionalen Eigenschaften.

eine klimaschonende Wärmeversorgung intelligent mit dem durch Wind und Fotovoltaik geprägten Stromsektor zu verknüpfen, kann die Wärmewende einen immensen Beitrag für die Energiewende leisten“, blickt DLR-Forscherin Sperber in die Zukunft.

„Wenn es uns gelingt, Technologien für eine klimaschonende Wärmeversorgung intelligent mit dem durch Wind und Fotovoltaik geprägten Stromsektor zu verknüpfen, kann die Wärmewende einen immensen Beitrag für die Energiewende leisten.“

Evelyn Sperber

Energetische Gebäudesanierung: DLR-Know-how für Analyse und Bewertung

In Deutschland wird kontinuierlich weniger Wohnfläche abgerissen, als neu gebaut. Selbst wenn Neubauten keine CO₂-Emissionen verursachen würden, ließen sich die Emissionen insgesamt nicht wesentlich senken – und damit auch die gesetzlich verankerten Klimaziele nicht erreichen. Eine wichtige Stellschraube ist deshalb die energetische Sanierung von bereits existierenden Gebäuden. Doch aktuell sind die Sanierungsrate und die Sanierungstiefe in Deutschland zu gering. Eigentümer und Investoren scheuen die mit einer umfassenden Sanierung verbundenen, nur schwer kalkulierbaren Kosten und Risiken. Die Qualitätssicherung ist schwierig, weil objektive Prüftechnologien fehlen oder teuer und aufwändig sind.

Um das zu ändern, arbeitet das DLR mit einem interdisziplinären Team an einer ganzen Reihe von Technologien. Mit ihnen sollen sich Gebäude und Quartiere in Zukunft objektiv, schnell und kostengünstig analysieren und zu bewerten lassen. „Wir möchten eine präzise Grundlage für Planungs- und Bauunternehmen, Eigentümer und Investoren schaffen. Anhand dieser können sie die energetisch wie wirtschaftlich sinnvollen Sanierungsmaßnahmen ableiten und nach



Das Integrated Positioning System (IPS DLR OS) des DLR, hier getragen vom Boston Dynamics Roboterhund SPOT, misst die innere Gebäude- und Raumgeometrie.

Abschluss auch qualitativ überprüfen“, fasst Prof. Dr. Bernhard Hoffschmidt zusammen. Er leitet das DLR-Institut für Solarforschung und hat bereits mehrere Ausgründungen erfolgreich angestoßen, unterstützt und geleitet. Der Weg von der Forschung an solarthermischen Kraftwerken zur Gebäudeanalyse ist dabei gar nicht so weit, wie man vermutet: Hoffschmidts Institut hat beispielsweise ein Messsystem entwickelt, das an Bord einer kleinen Drohne den Zustand der oft riesengroßen Spiegelfelder solarthermischer Kraftwerke überwacht. Mit ähnlichen Ansätzen lassen sich in Zukunft auch Gebäude und ganze Stadtviertel analysieren und bewerten. „Das Wissen, die Technologien und die Erfahrung im Einsatz haben wir im DLR dazu größtenteils schon“, ist sich Bernhard Hoffschmidt sicher.

Einige Beispiele: Analysemethoden aus den Bereichen Erdbeobachtung, Sicherheits- und Energieforschung nutzen bereits Sensoren, die von Satelliten, Flugzeugen oder Drohnen aus automatisch Messungen vornehmen. Viele davon ließen sich anpassen und im Gebäudebereich einsetzen. Zudem testen DLR-Forschende ein spezielles Kamerasystem: Es ist huckepack auf einem Roboterhund unterwegs, kann die innere Geometrie von Räumen oder ganzen Gebäuden per 3D-Scan feststellen und außerdem

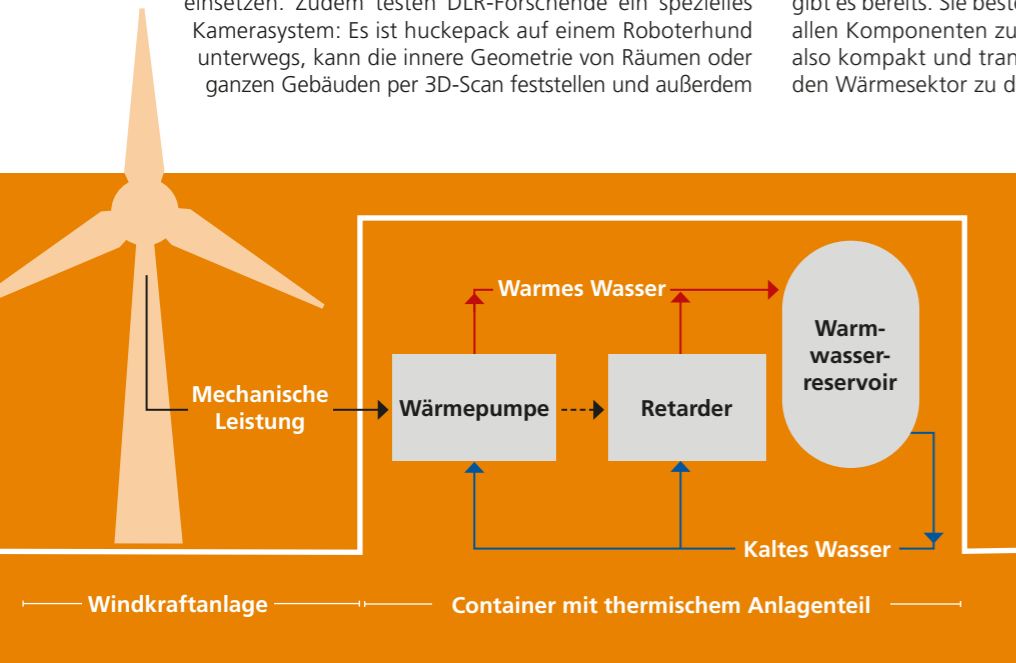
Lücken und Löchern auf die Spur kommen. Radar und Radiometrie machen verborgene Wandstrukturen, wie Hohlräume, Kanäle und Schächte, sichtbar. Mit der Lumoview Building Analytics hat das DLR bereits die erste Ausgründung in diesem Bereich auf den Weg gebracht. Mit einem tragbaren 360-Grad-Infrarotkammersystem und einer speziellen Software erstellt das Start-up dreidimensionale Gebäudemodelle. Die Aufnahmen zeigen auch die thermischen Eigenschaften. So lässt sich auf einen Blick erkennen, an welchen Stellen Außenwände am meisten Wärme verlieren oder wo es feuchte Stellen gibt. Das Ganze funktioniert in wenigen Minuten, einfach und ohne lange Einarbeitung.

Ob Quartiere, Gewerbe oder Industrie: Wärme vernetzt denken

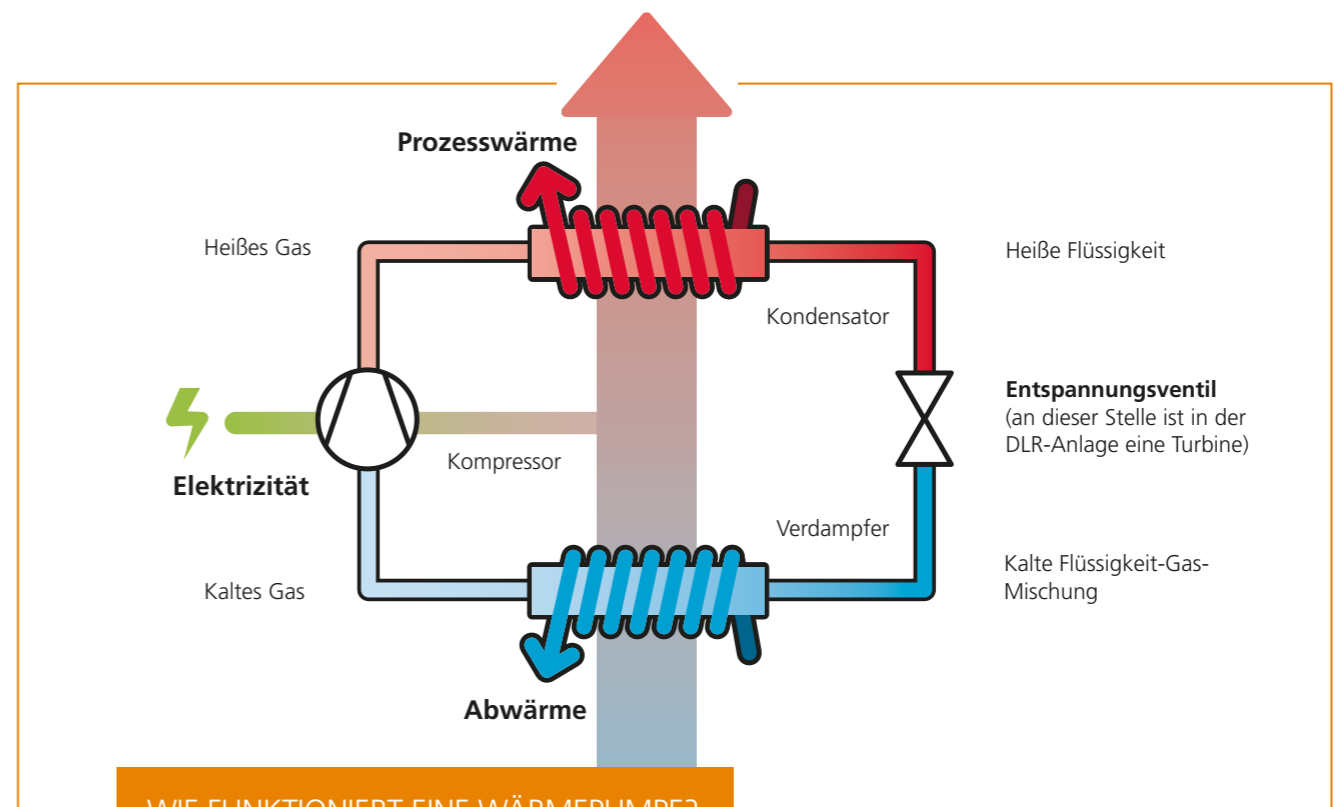
Für den Erfolg der Energiewende, muss auch der Wärmesektor vernetzter gedacht werden und vorhandene Ressourcen müssen besser und flexibler gemanagt werden – auf allen Ebenen und sektorenübergreifend. Das bedeutet, einzelne Gebäude im Kontext ihrer Umgebung zu betrachten und die Gebäudeklimatisierung mit Strom aus Fotovoltaik und thermischen Kollektoren zu koppeln. Abwärme aus Industrie und Gewerbe gilt es, dort, wo sie vorhanden ist, möglichst vor Ort effizient zu nutzen sowie die Wärmedämmung und den Ausbau des Wärmenetzes besser aufeinander abzustimmen. Die Bereiche Strom, Wärme, Industrie und Mobilität werden in Zukunft wesentlich enger miteinander gekoppelt sein. Im Forschungsprojekt Wärmewende Nordwest untersuchen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des DLR-Instituts für Vernetzte Energiesysteme gemeinsam mit Partnern zum Beispiel die Wärmewende in den Regionen Oldenburg und Bremen. Das Ziel ist dabei, den Wärmebedarf von Gebäuden, Quartieren, Gewerbe und Industrie transparent zu erfassen und zu optimieren. Sie entwickeln dazu ein bestehendes Simulationsmodell weiter, damit dieses zusätzlich zu den Stromflüssen auch die Wärmeflüsse sowie die Komponenten der Wärmenetze abbildet.

Zum Heizen und Speichern: Wärme direkt aus Wind erzeugen

Die Windenergie ist einer der Hauptpfeiler der Energiewende. Schon heute trägt sie rund 20 Prozent zur Stromerzeugung bei. Doch aus Wind lässt sich auch direkt Wärme erzeugen – ohne CO₂-Emissionen und damit klimafreundlich, relativ einfach und preiswert. Unter dem Stichwort Windthermie erforschen die DLR-Institute für Flugsystemtechnik, für Technische Thermodynamik und für Vernetzte Energiesysteme diese bisher wenig bekannte Technologie, ihr wirtschaftliches Potenzial sowie die Einsatzmöglichkeiten. Eine erste Testanlage gibt es bereits. Sie besteht aus einer kleinen Windenergieanlage und allen Komponenten zur Wärmeerzeugung in einem Container – ist also kompakt und transportabel. „Windthermie ist ein Ansatz, um den Wärmesektor zu dekarbonisieren und flexibler zu machen.“



Windthermische Pilotanlage des DLR in Celle



WIE FUNKTIONIERT EINE WÄRMEPUMPE?

Wärmepumpen transportieren Wärme von einem Ort mit niedriger Temperatur zu einem Ort mit höherer Temperatur und umgekehrt. Meist erfolgt dieser Transport in einem geschlossenen System, in dem ein Wärmeträgermedium fließt. Wärme von kalt nach warm zu pumpen benötigt Energie in Form von Strom – und zwar umso mehr, je größer der Unterschied zwischen den Temperaturniveaus ist. Ein bekanntes Beispiel ist der Kühlschrank, bei dem eine Wärmepumpe die Wärme von innen nach außen befördert.

Der entscheidende Vorteil ist die direkte Erzeugung von Wärme. Bisher nutzt man zum Beispiel gerade nicht benötigten Strom aus Windkraft, um Wärme zu erzeugen und diese zu speichern. Dabei hat man einen Schritt mehr und entsprechend hohe Verluste bei der Umwandlung von Bewegungsenergie in Strom und dann erst Wärme“, beschreibt Projektleiter Malte Neumeier vom Institut für Flugsystemtechnik. Einsatzmöglichkeiten für Windthermie sehen die DLR-Forscher überall dort, wo Wärme auf niedrigem und mittlerem Temperaturniveau bis rund 300 Grad Celsius benötigt wird. Dazu zählen Nah- und Fernwärmeversorgung von Gebäuden sowie viele Industrieprozesse.

Wärmepumpe XXL: nachhaltige Wärme für Industrieprozesse

Wärmepumpen werden eingesetzt, um zu kühlen oder zu heizen. Diese Prozesse benötigen Energie in Form von Strom. „Aktuell werden Wärmepumpen zu einer immer interessanteren technologischen Komponente – für private Haushalte wie für die Industrie. Denn sie sind ein Lösungsansatz, um den Wärmesektor zu elektrifizieren und damit Emissionen zu vermeiden – natürlich nur, wenn dabei der Strom aus erneuerbaren Quellen zum Einsatz kommt“, fasst Dr. Panagiotis Stathopoulos vom DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse zusammen und ergänzt: „Das liegt daran, dass Wärmepumpen ein Mehrfaches an Wärme pro verbrauchte Einheit Strom produzieren. Das ist deutlich effizienter als elektrische Heizer oder die Verbrennung von grünem Wasserstoff – besonders im Temperaturbereich bis 300 Grad Celsius. Allerdings handelt es sich bei Wärmepumpen um komplexe Systeme mit hohen Installationskosten.“



Dieser Prototyp einer speziellen Hochtemperatur-Wärmepumpe namens CoBra steht am DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse in Cottbus. Die Anlage kann Wärme und Kälte für Industrieprozesse im Demonstrationsmaßstab bereitstellen.



Dr. Panagiotis Stathopoulos vom DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse an der CoBra-Anlage

Quelle: White Paper „Strengthening Industrial Heat Pump Innovation – Decarbonizing Industrial Heat“



Fürs Heizen von Gebäuden erforscht das DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme die „H2-ready-Technologie“. Langfristig könnte so auch Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen direkt in Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerken zum Einsatz kommen.

Im Fokus der DLR-Forschungsarbeiten stehen vor allem sogenannte Hochtemperatur-Wärmepumpen. Sie sollen nachhaltige Wärme für Industrieprozesse bis zu 300 Grad Celsius bereitstellen, beispielsweise zum Trocknen oder Dampferzeugen. Mehr als 80 Prozent der Emissionen des Industriesektors stammen aus der Verbrennung von fossilen Rohstoffen, um Prozesswärme herzustellen. „Diese Technologie hat das Potenzial, ein Viertel der gesamten industriellen CO₂-Emissionen einzusparen. Die bisher erhältlichen Wärmepumpen können maximal Wärme bis 150 Grad zur Verfügung stellen. Wir schließen mit unseren Entwicklungsarbeiten also eine technologische Lücke und entwickeln vor allem die dafür benötigten Komponenten und Kreisprozesse“, beschreibt Panagiotis Stathopoulos. Dazu wollen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vorhandene Abwärme bei möglichst hoher Temperatur nutzen.

„Diese Technologie hat das Potenzial, ein Viertel der gesamten industriellen CO₂-Emissionen einzusparen.“

Panagiotis Stathopoulos

Hierfür entstehen an den beiden DLR-Standorten Cottbus und Zittau einmalige Pilotanlagen: Der Prototyp CoBra wurde im September 2022 eingeweiht und arbeitet mit getrockneter Luft als Wärmeträger-Medium. Der Name CoBra setzt sich zusammen aus Cottbus, dem Standort der Anlage, und dem thermodynamischen Brayton-Prozess, der das Grundprinzip der Anlage beschreibt. Mit der Anlage wollen die Forschenden das Grundprinzip von Wärmepumpen im Hochtemperaturbereich demonstrieren. Neue Kompressionssysteme, die relativ hohe Temperaturen aushalten und ohne teure Materialien auskommen, sowie kompakte, effiziente und kostengünstig herzustellende Wärmeübertrager sind nächste Entwicklungsziele. Die zweite Pilotanlage soll nächstes Jahr in Zittau in Betrieb gehen. Sie basiert auf dem Rankine-Prozess, bei

HABEN WIR EIN WÄRMEPROBLEM?

Drei Fragen an Prof. Dr. Christian Sattler, Bereichsvorstandsmitglied Energie und Verkehr sowie Direktor des DLR-Instituts für Future Fuels

Warum war Wärme so lange aus dem Fokus geraten? Haben wir ein Wärmeproblem?

■ Wir haben kein Wärmeproblem, sondern einen großen Wärmebedarf: sowohl zum Heizen von Gebäuden als auch zum Betrieb von Industrieprozessen. Das Problem sind die CO₂-Emissionen, weil Wärme hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger erzeugt wird. Ein weiterer Aspekt ist die Versorgungssicherheit.

Wie können Forschung und Technologie helfen?

■ Indem sie beispielsweise effiziente Energiewandlungsprozesse und Speicher entwickeln, die erneuerbare Energie als Wärme bereitstellen, wann immer sie gebraucht wird.

Kann es ein wärmeautarkes Deutschland oder Europa geben?

■ Das könnte es, aber es ist vielleicht nicht die beste Lösung. Wärme lässt sich anders als Strom oder Brennstoffe nicht beliebig weit transportieren und die Nutzung erneuerbarer Ressourcen zur Wärmeerzeugung erfordert viel Platz. Gerade in Ballungsräumen ist daher eine Sektorenkopplung notwendig, bei der neben Strom und Abwärme auch Reststoffe und gespeicherte Energie genutzt werden könnten. Und diese könnte dann auch aus anderen Regionen kommen, in denen mehr erneuerbare Energie pro Fläche verfügbar ist und somit effizienter gespeichert werden kann.

dem Wasser als Arbeitsflüssigkeit genutzt wird – der Brayton-Zyklus funktioniert mit Luft. Die Betriebsweise, also die richtige Temperatur und der richtige Druck zum richtigen Zeitpunkt, ist zentral in diesem Prozess, um Wärme sehr effizient auf ein höheres Temperaturniveau zu heben.

Heizen mit Kalk: von der Kunst (und der Wissenschaft) des Wärmespeicherns

Der Einsatz von Strom aus erneuerbaren Ressourcen zum Heizen beziehungsweise die Elektrifizierung der Wärmeerzeugung bietet die Möglichkeit, auch den Wärmesektor zu dekarbonisieren und dessen CO₂-Emissionen massiv zu senken. Da dieser Strom allerdings aufgrund von Wetterlage und Saison nicht immer in gleichem Umfang zur Verfügung steht, benötigt das Energiesystem der Zukunft auch Wärmespeicher.



© DLR

In dem Reaktor wird das Kalkpulver erhitzt. Das Mischwerkzeug unterstützt die thermochemische Reaktion.

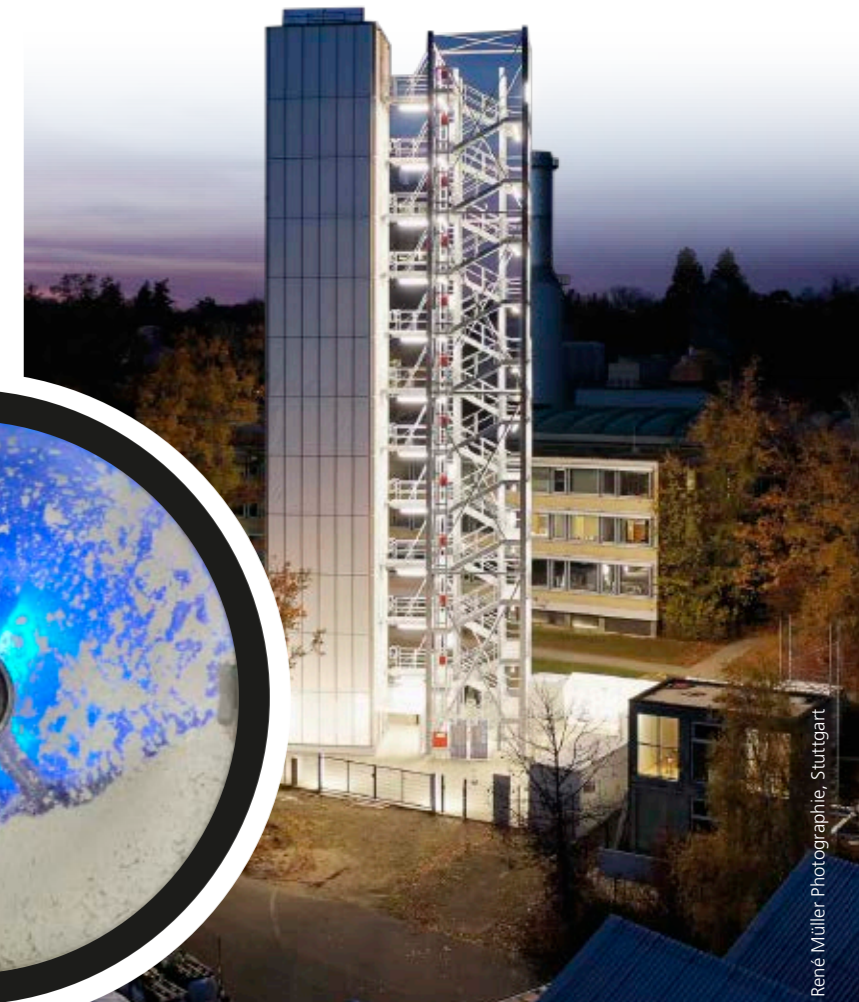


Im DLR-Institut für Technische Thermodynamik entwickeln Forscherinnen und Forscher neuartige Speicherlösungen auf Basis unterschiedlicher Materialien für einen Temperaturbereich von 100 bis 1.000 Grad Celsius und Speicherdauern von bis zu mehreren Monaten. Zum Einsatz kommen die unterschiedlichsten Speichermedien: von Flüssigkeiten wie geschmolzenem Salz oder Thermo-Öl über Druckluft bis hin zu Feststoffen wie Zement, Keramikpartikeln oder Kalk.

Wie man Gebäude mit einem Wärmespeicher aus gebranntem Kalk klimaneutral heizen kann, daran tüfelt ein Team um Dr. Marc Linder und Dr. Matthias Schmidt schon seit einigen Jahren – und das mit Erfolg: Aktuell testen die DLR-Forschenden gemeinsam mit der Universität Stuttgart eine Pilotanlage und bringen diese Technologie so zum ersten



Verschiedene Kalkproben



René Müller/Photographie, Stuttgart

In dem ersten adaptiven Hochhaus der Welt, das Ende 2021 in Stuttgart eröffnete, soll der thermochemische Kalkspeicher ab 2023 unter realen Bedingungen getestet werden.

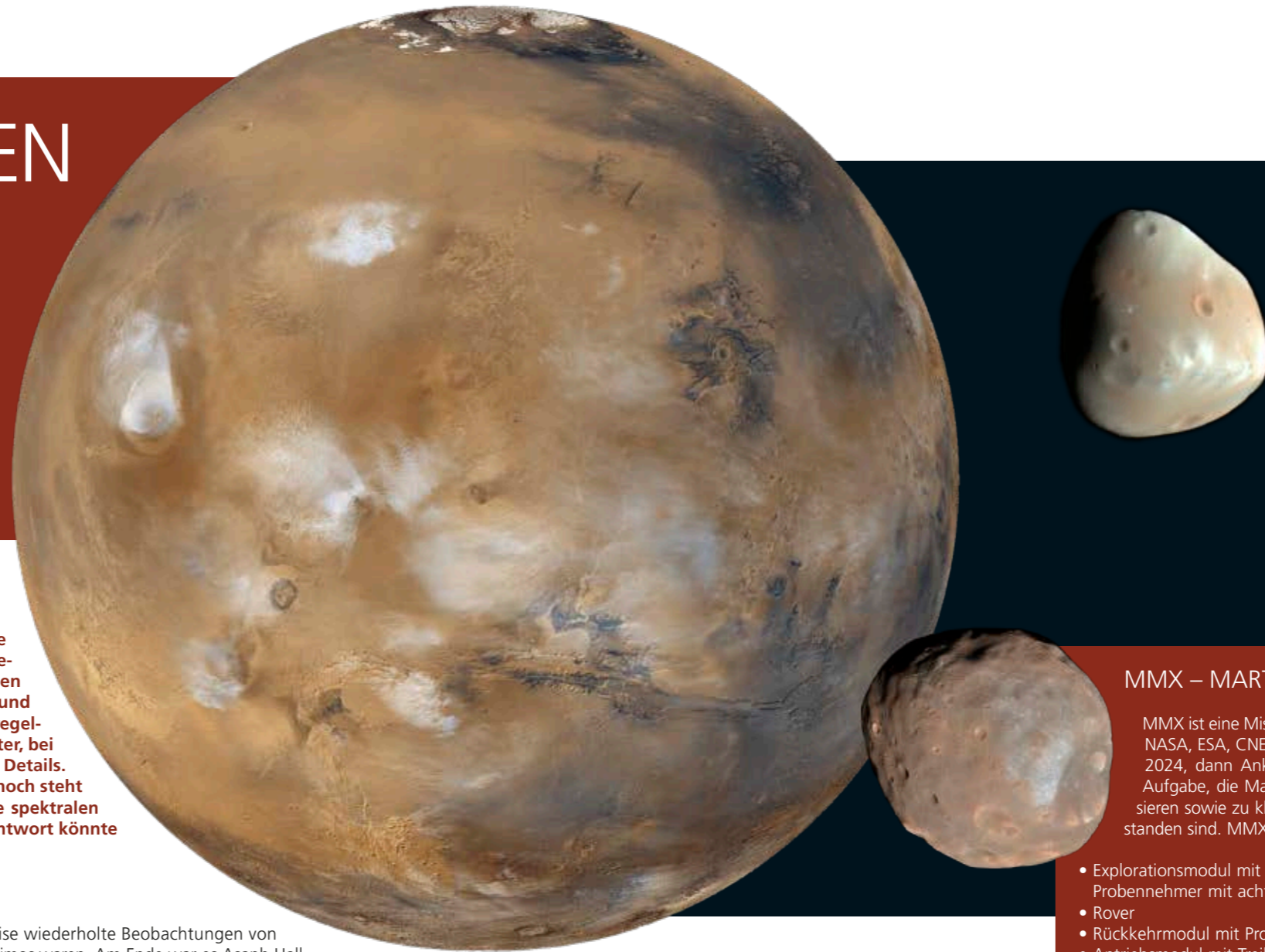
Mal und in größerem Maßstab außerhalb des Labors zum Einsatz. Um Wärme zu erzeugen, nutzen Kalkspeicher die chemische Reaktion von gebranntem Kalk und Wasser. Zunächst erhitzen sie Kalkpulver, sogenannten gelöschten Kalk, in einem Ofen auf über 450 Grad Celsius – mithilfe von Energie aus erneuerbaren Ressourcen. Dadurch entweicht das im Kalk gebundene Wasser und es entsteht gebrannter Kalk. Diesen kann man relativ einfach und über Monate verlustfrei einlagern. Benötigt man Wärme, gibt man zum gebrannten Kalk wieder Wasser dazu. Die beiden Stoffe reagieren und es entstehen wieder gelöschter Kalk sowie Temperaturen von über 100 Grad Celsius. „Die Heizleistung lässt sich durch die Kalk- und Wassermenge regeln“, erklärt Schmidt. „Wird der gelöschte Kalk wieder gebrannt, kann er erneut Energie speichern. Dieser Vorgang kann beliebig oft wiederholt werden.“ Im Sommer lassen sich mit diesem Prinzip erneuerbare Energien einspeichern und im Winter zum Heizen nutzen. Aus dem Betrieb der Pilotanlage wollen die Forschenden wichtige Erkenntnisse gewinnen, wie sich eine solche Heizung am besten regeln lässt, und so dem Einsatz in der Praxis näher kommen. Für private Haushalte wären Kalkspeicher vor allem interessant, weil Kalk sehr kostengünstig und in großen Mengen verfügbar ist. Auch ganze Wohnviertel ließen sich auf diese Weise versorgen – vielleicht bringt also der Tankwagen in naher Zukunft nicht mehr Öl zum Heizen, sondern ein Lkw einen Behälter mit Kalk.

Denise Nüssle ist Presseredakteurin im DLR.

WOHER STAMMEN FURCHT UND SCHRECKEN?

Die Mission MMX soll das Rätsel um den Ursprung der Marsmonde lösen

von Ulrich Köhler



Der Mars mit seinen beiden Monden Deimos (oben) und Phobos

Furcht und Schrecken, diese angsteinflößenden Gesellen umkreisen den römischen Kriegsgott Mars. Ein kräftiges Sprachbild! Phobos und Deimos – in Homers Ilias zwei Brüder im Gefolge des hellenischen Kriegsgottes Ares – diese Namen erhielten die 1877 vom Amerikaner Asaph Hall entdeckten Monde unseres Nachbarplaneten. Neben dem Mond der Erde sind sie die beiden einzigen Trabanten im inneren Sonnensystem. Sie sind viel kleiner als der Erdmond und aufgrund der geringen Gravitationskräfte nicht kugelförmig, sondern von unregelmäßiger Gestalt. Der größte Durchmesser von Phobos beträgt knapp 27 Kilometer, bei Deimos sind es sogar nur 15 Kilometer. Irdische Teleskope zeigen deshalb keine Details. Doch wurden beide Monde von Marssonden aus der Nähe beobachtet. Immer noch steht eine große Frage im Raum: Wo liegt der Ursprung der beiden Winzlinge? Die spektralen Eigenschaften ähneln denen von Asteroiden und kaum denen des Mars. Die Antwort könnte eine sehr spezielle Raumsonde geben: MMX – Martian Moons eXploration.

Die Entdeckungsgeschichte der Monde ist ein kleiner Astro-Krimi: Asaph Hall, geboren 1829, hatte seine erste Stelle am Harvard-Observatorium. Drei magere Dollar verdiente er pro Woche. Später bekam er etwas mehr am US Naval Observatory in Washington. Für Hall galt damals noch die Lehrbuchmeinung: „Der Mars hat keine Monde!“ Skeptisch wurde er, als seine Massenberechnungen für den Mars, abgeleitet aus den Bahnstörungen von Erde und Jupiter, nicht passten. Er zweifelte am mondlosen Mars und plante Beobachtungen für die nahe Oppositionsstellung von nur 56 Millionen Kilometern im August 1877.

Hartnäckigkeit zahlt sich aus

Seine Sorge, dass sein Kollege und Konkurrent Henry D. Holden die besten Nächte für Beobachtungen im Herbst 1877 am großen Refraktor, dem Great Equatorial Telescope, selbst zur Suche nutzen würde, war glücklicherweise unbegründet. Als Hall die Suche wegen schlechter atmosphärischer Bedingungen schon aufgeben wollte, ermunterte ihn seine Frau Angeline, weiterzusuchen. Mit Erfolg! In der Nacht zum 12. August 1877 notierte Hall „einen blassen ‚Stern‘ nahe Mars“; dann trübte es ein. Am 16. August fand er den Lichtpunkt wieder, der mit dem Mars wanderte. Er hatte Deimos entdeckt. Und zwei Tage später auch Phobos. Allerdings reklamierte sein Direktor Simon Newcomb in der New York Times vom 20. August die Entdeckung dreist für sich. Henry Holden behauptete sogar, weitere drei Marsmonde entdeckt zu haben. Ein früherer Fall von Fake News? Hall rechnete nach und stellte fest, dass diese neuen Monde die Keplerschen Bahngesetze verletzen,

beziehungsweise wiederholte Beobachtungen von Phobos und Deimos waren. Am Ende war es Asaph Hall, der in der Fachwelt aufgrund seiner korrekten Berechnungen höchstes Ansehen genoss.

Keine Monde für die Ewigkeit

Phobos umkreist den Mars in etwas mehr als siebeneinhalb Stunden rund 6.000 Kilometer über dessen Oberfläche. Der Mond ist also schneller, als der Planet rotiert, nämlich in 24,5 Stunden. Ein hypothetischer Marsmensch würde also Phobos im Westen aufgehen und im Osten untergehen sehen. Keine anderen Monde im Sonnensystem umkreisen ihren Planeten auf derart nahen Bahnen. Auch Deimos' Orbit befindet sich nur etwa 23.500 Kilometer über dem Mars und hat eine Umlaufzeit von etwas über 30 Stunden.

Messungen von Raumsonden, immer wieder auch mit der DLR-Stereokamera HRSC (High Resolution Stereo Camera) auf dem ESA-Orbiter Mars Express, haben ergeben, dass der Mars Gezeitenkräfte auf die beiden kleinen Körper ausübt und sich dadurch ihre Bahnen verändern. Deimos entfernt sich vom Mars und dürfte dem Planeten in ferner Zukunft abhanden kommen, ein Schicksal, das er mit dem Erdmond teilt. Phobos indes kommt dem Mars langsam auf einer spiralförmigen Bahn näher und wird vermutlich bei Erreichen einer Entfernung von 5.500 Kilometern, der Roche-Grenze, auseinanderbrechen, weil die Gezeitenkräfte den inneren Zusammenhalt übersteigen.

Das passiert voraussichtlich in 40 Millionen Jahren. Die Gesteinstrümmen dürften dem Mars dann zeitweise einen Ring bescheren.

Erste Nahaufnahmen der Monde sendete 1972 die NASA-Sonde Mariner 9. 1976 bis 1980 folgten die beiden amerikanischen Viking-Orbiter. Dann kamen Fotos und Messungen der NASA-Marsorbiter Mars Global Surveyor, Mars Reconnaissance Orbiter, 2001 Mars Odyssey und der ESA-Sonde Mars Express hinzu. Die ehemalige UdSSR und Russland entwickelten sogar drei Missionen exklusiv für die Untersuchung der Marsmonde: In den späten 80er-Jahren Phobos 1 und 2, zu denen aber der Funkkontakt nach Übermittlung weniger Daten abbrach, sowie die 2011 gestartete Mission Phobos Grunt, die bereits kurz nach dem Start verloren ging. Dementsprechend sind Phobos und Deimos, obwohl sie fotografiert, vermessen und in ihren geologischen, mineralogischen und geochemischen Eigenschaften ein wenig charakterisiert werden konnten, für die Planetenforschung noch Terra incognita.

MMX – MARTIAN MOONS EXPLORATION

MMX ist eine Mission der japanischen JAXA mit Beiträgen von NASA, ESA, CNES und DLR – Start: voraussichtlich September 2024, dann Ankunft beim Mars: August 2025. Sie hat die Aufgabe, die Marsmonde Phobos und Deimos zu charakterisieren sowie zu klären, wie und wo die beiden Trabanten entstanden sind. MMX besteht aus den Teilen:

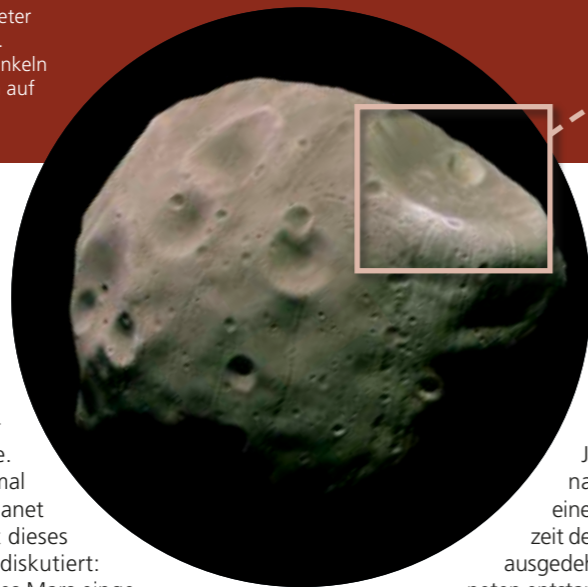
- Explorationsmodul mit Landebeinen und Probennehmer mit acht Instrumenten
- Rover
- Rückkehrmodul mit Probenkapsel und drei Instrumenten
- Antriebsmodul mit Treibstofftanks und Triebwerken für Einschuss in die Marsumlaufbahn

Der Rover mit knapp 25 Kilogramm Masse inklusive 4 Kilogramm dazugehörige Komponenten auf dem Mutterschiff ist ein gemeinsames Projekt von CNES und DLR. Seitens des DLR sind unter der Leitung des Instituts für Robotik und Mechatronik auch die Institute für Raumfahrtssysteme, für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, für Systemdynamik und Regelungstechnik, für Optische Sensorsysteme, für Planetenforschung und sowie das Nutzerzentrum für Weltraumexperimente (MUSC) beteiligt.

Der Rover wird die geologischen, physikalischen und mineralogischen Eigenschaften der Oberfläche von Phobos untersuchen und die Mobilität bei niedriger Schwerkraft demonstrieren. Die Daten dienen auch zur Eichung der Orbiter-Messungen und werden die Landung des Explorationsmoduls unterstützen. Der Datenaustausch mit der Erde erfolgt über den Orbiter. Der Betrieb des Rovers wird von den Kontrollzentren des CNES in Toulouse und des DLR in Köln (MUSC – Microgravity User Support Center) gesteuert. Auf dem Rover befinden sich:

- Stereokamera (NavCAM)
- Radiometer (miniRAD)
- Raman-Spektrometer (RAX)
- Zwei Radkameras am Chassis (WheelCAM)

Seit den ersten detaillierten Aufnahmen ist Phobos ein nicht einmal 30 Kilometer großes Rätsel der Planetenforschung. Seine Entstehung liegt ebenso im Dunkeln wie der Ursprung der linearen Riefen auf seiner Oberfläche.



NASA/JPL-Caltech/MSSS/University of Arizona

Eingefangen oder herausgeschleudert?

Zwei große Fragen stehen im Raum: Wie sind die beiden Monde entstanden? Woraus bestehen sie? Beide Körper sind extrem dunkel, sie spiegeln nur fünf Prozent des Sonnenlichts. Fast wie Holzkohle. Der Mars hingegen reflektiert im Schnitt fast viermal so viel. Damit ist ein gemeinsamer Ursprung von Planet und Monden nur schwer erklärbar. Trotzdem ist dieses Modell noch im Rennen. Drei Theorien werden diskutiert: Entweder sind die Monde von der Schwerkraft des Mars eingefangene Asteroiden oder sie entstanden infolge eines gewaltigen Einschlags auf dem Planeten. Vielleicht sind sie aber auch zeitgleich mit Mars entstanden.

Für die „Einfangtheorie“ spricht, dass das Farbspektrum beider Monde der „D-Klasse“ von Asteroiden ähnelt: Sie sind genauso dunkel, dabei homogen rötlich, wasserarm und reich an kohlenstoffhaltigen und silikatischen Molekülen. Ihren Ursprung könnten die „Asteroiden“-Monde vielleicht jenseits der Neptunbahn haben. Gegen dieses Modell spricht, dass beide Monde den Mars nahe der Ekliptik umkreisen, jener Ebene, in der sich alle Planeten und die meisten ihrer Monde um die Sonne bewegen. Zudem sind beide Orbits fast kreisrund. Das wäre für „eingefangene“ Asteroiden ein schwer zu erklärender Zufall. Die Orbitalparameter sind gute Argumente für die dritte Theorie. Gegen sie spricht, dass die spezifische Dichte der Monde mit 1,87 Gramm pro Kubikzentimeter nicht einmal halb so groß ist wie die des Mars.

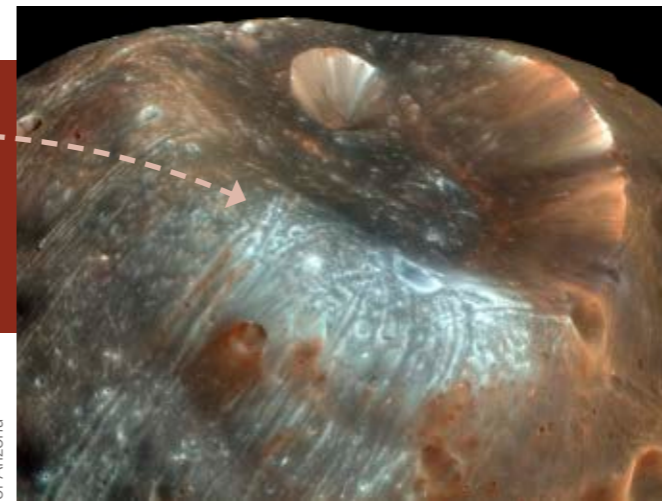
Jüngere Untersuchungen legen nahe, dass die Monde Überreste eines großen Einschlags in der Frühzeit des Mars sind, durch den auch das ausgedehnte nördliche Tiefland des Planeten entstanden ist. Der einschlagende Körper könnte bis zu 2.000 Kilometer groß gewesen sein und Billionen Tonnen heller Kruste und dunklen Mantels aus dem jungen Planeten geschlagen haben. Die Trümmer bildeten einen Ring um den Mars, woraus Phobos und Deimos hervorgingen, vielleicht sogar weitere Monde, die dem Mars allerdings verloren gingen oder wieder auf ihm einschlugen. Diese Theorie würde die relativ niedrigen und kaum elliptischen Umlaufbahnen recht gut erklären.

Immer am besten: direkt vor Ort nachschauen

Um die Frage nach dem Ursprung von Phobos und Deimos zu klären, aber auch um die Rolle kleiner Körper bei der Entwicklung der Planeten zu verstehen, hilft nur eine Raumsonde: die Geburtsstunde der Mission MMX der japanischen Weltraumorganisation JAXA. Sie wird nach den beiden Hayabusa-Missionen in den Asteroidengürtel die dritte JAXA-Mission sein, bei der Proben genommen und zur Erde gebracht werden sollen. An der Mission sind auch die amerikanische Raumfahrtagentur NASA, die europäische Weltraumorganisation ESA, die französische Raumfahrtagentur CNES und das DLR beteiligt.

So werden ab 2025 am Mars schon wieder aufregende Dinge geschehen: Die Sonde wird Phobos und Deimos aus dem Orbit beobachten. Dabei wird eine geeignete Landestelle für das Mutterschiff und den kleinen MMX-Rover gesucht. Der Rover ist ein gemeinschaftliches Projekt von CNES und DLR. Die Projektleitung für das DLR liegt beim Institut für Robotik und Mechatronik

Mars macht mal wieder mobil: dieses Mal mit dem Rover MMX auf seinem Mond Phobos.



NASA/JPL/University of Arizona

Der Krater Stickney auf Phobos ist die markanteste Struktur auf dem Marsmond. Er wurde nach Chloe Angeline Stickney Hall benannt, der Ehefrau des Entdeckers Asaph Hall.

Die markanteste Oberflächenstruktur von Phobos ist übrigens ein neun Kilometer großer Einschlagskrater, bei dessen Entstehung der Mond beinahe zerstört worden wäre. Er wurde 1972 zum ersten Mal von Mariner 9 fotografiert und dann vom Komitee für Namensgebungen der Internationalen Astronomischen Union mit dem Namen Stickney belegt. Es war eine Hommage an die hartnäckige und ihren frustrierten Ehemann Asaph Hall motivierende Chloe Angeline Stickney Hall. Stickney war ihr Mädchenname. Asaph schrieb 1878: „Ich hätte die Suche nach den Marsmonden aufgegeben, hätte mich meine Frau nicht ermutigt, weiterzusuchen.“ Welch eindrucksvolle Geschichte!

Ulrich Köhler ist Geologe am DLR-Institut für Planetenforschung und fasziniert vom Mars und seinen beiden Monden, seit er in den 1970er-Jahren die gelben National-Geographic-Hefte mit den Marsfotos der Viking-Missionen aus den USA in die Hände bekam.

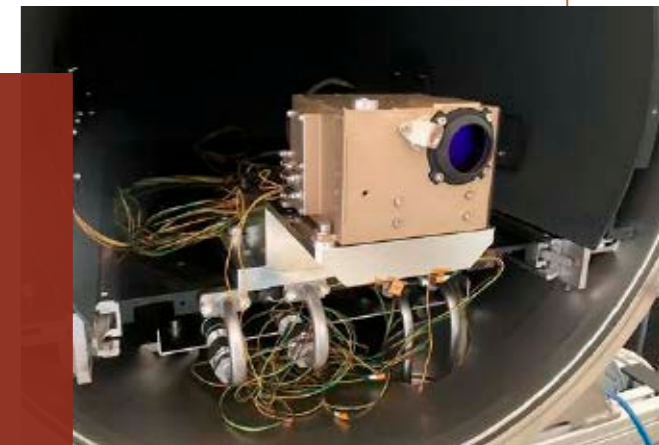
Mehr über den Rover an Bord der MMX-Mission erfahren Sie in der nächsten Ausgabe des DLRmagazins.

in Oberpfaffenhofen. Das 25 Kilogramm leichte Fahrzeug wird aus etwa 50 Metern Höhe sanft auf die Oberfläche von Phobos fallen gelassen. Dort wird es bei einer Anziehungskraft von nur einem Zweitausendstel der Erde nach mehrmaligem sanftem Abprallen zur Ruhe kommen, um sich daraufhin autonom in eine aufrechte, startbereite Lage zu manövrieren. Der Rover wird Phobos mobil erkunden, unter anderem mit einem Radiometer und einem Raman-Spektrometer, an deren Entwicklung das DLR maßgeblich beteiligt ist. Etwas später werden Proben genommen, die voraussichtlich 2029 auf der Erde ankommen sollen. Unabhängig von der Frage, wie Phobos und Deimos entstanden sind, ist es wahrscheinlich, dass auch vom Mars bei späteren Einschlägen Material auf Phobos geschleudert wurde. Die Proben des Mondes werden in jedem Fall auch Spuren des Planeten enthalten. MMX wäre dann die erste Mission mit Marsproben.



Das Radiometer miniRAD des DLR-Instituts für Planetenforschung wird die Abstrahlung der Oberfläche in sechs Wellenlängen des thermalen Infrarots messen. Damit wird die Oberflächentemperatur bestimmt, die neben den Einstrahlungsbedingungen stark von den thermischen Eigenschaften der Oberfläche abhängt. Durch die Messung der Abstrahlung lassen sich Rückschlüsse auf die Materialeigenschaften ziehen. Neben den thermischen Eigenschaften erhält man dadurch Hinweise auf die Porosität des Oberflächenmaterials. Das ermöglicht einen direkten Vergleich von Messungen an Asteroiden und Kometen sowie Asteroiden- und Meteoritenproben.

Das Raman-Spektrometer RAX (Raman spectroscopy for MMX) ist eine Entwicklung unter Führung des DLR-Instituts für Optische Sensorsysteme mit Beteiligung der JAXA (Leitung Universität Tokio) und der spanischen Raumfahrtagentur INTA. RAX wird entlang der Roverstrecke die mineralogische Zusammensetzung der Oberfläche messen. So können jene Prozesse verstanden werden, die Phobos durchlaufen haben könnte. Die Raman-Messungen auf der Phobosoberfläche werden mit Messungen anderer Rover auf dem Mars verglichen, um die verschiedenen Entstehungshypothesen zu überprüfen. Der Vergleich mit Messungen an den von MMX zur Erde zurückgebrachten Proben wird außerdem zeigen, wie repräsentativ die Proben sind.





Assistent und Wissenschaftler: LRU2 (Leightweight Rover Unit 2, links) und LRU1 bei ihrer gemeinsamen Mission auf dem Vulkan Ätna in Sizilien.

EIN TEAM FÜR ALLE FÄLLE

Auf dem Ätna wie auf dem Mond: Roboter demonstrieren Zusammenarbeit

von Katja Lenz

Die Rollen sind klar verteilt. Und jeder macht das, was er am besten kann: der Wissenschaftler, der Assistent, die Kundschafterin, der Versorger, der Höhlenforscher. Keiner ist allein, sie arbeiten im Team und unterstützen sich gegenseitig. Das gemeinsame Ziel von LRU1, LRU2, Ardea, Rodin und Scout: unbekannte Welten entdecken. Das haben die Roboter und der Lander jetzt geübt. Sie waren dazu in einer der unwirtlichsten Gegenden, die man sich in Europa aussuchen kann – am Vulkan Ätna.

Der Boden ist dunkelgrau, die porösen Lavasteinchen knirschen bei jedem Schritt, entfernt steigt Rauch auf. Der Ätna auf der italienischen Insel Sizilien ist seit 60.000 Jahren fast pausenlos aktiv. An seiner Südflanke hat er eine karge Landschaft mit Hügeln und Senken geschaffen, so weit das Auge reicht. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sehen hier Ähnlichkeiten mit dem Mond. „Die Landschaft eignet sich gut als Testumgebung“, sagt Dr. Armin Wedler vom DLR-Institut für Robotik und Mechatronik in Oberpfaffenhofen. „Die lose, grobkörnige Oberfläche und auch die erstarrten Lavaschichten sind absolut realistische Herausforderungen für Erkundungsmissionen.“ Die Mission am Ätna schließt das Projekt ARCHES (Autonomous Robotic Networks to Help Modern Societies) ab, in dem seit 2018 vernetzte robotische Systeme entwickelt wurden. Jetzt zeigen sie ihre Fähigkeiten.

Der Wissenschaftler

LRU1 (Lightweight Rover Unit 1) macht sich auf den Weg. Er hat seine vier Räder in Position gedreht und rollt zügig los. Menschen auf zwei Beinen haben erste Schwierigkeiten, Schritt zu halten, weil der Boden nachgibt und die Luft in 2.600 Metern Höhe merklich dünner wird. Menschen sehen auch nicht so gut wie LRU1, der in seinem flachen breiten Kopf sieben „Augen“ hat. Eigentlich werden Menschen hier überhaupt nicht gebraucht. LRU1 kommt selbstständig in seinem Roboter-Team klar, trifft Entscheidungen und erledigt seinen Auftrag. Für den ist allerdings ein Mensch verantwortlich. Projektleiter Armin Wedler ergänzt: „Die Roboter sind und bleiben verlängerter Arm und verlängertes Auge der Menschen.“ Diese könnten in jenem Szenario allerdings sehr weit entfernt sein: Zwischen Erde und Mond liegen rund 384.400 Kilometer. Zwischen Erde und Mars sogar mindestens 50 Millionen Kilometer.

LRU1 gilt als der Wissenschaftler. Zunächst schaut er sich um, immer auf der Suche nach interessanten Stellen. Die drei Kameras in der Kopfmitte haben ähnliche Aufgaben wie menschliche Augen. Zwei davon bilden ein Stereokamerasystem mit Graustufen, eine ist eine Farbkamera. Mit ihnen kann LRU1 dreidimensional sehen und sich selbst lokalisieren. „Eine besondere Herausforderung liegt darin, zuvor besuchte Orte in der grauen Vulkanlandschaft wiederzuerkennen, um sich an ihnen zu



Die letzten Vorbereitungen im Basecamp am Ätna – dann legt Roboter LRU1 los. In seinem Kopf befinden sich mehrere Kamerasysteme. Mit den Filterrädern ganz außen nimmt er zum Beispiel unterschiedliche Frequenzbereiche wahr.



„Sie agieren als Team, aber sind trotzdem eigenständig. Die Spezialisierung mit mehreren kleineren Systemen hat den Vorteil, dass das Gesamtteam trotzdem weiterfunktioniert, auch wenn ein Teil ausfällt.“

Peter Lehner

orientieren“, erklärt Dr. Martin Schuster vom Institut für Robotik und Mechatronik. Eine vierte Kamera hat ein Teleobjektiv für größere Entfernungen, eine Thermalkamera misst Temperaturunterschiede. Mit den beiden Kameras ganz außen kann LRU1 über Filterräder unterschiedliche Frequenzbereiche wahrnehmen. „So kann er beispielsweise Gesteinstypen voneinander unterscheiden, die für den Menschen farblich gleich aussehen“, sagt Martin Schuster. Die Filterräder sind recht groß und bescheren LRU1 die charakteristische Kopfform.

Bei seiner Arbeit ist er mit bis zu vier Kilometer pro Stunde unterwegs. Seine vier leichten Räder mit flexiblen Titanspeichen steuert er einzeln, er kann seinen Körper kippen und an Schrägen das Gleichgewicht halten. Alles, was vor Ort sofort entschieden werden muss, berechnet er mit seinem Onboard-Computer. LRU1 hat keine Arme. Auch wenn es aussieht, als würde er fröhlich winken – der schwarze Stab an seiner Vorderseite ist eine Antenne. Die Roboter sind über WLAN miteinander verbunden. „Sie agieren als Team, aber sind trotzdem eigenständig. Die Spezialisierung mit mehreren kleineren Systemen hat den Vorteil, dass das Gesamtteam trotzdem weiterfunktioniert, auch wenn ein Teil ausfällt“, sagt Peter Lehner vom Institut für Robotik und Mechatronik.



Die karge Landschaft am Ätna hat Ähnlichkeit mit der Mondoberfläche. Hier waren LRU2, Ardea, Rodin, LRU1 (von links) und Scout im Einsatz. Im Hintergrund das Basecamp des DLR, das für die Mission eingerichtet wurde.



Der Assistent LRU2 benutzt seinen Arm, um Analysen durchzuführen oder Payload-Boxen zu handhaben.



Die schwarz-weißen Markierungen sind wie Namensschilder. Die Roboter erkennen sich gegenseitig und identifizieren ihre Ladung. LRU2 trägt hier eine Box für Gesteinsproben.



Die Kundschafterin Ardea absolviert bei starkem Wind einen Testflug, ausnahmsweise gesichert an einem Haken.



Der Versorger

Und wenn sie gemeinsam eine Aufgabe abgeschlossen haben? Wenn der Akku leer ist oder die Box für die Gesteinsproben voll? Dann steht Rodin bereit. Der Lander klappt seine Sonnensegel auf, bietet Energie und Kommunikation, lagert die Boxen. „Rodin ist wie ein großer Bruder, der auf alles aufpasst. Er ist der ruhende Pol und der Mittelpunkt des Teams“, sagt Bernhard Vodermayer vom Institut für Robotik und Mechatronik. Mittelpunkt ist durchaus wörtlich zu nehmen – bei den Erkundungen orientieren sich die Roboter an Rodin, um die Verbindung zu halten. Er ist nicht nur mit seinem Team in Kontakt, sondern auch mit den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern auf der Erde beziehungsweise im Basecamp. Ein vergleichbares Modell könnte bei einer Weltraummission eingesetzt werden. Die Düse unter dem Lander würde dann das Aufsetzen auf extraterrestrischem Untergrund abbremsen. Auf den Ätna kam er noch im Container – und mit viel (menschlicher) Muskelkraft.

Der Assistent

LRU2 ist von gleicher Statur, aber mit steiferen Rädern, die ihm eine hohe Genauigkeit beim Greifen erlauben. Er hat einen Arm mit sechs Gelenken, beziehungsweise „Freiheitsgraden“. Das ist einer weniger als bei einem menschlichen Arm. Dafür können sich seine Gelenke unbegrenzt drehen. Der „Assistent“ LRU2 packt sich Instrumente oder Gesteinsproben auf den Rücken. Er entscheidet selbst, ob er dafür eine Hand, einen Greifer oder eine Schaufel nimmt. Das Werkzeug hat er stets griffbereit. „Ein Faktor bei Erkundungsmissionen ist die Fähigkeit, mit beschränkten Ressourcen umgehen zu können“, erklärt Andreas Dömel vom Institut für Robotik und Mechatronik. „Und die größte Herausforderung besteht darin, dem Roboter möglichst vielseitige Fähigkeiten mit auf die Mission zu geben. Man weiß nie genau, womit man es zu tun bekommt.“ LRU2 arbeitet deswegen mit einer Art Baukastensystem. Was er gerade braucht, holt er sich vom Lander Rodin: Batteriepakete, Payload-Boxen für Gesteinsproben, Elemente eines Antennensystems oder das LIBS-Instrument für Analysen.

oder Molekülen im Plasma kollidieren, können sie diese zum Leuchten anregen und es zeigt sich eine charakteristische Farbe“, erklärt Fabian Seel vom DLR-Institut für Optische Sensorsysteme. Mit einem Spektrometer lassen sich die Farben ablesen. Weil unterschiedliche Elemente unterschiedliche Farben im Plasma erzeugen, wissen die Forschenden anschließend, welche Elemente sich in dem Stein befinden. Im Ätna-Lavagestein wurden mit dem LIBS-Instrument zum Beispiel die Signale von Kalium, Kalzium, Natrium und Silizium gefunden. Weil die Farben der Elemente bekannt und immer gleich sind – egal ob auf Erde, Mond oder Mars – kann man mit LIBS auch fremde und entlegene Orte auf ihre elementare Zusammensetzung erkunden. Auf dem Mars werden LIBS-Instrumente schon von NASA-Rovern eingesetzt, um die lokale Geochemie und damit die Entstehungsgeschichte zu studieren. „Mit LIBS können wir bei Missionen aber auch gezielt nach Elementen suchen“, ergänzt Dr. Susanne Schröder vom Institut für Optische Sensorsysteme. Zu wissen, was wo besonders häufig vorkommt, ist wichtig, wenn es etwa um einen dauerhaften Aufenthalt von Menschen auf dem Mond

geht und Ressourcen vor Ort genutzt werden sollen. LIBS könnte in Zukunft noch viel weiter hinaus als Mond und Mars – die optische Technologie ist für jeden planetaren Körper geeignet, sogar für die Eismonde von Jupiter oder Saturn.

Alle Roboter tragen „Namensschilder“ mit kleinen schwarz-weißen Quadraten. Über diese erkennen sie sich gegenseitig und wissen genau, wo sich die anderen gerade aufhalten. Boxen mit Antennenelementen wurden am Ätna so exakt platziert, dass sie sich zu einem Teleskop zusammenschalten konnten. Das Szenario heißt LoFar (Low Frequency Array). Auch sie sind mit entsprechenden Schildern ausgestattet. LRU1 hat die Gegend analysiert, LRU2 die Boxen verteilt. „Auf der erdabgewandten Seite des Mondes könnten Teleskopeinheiten großflächig angeordnet werden. Sie können von dort den Radiobereich des elektromagnetischen Spektrums nach möglichen Anzeichen von außerirdischen Zivilisationen durchsuchen“, erklärt Dr. Emanuel Staudinger vom DLR-Institut für Kommunikation und Navigation.

Die Kundschafterin

Die Drohne Ardea ist die Schnellste im Team bei der Erforschung des Unbekannten. Sie fliegt gerne in zwei bis drei Metern Höhe, kartiert und analysiert unterwegs, ob die Strecke für die großen Roboter geeignet ist. Die Daten verarbeitet sie in Echtzeit. Wenn Ardea ihr O. K. gibt, folgt das Team. Nachfragen bei Menschen wären bei einem Einsatz etwa auf dem Mars gar nicht möglich: „Es würde viel zu lange

„Die größte Herausforderung besteht darin, dem Roboter möglichst vielseitige Fähigkeiten mit auf die Mission zu geben.“

Andreas Dömel

LIBS bedeutet Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (Laser-induzierte Plasmaspektroskopie) und ist eine sehr heiße Angelegenheit: Wenn LRU2 die LIBS-Box auf einen Stein ausrichtet, schießt der leistungsstarke, gepulste Laser ein Miniloch von einigen Mikrometern Breite und Tiefe hinein. Das Material verdampft. Dabei entsteht für den Bruchteil einer Sekunde eine kleine Menge Plasma. „Der Dampf wird ionisiert. Das heißt, die Atomkerne verlieren durch die Laserenergie ein oder mehrere Elektronen. Wenn die frei gewordenen Elektronen mit Atomen, Ionen

Es sieht aus, als würde LRU2 winken. Tatsächlich ist der schwarze Stab rechts kein Arm, sondern eine Antenne.

„Rodin ist wie ein großer Bruder, der auf alles aufpasst. Er ist der ruhende Pol und der Mittelpunkt des Teams.“

Bernhard Vodermayer

Der Lander Rodin hat alles dabei, was die Roboter brauchen. Außerdem steht er im Kontakt mit den Menschen auf der Erde beziehungsweise im Basecamp.



Der Höhlenforscher

Scout sieht aus wie ein Insekt und bewegt sich wie ein Känguru. Er hüpfert nicht sehr hoch, aber das Prinzip ist identisch: Federnde Elemente in den Beinen speichern Energie und unterstützen dann aktiv die Fortbewegung. Manche Beobachter oder Beobachterinnen am Ätna finden es „süß“, wie Scout umher „läuft“. Dr. Roy Lichtenheldt vom DLR-Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik ist für ihn verantwortlich und erklärt: „Manchmal kommt er einem vor wie ein Haustier.“ Geplant war das nicht – die technischen Möglichkeiten und die Funktionen standen bei der Entwicklung immer im Vordergrund. Es gab Vorbilder: Der dreigeteilte Körper mit sechs Beinen „ist stark von Insekten inspiriert“, sagt Roy Lichtenheldt. Die nachgiebige „Wirbelsäule“ ist eher Säugetieren nachempfunden. Wenn es gefährlich wird, ist Scout in seinem Element. Falls er stürzt und auf dem Rücken landet, dreht er sich oder läuft einfach weiter. Er klettert über Hindernisse, die bis zu 40 Zentimeter hoch sind, und schleppt bis zu sechs Kilo Ladung. Mit diesen Fähigkeiten ist Scout eigentlich ein hervorragender robotischer Höhlenforscher. Am Ätna hatte er einen anderen Spezialauftrag: Er trug bei einem Experiment einen WLAN-Repeater und positionierte sich selbstständig immer so, dass die anderen Roboter problemlos in Verbindung bleiben konnten. Ein echtes Teammitglied eben.

Katja Lenz ist Presseredakteurin im DLR.



Sechs Beine mit jeweils drei Füßen lassen Scout hüpfen. Die Füße werden vorher entsprechend ausgestattet – je nachdem, auf welchem Untergrund sich der Roboter bewegt.

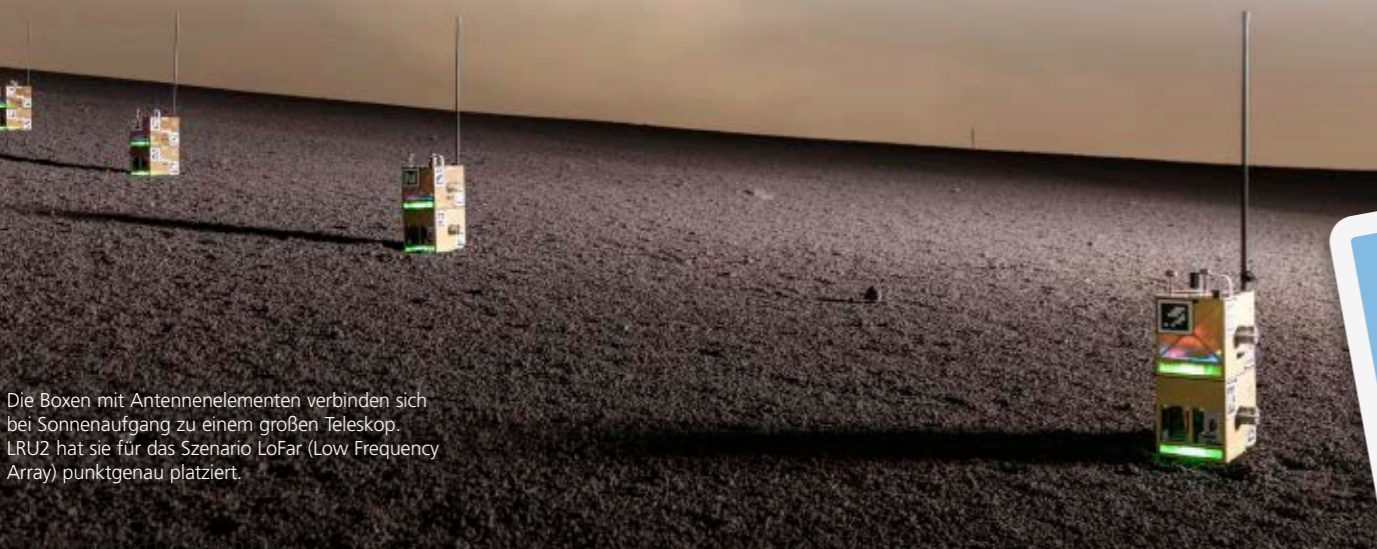
DIE ARCHES-MISSION IN KÜRZE

Im Helmholtz-Zukunftsprojekt ARCHES (Autonomous Robotic Networks to Help Modern Societies) werden seit 2018 heterogene, autonome, vernetzte robotische Systeme entwickelt. Nicht nur die Roboter sind unterschiedlich, sondern auch die Anwendungsfelder. Neben der Erkundung des Sonnensystems sind zum Beispiel die Umweltüberwachung der Ozeane und die Unterstützung bei Krisen auf der Erde möglich. Die Demomission „Space“, die im Juni und Juli 2022 auf dem Ätna stattfand, musste wegen der Corona-Pandemie mehrmals verschoben werden.

Die Mission wurde vom DLR gemeinsam mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) durchgeführt. Weitere ARCHES-Projektpartner sind das Alfred-Wegener-Institut

(AWI, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung) und das GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel. Vor fünf Jahren fand bereits die Demomission ROBEX (Robotische Exploration unter Extrembedingungen) auf dem Ätna statt. ARCHES erweitert auch die Erkenntnisse, die durch ROBEX gewonnen wurden.

Neben dem DLR-Institut für Robotik und Mechatronik sind die Institute für Systemdynamik und Regelungstechnik, für Kommunikation und Navigation sowie für Optische Sensorsysteme an ARCHES beteiligt. Die DLR-Einrichtung Raumflugbetrieb und Astronautentraining hat mit der mobilen Raketenbasis MORABA einen Kommunikationslink zwischen „Bodenstation“ und Ätna hergestellt sowie die Netzwerkinfrastruktur betrieben.



Die Boxen mit Antennenelementen verbinden sich bei Sonnenaufgang zu einem großen Teleskop. LRU2 hat sie für das Szenario LoFar (Low Frequency Array) punktgenau platziert.

FAKTEN ZU ROBOTERN, DROHNE, LANDER

DLR LIGHTWEIGHT ROVER UNIT (LRU1 UND LRU2)



LRU ist der Prototyp eines mobilen Roboters zur Exploration in unbekanntem, unwegsamem und schwer zugänglichem Gelände.

- Größe: 114 x 74 x 94 cm
- Gewicht: ca. 30 kg
- Nutzlast: 5 kg
- Geschwindigkeit: 4 km/h

DLR SCOUT ROVER



Das Überwinden von rauem Gelände ist noch immer eine herausfordernde Aufgabe für mobile Roboter. Der Scout Rover hat ein neuartiges, nachgiebiges Speichenrad und verformbare Rückenelemente, um Hindernisse zu überschreiten, die andere Rover nicht überwinden können.

- Größe: 105 x 51 x 30 cm
- Gewicht: 18 kg
- Nutzlast: > 6 kg bei 5 l Volumen
- Geschwindigkeit: 7,2 km/h

DLR LANDER RODIN



Im ARCHES-Szenario eine stationäre Einheit, die für die Energieversorgung sowie für den Datenaustausch zwischen Kontrollzentrum, Rover und Sensorboxen zuständig ist.

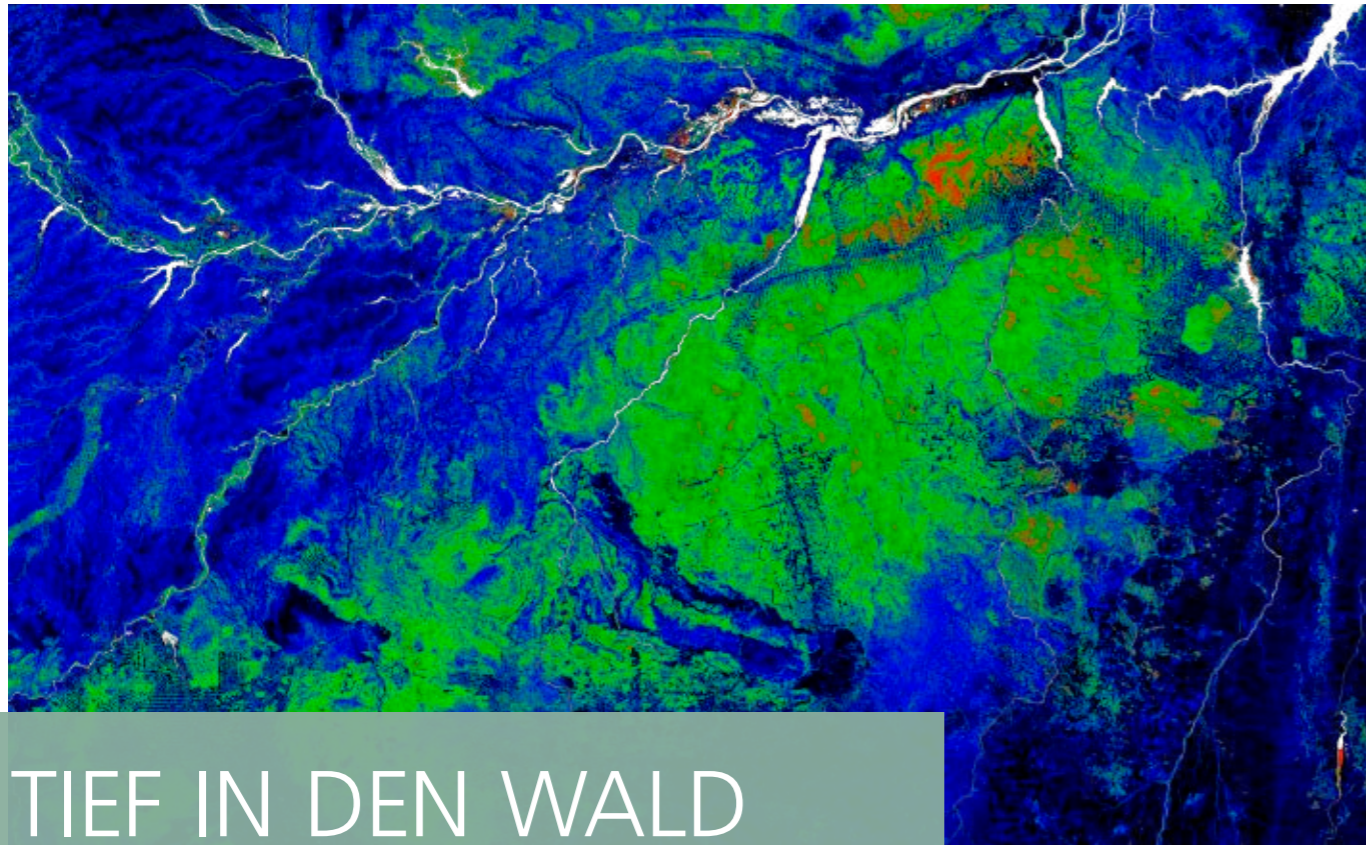
- Größe: ca. 210 x 280 x 280 cm (Boden bis Oberkante, ohne Antenne)
- Gewicht: 500 kg
- Nutzlast: bis ca. 80 kg (am Ätna)
- Geschwindigkeit: 0 km/h

DLR ARDEA



Ardea ist ein Micro Aerial Vehicle (MAV), hat vier Kameras mit Ultra-Weitwinkel-Objektiven, die in vertikaler Richtung einen Bildbereich von 240° abdecken. Damit kann Ardea zugleich den Boden und die Decke sehen, was das Navigieren und Kartieren in engen Räumen, wie beispielsweise Höhlen, deutlich vereinfacht.

- Größe: 68 x 68 x 30 cm
- Gewicht: 2,4 kg
- Nutzlast: 0,5 kg
- Geschwindigkeit: 4 km/h



TIEF IN DEN WALD GESCHAUT

Eine Kombination von Fernerkundungsdaten bringt neue Erkenntnisse zur Struktur von Wäldern

von Dr. Konstantinos Papathanassiou

Aus den TanDEM-X-Messungen berechneten die DLR-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler die Dichte dieses Waldgebiets über dem Amazonas. Die Karte hat eine Auflösung von 100 Metern.

Wälder sind gigantische Kohlenstoffspeicher: Die Hälfte des auf der Erde gebundenen Kohlenstoffs ist in ihnen gespeichert. Außerdem steuern sie den Wasser- und Kohlendioxidtransport zwischen dem Boden und der Atmosphäre. Dementsprechend wichtig ist ihre Rolle bei der Eindämmung des Klimawandels. Doch die Veränderung von Temperatur und Niederschlag und die Verschärfung von Wetterextremen stellen eine große Gefahr für den Wald und seine Funktion dar. Deshalb ist es wichtig zu wissen, in welchem Zustand sich die Wälder der Erde befinden und wie sich ihre Struktur verändert. Um dies zu erforschen, kombinierten DLR-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler Daten von Fernerkundungsmissionen. Aber das ist noch nicht alles: Eine zukünftige Satellitenmission könnte die Waldstruktur und deren Veränderung über die Zeit in bisher nicht dagewesener Qualität darstellen.

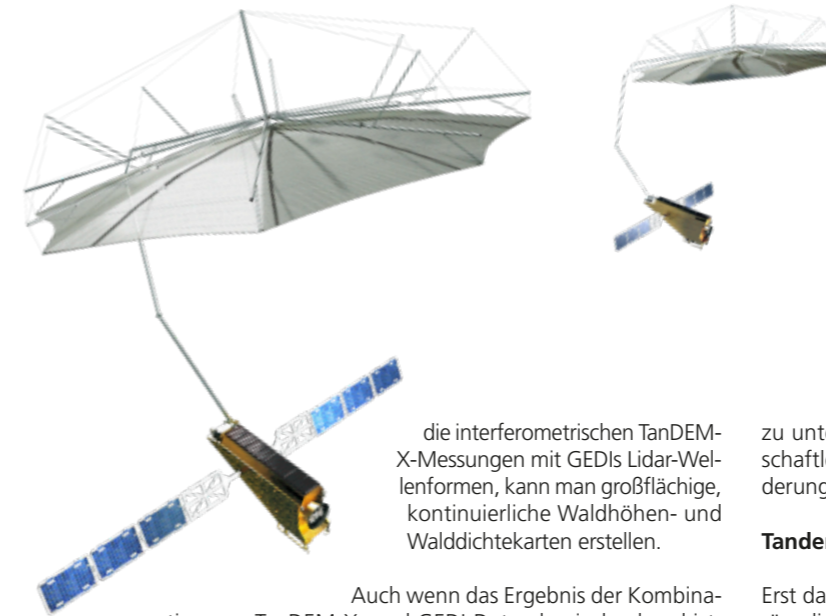
Die Struktur von Wäldern mit Satelliten zu vermessen, ist eine Herausforderung, denn sie bestehen aus komplexen 3D-Mustern. Diese sind das Ergebnis von natürlichen, klimatischen und anthropogenen Prozessen. Dementsprechend können die allermeisten Fernerkundungsdaten keine zuverlässigen Aussagen über wichtige Parameter wie Baumarten, Bestandshöhe oder Biomasse geben.

Zwillingssatelliten charakterisieren die Wälder der Welt

Die erste Mission, die Elemente der vertikalen Waldstruktur erfassen konnte, war die deutsche TanDEM-X-Mission. Sie besteht aus zwei in Formation fliegenden X-Band-SAR-Satelliten und kartiert seit 2010 die Erde. TanDEM-X nutzt interferometrische und tomografische SAR-Messungen („Synthetic Aperture Radar“, Radar mit synthetischer Apertur). Mit ihren Daten erhielten die Forscherinnen und Forscher erstmals einen Eindruck von dem Potenzial, das die 3D-Waldstruktur zur Charakterisierung des Waldes bietet.

Wenn Radarwellen, also Mikrowellen, in den Wald eindringen, kommt es zu einer komplexen Wechselwirkung. Deshalb entwickelten die DLR-Forscherinnen und -Forscher ein physikalisches Modell, das diese komplizierte Wechselwirkung berechenbar macht. Mithilfe des Modells können sie relevante Waldstrukturparameter aus den Radarmessungen bestimmen, selbst wenn diese nicht direkt gemessen werden können. Im Fall von TanDEM-X ist jedoch die Anzahl der Radarmessungen nicht ausreichend, da weniger Informationen vorliegen, als zur Bestimmung der Waldstrukturparameter des Modells nötig sind.

Um dieses Problem zu umgehen, nutzten die Forschenden die Messungen der GEDI-Mission. GEDI steht für Global Ecosystem Dynamics Investigation und ist eine Mission der amerikanischen Weltraumagentur NASA. Sie besteht aus einem Wellenform-Lidar an Bord der Internationalen Raumstation ISS. GEDI ging Ende 2018 in Betrieb und lieferte bis heute mehr als zehn Milliarden Lidar-Wellenformen entlang seiner festgelegten Bodenspur (zwischen 51,6° N und 51,6° S). Kombiniert man



die interferometrischen TanDEM-X-Messungen mit GEDIs Lidar-Wellenformen, kann man großflächige, kontinuierliche Waldhöhen- und Walddichtekarten erstellen.

Auch wenn das Ergebnis der Kombination von TanDEM-X- und GEDI-Daten beeindruckend ist, handelt es sich um ein Demonstrationsprodukt, das das Potenzial interferometrischer und tomografischer SAR-Konfigurationen für die Kartierung der 3D-Waldstruktur lediglich andeutet. Weil die X-Band-Messungen der TanDEM-Satelliten nicht unbegrenzt tief in das Blattwerk der Bäume vordringen können, ist die Bestimmung von Waldhöhen in dichten Waldbeständen oft ungenau. Darüber hinaus hat TanDEM-X nur eine begrenzte Aufnahmekapazität, weshalb mit den Daten der Zwillingssatelliten keine Zeitserien erstellt werden können. Erschwerend kommt hinzu, dass die begrenzte räumliche Abdeckung der GEDI-Daten Messungen nur an wenigen Punkten und

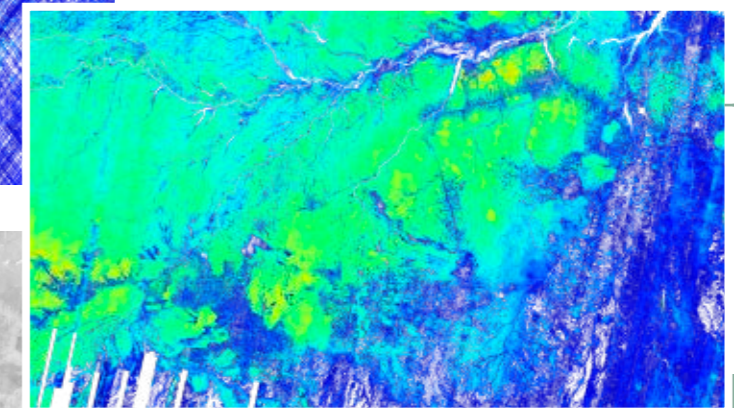
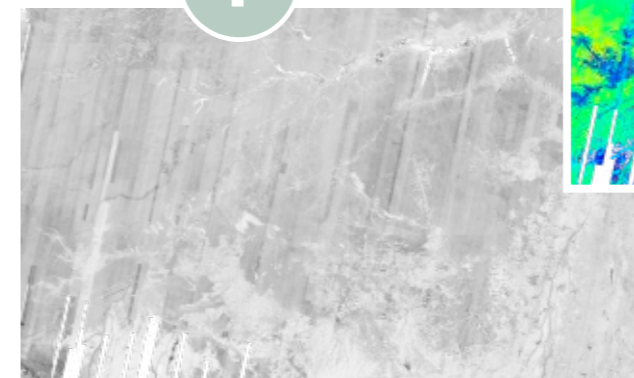
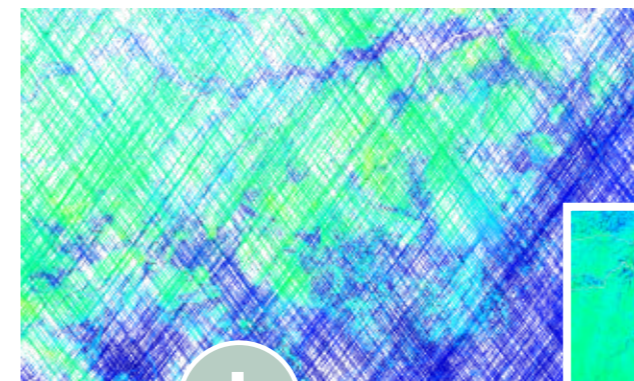
Die Zwillingssatelliten der Mission Tandem-L könnten im Wochenrhythmus eine aktuelle Abbildung der gesamten Landmasse der Erde in 3D liefern und damit die dynamischen Prozesse sichtbar machen, die auf der Erdoberfläche ablaufen.

zu unterschiedlichen Zeiten erlaubt. Dies alles schränkt die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ein, wenn sie die zeitliche Veränderung der Waldstruktur messen möchten.

Tandem-L könnte tief ins Innere von Wäldern blicken

Erst das geplante Satellitenduo Tandem-L könnte in der Lage sein, die räumliche und zeitliche Variation der 3D-Waldstruktur mit einer noch nie dagewesenen Genauigkeit und Auflösung zu messen. Tandem-L ist ein Vorschlag des DLR für eine Radarmission und wäre die weltweit erste Mission, die mit der innovativen Technik der Tomografie global 3D-Strukturmessungen von Wäldern durchführen kann. Grundlage der 3D-Abbildung der Waldstruktur ist die vom DLR entwickelte Technik der polarimetrischen SAR-Tomografie. Diese kann den Zustand des globalen Walds und seine Veränderung erfassen und dokumentieren. Auf Basis der rekonstruierten 3D-Waldstruktur können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler dann ökologische Wachstumsmodelle erstellen, die Aussagen über die Biomasse und Produktivität der Wälder erlauben. Darüber hinaus könnte Tandem-L moderne Aspekte der Waldökologie und Klimamodellierung – weit über Biomasse und Produktivität hinaus – direkt mit Fernerkundungsmessungen verbinden und dadurch die globale Wald- und Klimaforschung nachhaltig verändern.

Dr. Konstantinos Papathanassiou arbeitet am DLR-Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme in der Abteilung Radarkonzepte.



Die Karte rechts ist eine Kombination von TanDEM-X- und GEDI-Daten. Sie zeigt die Waldhöhen mit einer räumlichen Auflösung von 25 Metern. Links oben sind GEDI-Waldhöhenmessungen mit insgesamt 60 Millionen Messungen mit einer räumlichen Auflösung von 25 Metern zu sehen. Da GEDI jedoch kein kontinuierlich abbildendes Instrument ist, entstehen große Messlücken zwischen seinen Bodenspuren und über bewölkten Gebieten. Darunter ist die TanDEM-X-Messung des Amazonaswaldgebiets abgebildet. Diese Karte wurde aus 12.000 TanDEM-X-Aufnahmen zusammengesetzt.

LICHTSPIEL

Für diese Aufnahme aus dem QUARZ-Zentrum des DLR in Köln war eine besondere Ausleuchtung nötig, die das Licht auf den verspiegelten Flächen eines Teststands für Receiverrohre reflektieren ließ. Solche Rohre sind eine zentrale Komponente der Solarkollektoren in einem solarthermischen Parabolrinnenkraftwerk. Seine Spiegel bündeln das Sonnenlicht auf ein in der Brennlinie montiertes Rohr, das Receiverrohr, und erzeugen so hohe Temperaturen. Diese nutzt das Kraftwerk, um mittels einer Turbine Strom zu erzeugen. Die Receiverrohre eines typischen Kraftwerks in Spanien mit einer elektrischen Leistung von 50 Megawatt haben eine Gesamtlänge von rund 90 Kilometern. Je besser sie das Sonnenlicht absorbieren und in Wärme umwandeln, desto höher sind die Erträge des Solarkraftwerks. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am DLR-Institut für Solarforschung haben innovative Messverfahren für Spiegel und Receiver von Solarkraftwerken entwickelt. Im gezeigten OptiRec-Prüfstand des QUARZ-Zentrums werden vier Meter lange Receiverrohre als Ganzes mit künstlichem Sonnenlicht bestrahlt. So können ihre optische Qualität und Leistung präzise bestimmt und verglichen werden. Dies sind entscheidende Informationen für Investitionen in Solarkraftwerke. Die International Electrotechnical Commission IEC hat die vom DLR gemeinsam mit Industrieunternehmen entwickelten Messmethoden als internationalen Standard anerkannt und herausgegeben.



HOTSPOT NORDPOL?

Die Arktis erwärmt sich schneller als der Rest der Welt – ein Forschungsteam untersucht, warum das so ist

von Andreas Ellmerer



Der vom Menschen verursachte Klimawandel bedroht besonders empfindliche Ökosysteme, wie das der Arktis. Hier erwärmt sich die Erdoberfläche fast dreimal so stark wie im globalen Mittel. Die Gründe dieser sogenannten arktischen Verstärkung sind bislang noch nicht bekannt. Ein internationales Forschungsteam war mit fünf Flugzeugen in und über den arktischen Wolken unterwegs, um Daten zu sammeln, die diese Frage beantworten sollen.

In Kiruna, der nördlichsten Stadt Schwedens, sind die Sommer kurz und kühl und die Winter lang, extrem kalt und schneereich. Touristinnen und Touristen zieht es dort hin wegen der unberührten Natur, Schlittenhundetouren oder Nordlichtern. Forscherinnen und Forscher kommen hierher, um Höhenforschungsraketen oder -ballons zu starten, aber auch, um den Klimawandel in der Arktis zu untersuchen. Während der Kampagne HALO-(AC)³ startete das vom DLR betriebene Forschungsflugzeug HALO von hier aus zu 17 rund neunstündigen Flügen in der Arktis, vollgepackt mit modernster Messtechnik. Begleitet wurde es von einem französischen und einem englischen Forschungsflugzeug, die auch in Kiruna stationiert waren, sowie von den beiden Polarfliegern des Alfred-Wegener-Instituts (AWI), die nahe

des Nordpols von Spitzbergen aus abhoben. Zusammen untersuchten die Flieger die arktische Atmosphäre auf ihre Beschaffenheit. Die Forschenden vereint das Ziel, das arktische Klima und seine besonders starke Erwärmung besser zu verstehen.

Der arktischen Verstärkung auf der Spur

Ein wichtiges Phänomen, um die dortigen Veränderungen zu beschreiben, ist die arktische Verstärkung. Sie bezeichnet den im Vergleich zum globalen Mittel überdurchschnittlichen Temperaturanstieg in der Region. Zum Vergleich: Weltweit erwärmte sich das Klima seit 1971 um circa ein Grad Celsius. In der Arktis liegt dieser Anstieg aktuell bereits bei etwa drei Grad Celsius. Und es ist möglich, dass sich dieses Phänomen aufgrund von Rückkopplungseffekten weiter verstärkt. Die Veränderung des Temperaturgradienten zwischen mittleren Breiten und der Arktis kann dazu führen, dass vermehrt warme Luftmassen aus mittleren Breiten Richtung Nordpol strömen und kalte hinaus.

Forschungsflieger Polar 6 des Alfred-Wegener-Instituts

Dieser Zustrom von warmen Luftmassen würde wiederum das Abschmelzen des Meereises beschleunigen. Der dadurch offene dunkle Ozean kann Wärmeenergie besser absorbieren und speichern als eine weiße Eisoberfläche, welche solare Strahlung reflektiert. Somit würde das weitere Abschmelzen des Meereises beschleunigt werden und die Erwärmung der Arktis weiter verstärkt.

Schieben sich weiße reflektierende Wolken über den Ozean, so verändert sich das Bild, denn sie haben einen großen Einfluss auf den atmosphärischen Strahlungshaushalt. Sie wirken über dem offenen Ozean oder dem Meereis in unterschiedlicher Weise. Unter anderem diese Effekte wollten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit den Flugzeugmessungen untersuchen. „Es ist ein Privileg, dieses einzigartige Stück Erde sehen und erleben zu dürfen. Seine Erhaltung liegt uns sehr am Herzen“, sagt Prof. Dr. Christiane Voigt. Die Wolkenphysikerin leitete das DLR-Team vom Institut für Physik der Atmosphäre auf Spitzbergen.

Vielfältige Messtechnik

„Mit unserem Forschungsflugzeug HALO können wir hoch über den Wolken fliegen. Von dort aus vermessen wir diese und verfolgen die Bewegung der Warmluftmassen“, erläutert Dr. Silke Groß vom DLR-Institut



„Es ist ein Privileg, dieses einzigartige Stück Erde sehen und erleben zu dürfen. Seine Erhaltung liegt uns sehr am Herzen“

Christiane Voigt



Vor dem Start muss am Flughafen von Kiruna die Bahn erst einmal vom Schnee befreit werden.



HALO wird Richtung Startbahn gezogen.

für Physik der Atmosphäre. HALO steht für High Altitude and Long Range Research Aircraft. Mit einer Reichweite von über 8.000 Kilometern und einer maximalen Flughöhe von 15 Kilometern ist der Flieger perfekt geeignet für die arktischen Touren. Ein modernes Verkehrsflugzeug wie der Airbus A320neo erreicht eine maximale Flughöhe von knapp 12 Kilometern bei einer Reichweite von 3.200 Kilometern.

Während der HALO-Kampagne kamen vor allem Fernerkundungsmessinstrumente wie Radar und Lidar zum Einsatz. Mit ihnen untersuchten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, welche Arten von Wolken sich über dem kalten Arktismeer bilden, wenn dort Warmlufteinschübe eintreffen. Unterwegs warf das Team an Bord von HALO zahlreiche Messsonden aus großen Höhen ab. Diese sogenannten Dropsonden erfassten während des freien Falls Temperatur, Feuchte, Wind und Druck. Wind und Druck wurden auch von Sonden gemessen, die am Flugzeug angebracht waren. Die Daten lieferten ein gutes Bild von der meteorologischen Situation vor Ort.

Mit den Polarfliegern auf Spitzbergen

Auf Spitzbergen waren die DLR-Forschenden mit ihren Wolkensonden auf dem Polarflieger P5 des AWI direkt in niedrigen Wolken unterwegs. Im Sägezahnmuster ging es im Tiefflug unterhalb von 600 Metern Flughöhe durch kalte Grenzschichtwolken. Mit hochauflösenden Wolkeninstrumenten untersuchte das Team den Einfluss von Erdoberfläche,



Das DLR-Forschungsflugzeug HALO



Video zur Mission HALO-(AC)³



Das DLR-Forschungsflugzeug HALO beim Start vom Flughafen Kiruna



Über diese Rinne werden die Dropsonden aus dem Forschungsflugzeug geworfen.

Meereis, durchbrochenem Meereis oder von dem offenem Ozean auf die Wolkenbildung, ihre Beschaffenheit, die Partikelgrößenverteilung und die Partikelform. „Erste Ergebnisse von HALO-(AC)³ und den Vorgängerkampagnen MOSAIC und AFLUX zeigen, dass die tiefen Wolken im Frühling über dem Ozean einen höheren Wassergehalt sowie größere Partikeldurchmesser haben als über dem Meereis“, so Christiane Voigt. Die weißen Wolken über dem Eis sind vom Satelliten aus kaum von der hellen Eisfläche zu unterscheiden. Über dem dunklen Ozean hingegen verändern tief hängende Eiswolken den Strahlungshaushalt deutlich mehr. Zudem interessierten die Forschenden die unterschiedlichen Wolkeneigenschaften in den Warmluftströmungen oder in Kaltluftausbrüchen. Letztere führen zu spezifischen kammförmigen linienhaften Wolkenmustern, die sich nach Überströmung der Meereiskante in der kalten Luft über dem Ozean bilden. Dabei sind die Flüge in der turbulenten Grenzschicht und in Wolken kein einfaches Unterfangen. „Es ist superspannend, in 60 Meter Höhe über dem Schelfeis zu fliegen. Die Polarflieger sind sehr gut geeignet für diese Flugmanöver und das AWI hat eine langjährige Expertise in der Polarfliegerei“, ergänzt die DLR-Forscherin. Weil es keinen Hangar gibt, konnte HALO im Winter nicht auf Spitzbergen stationiert werden, die Polarflieger hingegen bleiben auch bei Eiskälte auf dem Vorfeld.

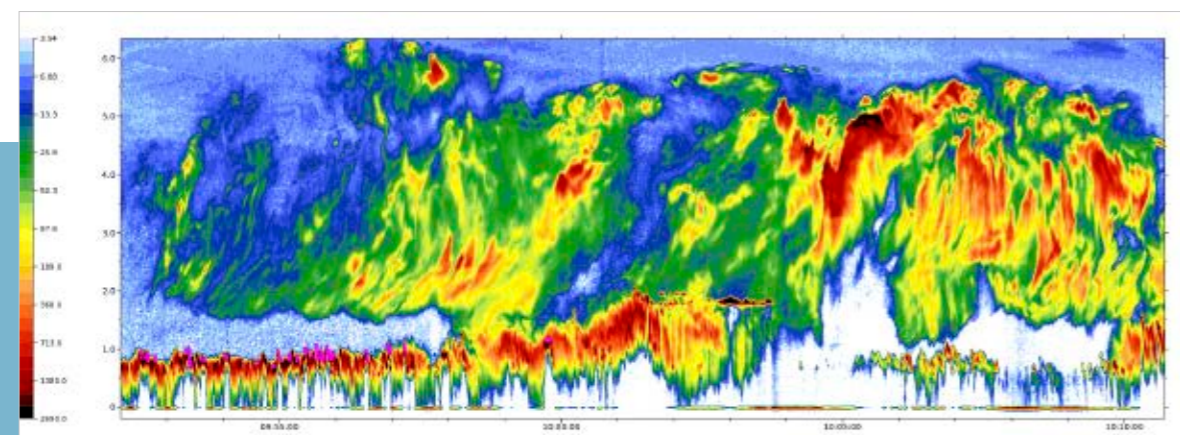
Um Daten zu den Strahlungseinflüssen hoch über den Wolken zu sammeln, wurde der Polarflieger P6 mit Fernerkundungsinstrumenten ausgestattet und führte koordiniert direkt oberhalb der P5 Messflüge durch. Bei besonders interessanten Situationen kamen auch die Forschungsflugzeuge HALO, FAAM und ATR zum Einsatz, um gemeinsam mit den Polarfliegern P5 und P6 die Veränderung der atmosphärischen Strahlungsflüsse in der Arktis, den besonders starken Temperaturanstieg und den Einfluss von Wolken zu untersuchen.

Kalte, komplizierte Forschungsobjekte

Hohe Eiswolken, sogenannte Zirruswolken, sind der häufigste Wolkentyp in der Arktis. Sie beeinflussen das globale Klima immens. Im Allgemeinen haben Zirruswolken eine wärmende Wirkung, da sie die Wärmestrahlung wieder zurück zur Erde reflektieren. Weil sie so kalt sind, geben sie selbst aber wenig Wärme in den Weltraum ab. Gleichzeitig reflektieren sie die Sonnenstrahlung. „Das Zusammenspiel der unterschiedlichen Effekte macht es unglaublich kompliziert, diesen Wolkentypus zu untersuchen“, sagt die DLR-Atmosphärenphysikerin Silke Groß. Hinzu kommt, dass sich Erdatmosphäre über Eis und über Wasser in der Temperatur unterscheidet. Außerdem ist die Reflexion der solaren



Das DLR-Team in Spitzbergen mit Prof. Dr. Christiane Voigt in der Mitte



Lidarmessungen bei einer Wellenlänge von 532 Nanometern. Sie zeigen die 2D-Wolkenstruktur unterhalb des Forschungsflugzeugs. Wolkenfreie Bereiche sind in Hellblau und Weiß dargestellt. Alles ab Dunkelblau zeigt die Wolken entlang des Flugpfads, wobei die Intensität des zurückgestreuten Lichts von Dunkelblau nach Dunkelrot zunimmt. Die Darstellung verdeutlicht die komplexe Struktur und das Zusammenspiel von tiefen Wolken über dem offenen Ozean und von darüberliegenden Eiswolken. Die tiefen Wolken (Höhe bis ca. 2 km) sind zu Beginn des Flugwegs klar von den Eiswolken (Unterkante bei ca. 2,5 km) getrennt. Im Verlauf des Flugs nimmt allerdings die Wolkenoberkante der tiefen Bewölkung zu und sie sind dann direkt mit den darüberliegenden Eiswolken verbunden.

Strahlung vom Sonnenstand abhängig – je nachdem, ob gerade Polarnacht oder Polartag ist – und die Eigenschaften der Wolken, wie Größe, Form oder die Anzahl der Eiskristalle hängen wiederum von äußeren Bedingungen wie Temperatur oder Feuchtigkeit ab. All das beeinflusst, wie Zirren auf die solare und terrestrische Strahlung reagieren und damit wiederum den Wärmehaushalt der Erde.

Aktuell sind die Forschenden dabei, die Daten der Kampagne auszuwerten. „Die ersten Ergebnisse weisen darauf hin, dass sich die Verteilung der Feuchte in arktischen Zirren von denen in mittleren Breiten unterscheidet“, so Silke Groß. Die relative Feuchte ist ein wichtiger Faktor für die Wolkenbildung. Die Forschenden gehen davon aus, dass sie auch auf die Mikrophysik und den Strahlungshaushalt der Wolken einwirkt. Wenn sich also der Zufluss feuchter, warmer Luft in die Arktis erhöht, könnte das die Strahlungswirkung der Region beeinflussen. „In welche Richtung sich die Klimaerwärmung verändern wird, möchten wir mithilfe der Kampagnendaten untersuchen“, ergänzt Groß.

Wettersimulation als Basis für Flüge

Als Basis für die Flugplanung dienten Wettersimulationen der Universität zu Köln und der Ludwig-Maximilians-Universität München.

DATEN UND FAKTEN ZU HALO-(AC)³

Zurückgelegte Flugstrecke	ca. 107.700 km
Messflüge	17
Flugzeit	ca. 140 Std.
Abgeworfene Dropsonden	347
Gesendete Slack-Nachrichten	23.163

„Dass wir die Kampagne überhaupt so erfolgreich durchführen konnten, hatte sicherlich auch mit Glück und Mut zum Risiko zu tun, denn kleinräumige Wetterphänomene detailliert vorherzusehen ist alles andere als trivial.“

Manfred Wendisch

Diese sagen mithilfe von Daten des Europäischen Wetterdienst – wie Temperatur und Luftdruck – präzise vorher, wann sich in welchen Höhen Wolken bilden werden. Diese Gebiete flog HALO zusammen mit den Polarfliegern ab und überprüfte, wie genau die Simulationen die realen Entwicklungen vorhergesagt hatten. Auf diese Weise können moderne Wetter- und Klimamodelle verbessert werden. Diese Aufgabe wird die Forschenden die nächsten Jahre beschäftigen. „Dass wir die Kampagne überhaupt so erfolgreich durchführen konnten, hatte sicherlich auch mit Glück und Mut zum Risiko zu tun, denn kleinräumige Wetterphänomene detailliert vorherzusehen ist alles andere als trivial“, sagt Projektleiter Prof. Dr. Manfred Wendisch von der Universität Leipzig.

Ein weiterer Punkt, der für den Projektleiter viel mit dem Erfolg der Mission zu tun hat, ist die Zusammensetzung des Teams: Etwa 20 Doktorandinnen und Doktoranden arbeiteten an dem Projekt. „Die jungen Leute kommen auf Ideen, die einem selbst gar nicht einfallen würden. Davon profitieren wir alle und ich bin froh, dass sie dabei waren. Die Mischung macht's einfach!“, ergänzt Wendisch.

Andreas Ellmerer ist Redakteur in der Presseabteilung des DLR.



Prof. Dr. Manfred Wendisch von der Universität Leipzig, Projektleiter von HALO-(AC)³



In diesem Simulator erforscht das DLR das Remote-Tower-Konzept.

VON WEGEN ABGELEGEN

Fernüberwachung von Flughäfen – eine Erfolgsgeschichte aus dem DLR

von Michael Drews und Julia Heil

Vom Tower aus kontrollieren Lotsinnen und Lotsen die Flugzeugbewegungen. Hoch über dem Rollfeld sitzend haben sie alles im Blick – fast alles, denn es gibt Bereiche, die sie selbst von dort aus nicht einsehen können. Deshalb werden gerade größere Flughäfen heute mithilfe von Sensoren überwacht. Das Konzept „Remote Tower“ geht noch weiter: Kameras liefern Videobilder, die die Sicht aus dem Towerfenster ersetzen. Diese müssen nicht zwangsweise dort angezeigt werden, wo sie aufgenommen wurden, sodass Flughäfen auch aus der Ferne kontrolliert werden können. In einem sogenannten Remote Tower Center können sogar die Sensordaten von mehreren Flughäfen zusammenlaufen. Das kann die Flugsicherung viel effizienter und flexibler machen. 2015 wurde in Schweden das erste Remote Tower Center eröffnet. Seit 2018 werden auch in Leipzig Flughäfen von Weitem überwacht. Und übernächstes Jahr soll ein Center in Braunschweig eröffnen, also in unmittelbarer Nähe des Ortes, wo das Konzept vor 20 Jahren seinen Ursprung hatte: beim DLR-Institut für Flugführung.



Dieser Prototyp eines Remote-Tower-Arbeitsplatzes von 2007 wurde am DLR-Institut für Flugführung entwickelt.

Den Anfang nahm Remote Tower im Jahr 2001. Damals reichte ein Team vom Institut für Flugführung die Idee des abgelegenen oder „virtuellen“ Turms (Virtual Tower), von dem aus die Flugsicherung an einem Flughafen betrieben werden kann, bei einem internen Wettbewerb des DLR ein. Das Konzept stützte sich auf Arbeiten des NASA Ames Research Centers, die bereits den Einsatz von Virtual- und Augmented-Reality-Anwendungen für den Flugverkehr untersucht hatten. Die damals visionäre Idee gewann den Wettbewerb und wurde prämiert. Also machte sich das Team daran, einen ersten Prototyp zu entwickeln, der zeigen sollte, dass das Konzept auch in der Realität funktionieren kann. Ab 2005 wurde dieser Prototyp am Flughafen Braunschweig-Wolfsburg getestet. Zur gleichen Zeit entstand am DLR-Institut die weltweit erste Remote-Tower-Simulation in Form eines digitalen 180-Grad-Livevideo-Panoramas. Es folgten mehrere nationale und internationale Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, auf die hin zahlreiche Flugsicherungsorganisationen, etwa die Schwedische Zivilluftfahrtbehörde (LFV) und die DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, ihr Interesse bekundeten.

Beim Testaufbau des DFS Remote Tower Centers Leipzig mit drei Flughäfen wurde untersucht, wie Lotsinnen und Lotsen mit der Technik zurechtkommen.



Eine Idee, die funktioniert

2014 konnte das DLR die Technologie in die Industrie überführen. Dabei verzeichnete das Team nicht nur Fortschritte bei der Technik: Es entwickelte auch Methoden, um die Interaktion der Lotsinnen und Lotsen mit der neuen Technik zu untersuchen und zu verbessern. Im Jahr 2015 nahm schließlich der erste Remote Tower in Sundsvall (Schweden) seinen Betrieb auf. Seitdem wird von dort die Flugsicherung für den Flughafen Örnköldsvik betrieben. „Dieser Erfolg ließ uns weiterdenken: Wenn wir EINEN Flughafen von der Ferne aus steuern können, dann sollte es auch mit mehreren möglich sein“, sagt Jörn Jakobi aus der Abteilung Systemergonomie des DLR-Instituts für Flugführung. Dies war die Geburtsstunde des Multiple-Remote-Tower-Konzepts, dessen Kerngedanke es ist, dass ein Lotse oder eine Lotsin mehrere Flughäfen gleichzeitig überwacht. Dies soll auch in dem neuen Remote Tower Center (RTC Niedersachsen) in Braunschweig langfristig umgesetzt werden, das die DFS Aviation Services GmbH (DAS) aufbaut und das 2024 in Betrieb gehen soll. Dazu werden DAS und DLR in einem angeschlossenen Forschungscluster gemeinsam an der Weiterentwicklung des Konzepts arbeiten. „Aber wir

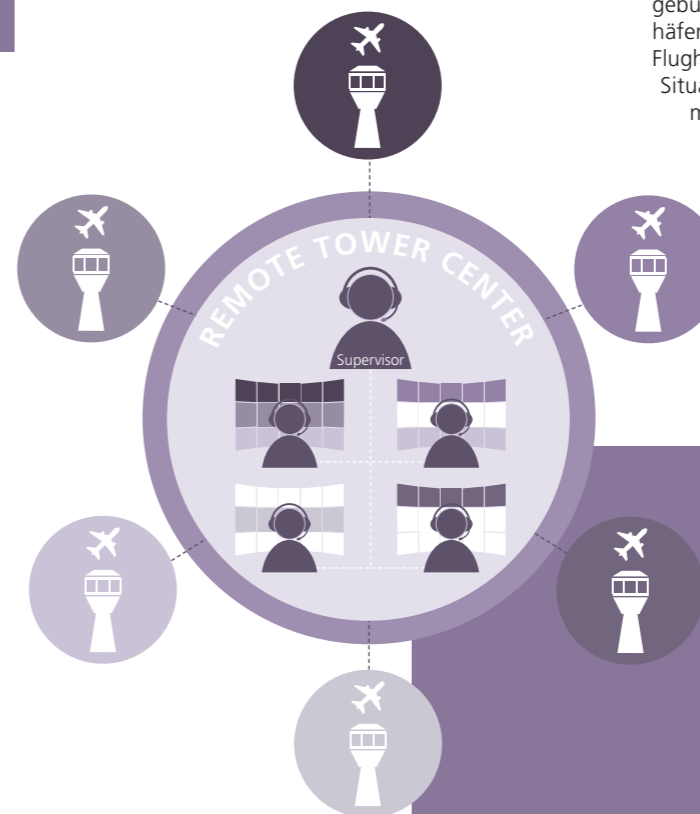
fangen natürlich erst einmal damit an, dass ein Lotse oder eine Lotsin an maximal einem Flughafen arbeitet“, sagt Jörn Jakobi. Im nächsten Schritt werden verkehrsarme Flughäfen versuchsweise zusammenschaltet. So können die Lotsinnen und Lotsen erst einmal Erfahrung mit der neuen Technik sammeln und sich auf die neue Situation einstellen.

Panoramasicht trotz Distanz

Damals wie heute bildet das hochauflösende Videopanorama das Herzstück des Remote Towers. Hier sitzen die Lotsinnen und Lotsen und überwachen die verschiedenen Teile des Flughafens. Vor Ort erzeugen mehrere, in einer Reihe installierte Kameras das Panorama. Zusätzlich gibt es neig- und schwenkbare Zoomkameras, die jedes Detail im Blick haben.



Um verschiedene Szenarien zu untersuchen, steht am DLR-Institut ein Remote-Tower-Labor, das diese Arbeitsumgebung realitätsnah darstellt. „Wir können große internationale Flughäfen mit mehreren Lotsenarbeitsplätzen, aber genauso gut kleinere Flughäfen oder Flugplätze simulieren. Außerdem können wir kritische Situationen herbeiführen wie ein brennendes Triebwerk, Probleme mit dem Fahrwerk oder Abweichungen von Freigaben. Dann testen wir, ob die Lotsin oder der Lotse die kritische Situation bemerkt und ob und wie sie gelöst wird“, sagt Jakobi. Für das RTC Niedersachsen wird zusätzlich der „Zwilling“ einer realen Arbeitsposition im DLR aufgebaut und mit allen relevanten Daten des Flughafengeschehens gefüttert. So können neue Techniken und Verfahren parallel zum echten Betrieb erforscht werden.



In einem Remote Tower Center laufen die Sensordaten von mehreren Flughäfen und Flugplätzen zusammen. Im Center sitzt ein Pool von Lotsinnen und Lotsen, die die Flugsicherung übernehmen. Im Single-Remote-Tower-Konzept kontrolliert eine Person einen Flughafen, beim Multiple Remote Tower kann eine Person auch mehrere Flughäfen überwachen. Ein Supervisor oder eine Supervisorin prüft und verteilt die Arbeitslast.



© DLR



iStock/narvikk

Das Panorama ermöglicht einen direkten Blick auf den Flughafen.

„Wenn sich kleine Flughäfen in einem RTC zusammenschließen, können sie Ressourcen sparen und trotzdem qualifiziertere Flugsicherungsdienste kostengünstig anbieten.“

Jörn Jakobi



© DLR

Unterstützt durch neue Tools hat der Supervisor die Arbeitslast der Lotsen im Blick.

Sicherheit steht an erster Stelle

Bevor Neuerungen im Livebetrieb getestet werden, werden umfangreiche Simulatorversuche durchgeführt. Dabei bearbeiten verschiedene Lotsinnen und Lotsen nacheinander im Simulator dasselbe Verkehrsszenario – abwechselnd mit der alten und mit der neuen Technik. Dabei schauen sich die Forschenden an, ob die Arbeitsbelastung gestiegen oder gesunken ist, aber auch, ob die Teilnehmenden die Situation gut erfasst haben, in der sie sich befinden. Sie werden befragt, ob sie die Entwicklung von Verkehrssituationen vorhersagen können und ob sie Werkzeuge haben, um kritische Situationen bewältigen zu können. „Wir müssen gewährleisten, dass das neue System einen Mehrwert schafft, also entweder effizienter oder sicherer ist, bevor wir überhaupt an eine Markteinführung denken. Keinesfalls darf es weniger sicher sein als das ursprüngliche System“, sagt Jörn Jakobi. Der Psychologe betreut das Thema Remote Tower als Projektleiter. Auch die Akzeptanz

führt sie allerdings zu Nachlässigkeiten und Fehlern. Aber auch eine Unterforderung kann fatale Folgen haben. „Wenn jemand nur beobachtet und wenig Operatives leisten muss, dann ist die Person nicht vorbereitet, wenn etwas Kritisches passiert und kann nicht angemessen reagieren“, beschreibt der DLR-Psychologe die Problematik.

Normalerweise arbeiten Lotsinnen und Lotsen nach dem Vier-Augen-Prinzip, es sind also immer zwei Personen im Einsatz, um sich gegenseitig zu unterstützen. In einem Remote Tower Center werden mehrere Fluglotsinnen und -lotsen, die jeweils einen Flughafen allein überwachen, von einem Supervisor oder einer Supervisorin unterstützt. Diese Person liefert bei Bedarf das zweite Augenpaar.

Auch im Multiple-Remote-Tower-Konzept spielt diese Position eine entscheidende Rolle: Sie überwacht und verteilt die Arbeitslast. Dazu erforscht das DLR-Team neue digitale Planungstools, die es erlauben, alles im Blick zu behalten. Falls die Arbeitslast schlecht balanciert ist oder gar kritisch wird, warnt das System und hilft, eine passende Unterstützung zu finden. Wie dies funktionieren kann, zeigte der Test des Systems Ende 2021, bei dem das DLR gemeinsam mit dem Industriepartner Frequentis einen Remote-Tower-Center-Prototypen aufbaute, von dem aus litauische und polnische Fluglotsinnen und -lotsen aus der Ferne insgesamt 15 simulierte Flughäfen überwachten. „Das ist besonders für Flugplätze mit wenig Verkehr interessant oder auch nachts, wenn heutzutage aus Kostengründen oder aufgrund von Personalengpässen keine Flugsicherung bereitgestellt wird und die Flugplätze geschlossen sind“, erklärt Jakobi. Zukünftig wäre in solchen Situationen eine Person im Center im Einsatz, die die Flughäfen in dieser Zeit überwacht. Dadurch lassen sich deren Betriebszeiten verlängern. Gleichzeitig werden sie attraktiver für Fluggäste und Luftfrachtkundschaft. Dies erhöht wiederum die Nachfrage und kann mehr Einnahmen generieren. „Das Ergebnis sind bedarfsgerechte Flugsicherungsdienste für das gesamte Flugplatznetz und Synergien für die Luftfahrt“, ergänzt Jörn Jakobi.

„Wir müssen gewährleisten, dass das neue System einen Mehrwert schafft, also entweder effizienter oder sicherer ist, bevor wir überhaupt an eine Markteinführung denken.“

Jörn Jakobi

ist von großer Bedeutung, denn wenn die Nutzenden das Konzept nicht unterstützen, wird es sich kaum durchsetzen. Deshalb holen sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler schon frühzeitig die Meinung aus der Praxis ein.

Eine Frage der Balance

Ein wichtiger Indikator, um die Sicherheit des Systems bewerten zu können, ist das Stresslevel. Eine hohe Arbeitsbelastung ist besonders bei der Flugsicherung erst einmal nichts Ungewöhnliches. Auf Dauer

Mehr Verkehr an kleineren Flughäfen ermöglichen

An den 15 internationalen Flughäfen übernimmt die Deutsche Flugsicherung die Koordination des Luftverkehrs. Insgesamt gibt es in Deutschland aber rund 400 Flugplätze. Dabei sitzen an kleinen Flugplätzen häufig Flugleiter oder Flugleiterinnen, die Informationen bereitstellen, aber keine Flugsicherung durchführen. Hier müssen die Piloten und Pilotinnen nach Sichtflugregeln fliegen und sich hauptsächlich selbst koordinieren. Kommerzieller Instrumentenflug kann nicht stattfinden. „Wenn sich kleine Flughäfen in einem RTC zusammenschließen, können sie Ressourcen sparen und trotzdem qualifiziertere Flugsicherungsdienste kostengünstig anbieten“, ergänzt Jakobi.

Auch das soll im RTC Niedersachsen getestet werden. Hier sollen zertifizierte Lotsinnen und Lotsen neben den Flugleiterinnen und Flugleitern sitzen, die Flugsicherungsinformationen für den Flugplatz Emden bereitstellen. Eine erste Forschungsfrage lautet daher zu untersuchen, ob die Arbeitspositionen flexibel variiert werden können beziehungsweise welche Probleme es noch zu lösen gilt. Der DLR-Psychologe Jakobi sieht einen entscheidenden Vorteil der Technik darin, dass sie die Überwachung von Flughäfen viel flexibler mache: „Das ganze System Flugsicherung wird variabler und passt sich besser an die aktuellen Gegebenheiten mit schnellen Verfügbarkeiten und flexiblem Arbeiten an.“

Keine Tower am Flughafen der Zukunft?

Wird es also auf dem Flughafen der Zukunft keine Tower mehr geben? „Bei vielen kleinen Flughäfen wird sich Remote Tower früher oder

später durchsetzen“, so Jörn Jakobi. Statt in teure Neubauten oder den Erhalt bestehender Tower, könnte in Zukunft eher in günstigere Sensortechnik investiert werden. Das war ein entscheidendes Argument für den Flughafen Saarbrücken: Statt den Tower aufwändig zu renovieren, bleibt die Kanzel nun leer und die Koordination erfolgt über das Remote Tower Center in Leipzig. Der Scandinavian Mountains Airport im schwedischen Rörbäcksnäs, der 2019 eröffnete, wurde sogar ganz ohne Tower geplant und gebaut. Bereits existierende Tower müssten jedoch nicht abgerissen werden. Sie können beispielsweise als Ausweichoption dienen, wenn es Probleme im Center geben sollte. Neben solchen Ausweichoptionen sind bei den Remote-Tower-Konzepten immer auch Redundanzen enthalten, die Ausfälle auffangen.

Dass die Remote Tower so erfolgreich funktionieren, hat für Jörn Jakobi auch viel mit der engen Zusammenarbeit zu tun: „Anwender, Forschung und Industrie müssen so früh wie möglich zusammenkommen, denn die einen liefern die Anforderungen, die anderen besitzen das Forschungs-Know-how und die Dritten erarbeiten und vertreiben das marktreife Produkt.“ In Deutschland kommt als vierte Partei das Bundesluftfahrtamt für Flugsicherung (BAF) hinzu. Dessen Aufgabe ist es, neue Konzepte zu prüfen und zu bewilligen. Auch mit ihm steht das DLR in engem Austausch. Vor der Eröffnung des Remote Tower Centers in Leipzig trugen die DLR-Fachleute mit Forschungsergebnissen zu einem Bericht bei, auf dessen Grundlage das BAF den Betrieb bewilligte. Und auch in internationalen Gremien zur Standardisierung von Remote-Tower-Konzepten ist das DLR mitvertreten, um die Erfolgsgeschichte weiterzuschreiben.

Michael Drews ist im DLR-Institut für Flugführung für die Kommunikation verantwortlich. Julia Heil ist Redakteurin in der DLR-Kommunikation.



Sicht eines DLR-Kamerasystems auf den Forschungsflughafen Braunschweig





Online-Umfrage zum DLRmagazin

Unter allen Teilnehmenden werden zehn T-Shirts aus der neuen DLR Campus Collection verlost

Forschung, die bewegt – das DLRmagazin informiert regelmäßig über die neuesten Themen, an denen unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler arbeiten, sei es in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Verkehr, Sicherheit oder Digitalisierung. Gesellschaftliche Relevanz und Innovationskraft der dargestellten Projekte sind uns genauso wichtig wie ein guter Sprachstil, allgemeine Verständlichkeit und attraktive Bilder. Wir möchten von Ihnen wissen: Was gefällt Ihnen an unserem Magazin? Was können wir noch besser machen?

Hier geht's zur Online-Umfrage:



s.dlr.de/DLRmagazinumfrage

Die Anzahl derjenigen, die das Magazin regelmäßig lesen, wächst stetig. Das Heft ist über die Fachcommunity hinaus verbreitet – im Inland wie auch im Ausland. Dies motiviert uns, das Magazin kontinuierlich weiterzuentwickeln. Nicht nur inhaltlich, sondern auch gestalterisch wollen wir auf der Höhe der Zeit sein und neue Trends aufgreifen. Hierbei zählen wir auf Ihre Unterstützung: Wir haben eine Online-Umfrage erstellt, die sich an die Leserinnen und Leser der DLRmagazins richtet und deren Beantwortung lediglich wenige Minuten Zeit in Anspruch nimmt. Nutzen Sie bitte diese Gelegenheit, uns **bis zum 15. Januar 2023** Feedback zu geben! Über den Shortlink beziehungsweise den QR-Code auf dieser Seite gelangen Sie direkt zur Umfrage. Ihre Angaben werden nicht mit persönlichen Daten verknüpft. Wenn Sie zusätzlich an der mit dieser Umfrage verbundenen Verlosung teilnehmen möchten, können Sie Ihre Mailadresse angeben – diese wird getrennt von den Umfragedaten behandelt und nach Abwicklung der Verlosung gelöscht.

Zu gewinnen gibt es insgesamt zehn T-Shirts aus der brandneuen DLR Campus Collection. Die T-Shirts in Weiß und Schwarz sowie hochwertige Hoodies in Grau, Blau, Schwarz und Rosa sind ab sofort und exklusiv im DLR Space Shop erhältlich, im Shop auf dem DLR-Campus in Köln oder online unter sozialwerk-spaceshop.de. Der Druck im klassischen Campus-Design machen die Kollektion zu einem echten Hingucker. Weitere Artikel und Farben der DLR Campus Collection folgen. Die T-Shirt-Verlosung wird unterstützt von der Gesellschaft von Freunden des DLR (GvF). Hierfür bedanken wir uns ganz herzlich!



Die neue DLR Campus Collection

MELDUNGEN

DLR UNTERSUCHT STAUB VOM ASTEROIDEN RYUGU

Zwischen Juni 2018 und November 2019 untersuchte die japanische Raumsonde Hayabusa2 den knapp einen Kilometer großen Asteroiden Ryugu. Bei zwei Bodenkontakten sammelte die Sonde auch Proben der Asteroidenoberfläche. Im Dezember 2020 landete die Probenkapsel, die Hayabusa2 bei ihrem Vorbeiflug abgetrennt hatte und die etwas mehr als fünf Gramm an Material beinhaltet, sicher auf der Erde. Nachdem die japanische Weltraumorganisation JAXA einen Antrag des DLR im Juli 2022 bewilligt hatte, erhielt das Berliner Institut für Planetenforschung einen kleinen Teil der Proben. Aktuell untersuchen dessen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Original- und Analogmaterial auf Zusammensetzung und spektrale Unterschiede. Die Erkenntnisse werden bei zukünftigen Fernerkundungsmissionen wichtig sein, bei denen Raumsonden Planeten oder andere Körper aus der Ferne erforschen.



Das Staubkörnchen A0112 stammt vom Asteroiden Ryugu. Es ist drei Millimeter lang und hat eine Masse von 5,1 Milligramm. Das wertvolle Körnchen wird derzeit in den Laboren des DLR-Instituts für Planetenforschung in Berlin untersucht.



Im Projekt werden mehrere Systeme erprobt (von links): eine haptische Eingabestation mit zwei Leichtbauarmen (HUG), der humanoide, zweiarmlige mobile Heim-Assistenzroboter Rollin' Justin sowie EDAN, ein Rollstuhl mit einem Leichtbau-Roboterarm und einer Hand.

ROBOTER IM EINSATZ FÜR PFLEGE-BEDÜRFTIGE

Roboter können Pflegekräfte nicht ersetzen. Aber Roboter können unterstützen, damit dem Pflegepersonal mehr Zeit für die menschliche Zuwendung bleibt. In der Projektserie SMiLE (Servicerobotik für Menschen in Lebenssituationen mit Einschränkungen) erforschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vom DLR-Institut für Robotik und Mechatronik, welche Tätigkeiten Roboter in Zukunft in der Pflege übernehmen dürfen, wie gewährleistet wird, dass der Mensch und seine Bedürfnisse stets im Mittelpunkt der technologischen Fortschritte stehen, und wie sich die robotischen Assistenzsysteme in Seniorenheimen, Privathaushalten und Krankenhäusern einsetzen lassen. Entwickelt wurden die Roboter ursprünglich für die Raumfahrt.

EINPARKHILFE FÜR SCHIFFE

Das DLR entwickelte gemeinsam mit Niedersachsen Ports, dem Sensorenspezialisten SICK und der IT-Firma Humatecs ein Assistenzsystem, das Schiffe bei Anlege-, Durchfahrts- und Schleusenmanövern unterstützt. Bei SmartKai sind robuste maritime Lidar-Sensoren (Light Detection And Ranging) auf der Kaianlage und in die Leinenabweiser integriert. Sie erfassen die Umgebung. Lidar-Sensoren arbeiten mit Lasertechnologie und können unter anderem Abstände und Geschwindigkeiten schnell und präzise bestimmen. Das SmartKai-System bereitet die Daten auf und stellt sie Schiffsführerinnen und -führern in Echtzeit zur Verfügung. So können sich diese ein umfassendes Bild von den Umgebungsbedingungen machen und ihr Schiff sicher navigieren.



Wegen der hohen Verkehrsdichte im Hafengebiet, wechselnden Umweltbedingungen oder Zeitdruck entstehen häufig Schäden an Schiffen und Kaianlagen.

INTELLIGENTER KNOTEN

Forschung für den Hafen der Zukunft

Häfen gehören zu den wichtigsten Knoten- und Umschlagpunkten für den globalen Handel und den Verkehr. Aktuell befinden sich alle größeren Häfen in Transformationsprozessen hin zu mehr Digitalisierung, Automatisierung und Vernetzung. Diese Prozesse sollen dazu beitragen, auch in Zukunft sichere und effiziente Lieferketten gewährleisten zu können.

Das DLR unterstützt diese Aktivitäten mit seinem wissenschaftlichen Know-how im Rahmen des Projekts FuturePorts. Es wird von der Programmdirektion Verkehr finanziert und läuft bis 2025. In dieser

Zeit arbeiten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler daran, den Hafen der Zukunft im Sinne digitalisierter und automatisierter Prozesse und Verfahren aktiv mitzugestalten. Die insgesamt zehn beteiligten DLR-Institute fokussieren sich darauf, die Verkehrsführung zu optimieren, die emissionsfreie Schifffahrt voranzutreiben, hochautomatisierte Assistenzsysteme zu entwickeln sowie die Koordination von verschiedensten Transportketten über den Hafen als Verkehrsknoten zu verbessern.



Weitere Informationen zu dem Projekt unter:
s.dlr.de/FuturePorts

SEKTORENKOPPLUNG ENERGIE UND VERKEHR

Der maritime Bereich weist Schnittstellen zwischen den Sektoren Energie und Verkehr auf, die im Hinblick auf die Energiewende sehr vielversprechend sind. Das DLR analysiert und bewertet in diesem Kontext Konzepte für emissionsfreie Antriebstechnologien für Schiffe, Hafenbahnen und selbstfahrende Güterwagen und entwickelt Konzepte, wie Energie für den Landverkehr unter gemeinsamer Infrastrukturnutzung mit Schiffen bereitgestellt werden kann.

INNOVATIVE VERKEHRSFÜHRUNG IM ZULAUF UND IM HAFEN

Für eine reibungslose Logistikkette ist das Management des An- und Ablaufs des gesamten Verkehrs von entscheidender Bedeutung. Hierzu entwickelt das DLR ein System zur operativen Steuerung des Verkehrsflusses, basierend auf automatisierten Prozessen zur Entscheidungsunterstützung. Zudem erproben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, ob maritime Navigationshilfen den Ausfall von Satellitennavigationssystemen im Hafen kompensieren können.

FUNKTIONSENTWICKLUNG MANÖVERASSISTENZSYSTEME

Beim Ein- und Ausfahren in den Hafen sowie bei Fahrten im Hafengebiet müssen Schiffe häufig in sehr engen Bereichen navigieren. Das DLR entwickelt und erprobt hierzu neue Assistenzsysteme, um Schiffe sowohl eine zuverlässige Erfassung der Verkehrslage als auch die autonome Bewegung bei spezifischen Manövern zu ermöglichen.

DURCHGÄNGIGE DIGITALISIERUNG DER TRANSPORTKETTE

Zu einer effizienten Logistik im Hafen sind digitale Daten und Modelle der Schlüssel. Das DLR entwickelt dazu einen Demonstrator für eine vollständig digitalisierte Transportkette. Alle Prozesse, wie das Auf- und Abladen von Containern, werden in diesem digitalen Verkehrsmodell des Hafens abgebildet. Auf diese Weise lassen sich Veränderungen in den Strukturen und Prozessen einfach und effektiv testen und bewerten.

INNOVATIVE ANBINDUNG DES HAFENS AN DIE BINNENSCHIFFFAHRT

Neue Sensortechnologien oder Kombinationen von Sensoren sollen zukünftig Häfen und Binnenschifffahrt noch enger koppeln. Konkret entwickeln die Forschenden im DLR hierzu neue Methoden zur Kartierung von Binnenwasserstraßen, die zum Beispiel auch Brücken- und Schleusenkonturen oder Informationen zur Wassertiefe beinhalten werden. Erprobt werden diese Methoden in digitalen Testfeldern.

ZERTIFIZIERUNG HOCHAUTOMATISierter UND AUTONOMER SYSTEME

Die Zertifizierbarkeit hochautomatisierter und autonomer Systeme ist äußerst wichtig für ihre Akzeptanz und Sicherheit. Sie ist Gegenstand aktueller Forschungen. Das DLR arbeitet an modellbasierten Methoden, die in Form eines „Werkzeugkoffers“ die Validierung und Zulassung neuer Assistenzsysteme oder Automatisierungssysteme ermöglichen sollen.

GEKOMMEN, UM ZU BLEIBEN?

Das DLR geht einer neuen Form der Fortbewegung nach

Interview mit Laura Gebhardt

Trendverkehrsmittel, Umweltretter oder Ärgernis? Mit E-Scootern, E-Bikes und Pedelecs ist die Mikromobilität auf unseren Straßen angekommen. Sie erweitert unsere Optionen, von A nach B zu kommen. Die Erwartungen sind hoch, die Einschätzungen bisher gespalten. Laura Gebhardt vom DLR-Institut für Verkehrsforschung begleitet das noch relativ junge Thema schon seit seinen Anfängen und gehört zu den wenigen Fachleuten auf diesem Gebiet. Im Interview wirft sie einen Blick auf diese neue Art der Fortbewegung.

Frau Gebhardt, was ist Mikromobilität eigentlich?

Das ist bereits eine spannende und schwierige Frage. Denn eine klare und einheitliche Definition gibt es bisher nicht. In der Regel fallen darunter kleine und leichte Fahrzeuge für eher kurze Strecken mit einer maximalen Geschwindigkeit zwischen 25 oder je nach Definition 45 Kilometern pro Stunde. Dazu gehören E-Scooter, E-Bikes, Segways oder Elektro-Roller. Einiges davon gibt es schon länger. Aber vor allem der elektrische Antrieb und das Sharing-Prinzip – also leihen und teilen statt kaufen – haben dem Thema Mikromobilität Aufschwung gegeben. So sind zum Beispiel in Deutschland die E-Scooter 2019 quasi über Nacht auf die Straßen gekommen. E-Bikes waren im Sharing-Betrieb etwas früher dran.

Welche Chancen bietet diese Mobilitätsform?

Eine Motivation ist natürlich die offensichtliche Notwendigkeit, in Zukunft ressourcensparender unterwegs zu sein. Das betrifft sowohl den CO₂-Ausstoß als auch den Verbrauch von Flächen. In den stetig wachsenden Städten ist Raum ein knappes Gut. Dessen Verfügbarkeit und Nutzung beeinflussen jedoch die Lebensqualität erheblich. Autos benötigen relativ viel Platz und stehen den Großteil der Zeit herum. Mikromobile, die geteilt werden und in Bewegung sind, können eine Alternative sein. Außerdem können sie als Zubringer für die erste und letzte Meile dabei helfen, die Attraktivität des öffentlichen Nahverkehrs zu steigern.

Welche Herausforderungen gibt es für die Forschung?

Die größte besteht darin, dass es kaum empirisch fundierte und vergleichbare Daten gibt. Mikromobilität ist ein relativ neues Phänomen. Große statistische Erhebungen wie „Mobilität in Deutschland“ werden nur circa alle fünf Jahre durchgeführt und erfassen dieses Thema deshalb noch nicht. Es gibt zwar einzelne Studien und Projekte und man erhält teilweise Einblick in die Nutzungsdaten von Anbietern, dort können wir aber oft nicht genau nachvollziehen, wie die Daten erhoben und ausgewertet wurden.



Welche Erkenntnisse lassen sich bisher festhalten?

Aus den rund drei Jahren, die E-Scooter auf den Straßen unterwegs sind, wissen wir, dass die durchschnittlich zurückgelegte Strecke etwa zwei Kilometer beträgt. Mikromobilität kommt vor allem für Freizeit Zwecke zum Einsatz, der Samstag ist der beliebteste Nutzungstag. Die Nutzenden sind eher jüngere Menschen in Städten sowie Touristen. Während der Corona-Pandemie haben sich die Wege verlängert, wahrscheinlich zu Ungunsten des öffentlichen Nahverkehrs. Die Verkaufszahlen von E-Bikes steigen kontinuierlich und sind während der Pandemie explodiert. Wir sind gespannt, ob diese Entwicklung so weitergeht.

Welche Fragen bewegen Sie und andere Forschende?

Uns interessiert, wie sich die Potenziale von Mikromobilität am besten heben lassen. Welche Rahmenbedingungen, Förderung und auch Restriktionen brauchen wir dafür? Diese Fragen stehen natürlich in engem Zusammenhang mit unseren generellen Mobilitätsmustern und -routinen. Wie werden sich diese verändern? Wer nutzt Mikromobile für welche Wegstrecken aus welchem Grund? In Frankreich und Spanien kann man schon eine Verlagerung vom Freizeit- und Tourismusbereich hin zu einer breiteren Nutzungsgruppe beobachten. Als Forscherin ist es spannend, solche Entwicklungen quasi



Laura Gebhardt

studierte Geografie und Soziologie mit dem Schwerpunkt Stadtforschung und arbeitete dann am Geographischen Institut der Universität Bonn. Seit 2014 ist sie am DLR-Institut für Verkehrsforschung in Berlin tätig. Zu ihren Forschungsschwerpunkten zählen das alltägliche Mobilitätsverhalten, die Anforderungen von Menschen an das Mobilsein sowie die Frage, wie die Zivilgesellschaft in die Entwicklung zukünftiger Mobilitätskonzepte einbezogen werden kann. Zu diesem Thema hat sie auch ihre Dissertation verfasst.



© DLR

„E-Scooter-Fahren statt Laufen oder Radeln ist nicht im Sinn der Nachhaltigkeit.“

Laura Gebhardt

Wie sieht die Zukunft der Mikromobilität aus?

Im Moment werden Mikromobile als ein zusätzliches und teilweise störendes Verkehrsmittel wahrgenommen. Das führt zu Konflikten, zum Beispiel wenn E-Scooter auf Fahrrad- oder Fußwegen abgestellt werden. Wenn die Verkehrswende, und damit die Abkehr vom eigenen Auto, umgesetzt werden soll, müssen wir auch über die Neuverteilung des Stadtraums sprechen. Durch weniger Autos können Freiräume entstehen, die neu verteilt und genutzt werden können – mit mehr, unterschiedlichen und geteilten Verkehrsmitteln. Im Bereich Mikromobilität wird es wahrscheinlich eine weitere Ausdifferenzierung geben: E-Skateboards oder Segways werden eher Nischenprodukte bleiben. E-Scooter können ein Puzzlestück eines nachhaltigen Verkehrssystems sein, für Distanzen von bis zu vier Kilometern und als Zubringer. Wahrscheinlich wird sich auch bei den E-Lastenrädern einiges tun. Sie könnten verstärkt für Lieferdienste, Stadtreinigung oder andere Dienstleistungen zum Einsatz kommen. Potenzial und Rolle von Mikromobilität stehen und fallen mit den Rahmenbedingungen. Dazu braucht es nicht nur innovative Fahrzeuge, sondern auch den Mut und den Willen, Autofahren weniger attraktiv und weniger notwendig zu machen.

Das Interview führte Denise Nüssle. Sie ist Presseredakteurin im DLR.

hautnah verfolgen zu können und zu untersuchen, was sinnvolle und nachhaltige Szenarien für den Einsatz von Mikromobilen sind. Das DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte untersucht beispielsweise, welche Emissionen bei der Herstellung und Nutzung von Mikromobilen entstehen und welches CO₂-Reduktionspotenzial sie gegenüber anderen Fahrzeugen haben. Persönlich interessiert mich auch die Frage, ob diese neuen Verkehrsmittel für bestimmte Bevölkerungsgruppen, zum Beispiel Jugendliche, neue Statussymbole sind.



Und bringt diese neue Mobilitätsform der Umwelt wirklich etwas?

Dazu müssen die Fahrzeuge adäquat hergestellt, verteilt und eingesetzt werden. Teilweise kann man bei Anbietern von E-Scootern schon beobachten, dass mehr auf Nachhaltigkeit geachtet wird. Um eine möglichst gute Umweltbilanz zu erreichen, sind robuste und langlebige Fahrzeugmodelle, tauschbare Akkus und zum Beispiel das Einsammeln von E-Scootern mit E-Lastenrädern statt mit Dieseltransportern wichtig. Außerdem müssen sich die Nutzenden fragen, welche Wege und Verkehrsmittel sie mit Mikromobilität ersetzen. E-Scooter-Fahren statt Laufen oder Radeln ist nicht im Sinn der Nachhaltigkeit. Daten zeigen, dass Pkw täglich rund 30 Millionen Fahrten zurücklegen, die kürzer sind als zwei Kilometer. In einer DLR-Studie haben wir berechnet, dass mit E-Scootern 13 Prozent der Autofahrten in Deutschland ersetzt werden könnten. Das Potenzial ist also groß und die Frage ist, wie zumindest Teile davon realisiert werden können.

Elektrische Leichtfahrzeuge können die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors um bis zu 40 Prozent reduzieren. Das zeigte die LEV4Climate-Studie des Instituts für Verkehrsforschung und des Instituts für Fahrzeugkonzepte.



KOLLEGE ROBOTER

In der Flugzeugmontage können Mensch und Maschine effizient zusammenarbeiten

von Dr. Marcin Malecha und Julia Heil

Ein Flugzeug zu bauen braucht Zeit. Im Gegensatz zur Automobilindustrie, wo über 1.000 Fahrzeuge pro Tag das Werk verlassen, baut Airbus etwa 60 Flugzeuge pro Monat. Dabei ist teilweise immer noch Handarbeit im Spiel: Strukturen müssen gereinigt, Stützelemente vormontiert und befestigt werden. Die Prozesse erfordern ein hohes Maß an Genauigkeit und sind sehr zeitaufwändig. Deshalb sollen neue Konzepte und Technologien dabei helfen, den Anteil an automatisierten Arbeitsschritten zu erhöhen. Zusammen mit Partnern aus Industrie und Forschung hat das DLR untersucht, wie eine solche Zusammenarbeit von Mensch und Maschine aussehen könnte.

Der Rumpf eines Mittelstreckenflugzeugs wie dem Airbus A320 besteht aus mehreren Segmenten, sogenannten Sektionen, die aus mehreren Schalen aufgebaut sind. Damit die metallische Außenhaut einer Schale nicht zerknickt, wird sie von einer Stützstruktur gehalten, ähnlich wie bei einem Schiff. Bevor der Werker oder die Werkerin die bis zu sieben Meter langen Elemente der Stützstruktur anbringen kann, müssen die Außenhaut gereinigt und eine Aktivierungsflüssigkeit sowie eine Dichtmasse aufgebracht werden. Dann erst wird das Stützelement angebracht und die Vormontage ist abgeschlossen. Bei der Endmontage müssen die Fachleute noch einmal bis zu 1.000 Niete pro Segment setzen, um die Bauteile fest miteinander zu verbinden. Im Anschluss folgt eine abschließende Qualitätsprüfung.

Automatisierung in der Vor- und Endmontage

Diese beiden Prozessschritte, die Vor- und Endmontage einer Schale, bildeten den Kern des Forschungsprojekts Agreed. Das DLR war Auftraggeber für das Projekt und arbeitete zusammen mit dem Flugzeugbauer Premium Aerotec daran, die Abläufe zu digitalisieren und zu

automatisieren. Premium Aerotec fertigt für Airbus Rumpfteile für verschiedene Flugzeugtypen. Die Vormontage findet in Augsburg statt, die Endmontage im niedersächsischen Nordenham. „Ein riesiger Pluspunkt war für uns, dass wir Zugang zu allen Daten hatten und mit Bauteilen arbeiteten, die so an realen Flugzeugen fliegen würden. Normalerweise unterliegen diese der Geheimhaltung“, sagt Dr. Marcin Malecha.

„Ein riesiger Pluspunkt war für uns, dass wir Zugang zu allen Daten hatten und mit Bauteilen arbeiteten, die so an realen Flugzeugen fliegen würden.“

Marcin Malecha

Er arbeitet beim Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie des DLR (ZLP) und leitete das Projekt seitens des DLR. „Außerdem haben wir mit Fachleuten aus der Fertigung zusammengearbeitet, was die Akzeptanz gegenüber den entwickelten Technologien enorm gesteigert hat.

Bilder: Tobias Blaser/Lichtwerk



Die mobilen Transporteinheiten bringen die Roboter an ihren Einsatzort. Sie sind mit Sensoren ausgestattet, die Bewegungen registrieren. Sollte ihnen ein Mensch zu nahe kommen, stoppen sie so lange, bis der Weg wieder frei ist.



Für die Vor- und die Endmontage der Flugzeugschalen wurden digitale Zwillinge entwickelt, die jeden Schritt in der Fertigung abbilden.

Die Ergebnisse werden für unsere zukünftige Forschung von großem Nutzen sein“, so Malecha weiter.

Planung und Entwicklung in der digitalen Fabrikhalle

Zunächst entwickelte das Team sogenannte digitale Zwillinge für die Vormontage in Augsburg und für die Endmontage in Nordenham. Dadurch wurde die Prozessentwicklung beschleunigt, da alle Werkzeuge vor dem Prototypenbau getestet und die Roboterbewegungen

DAS PROJEKT AGREED IN KÜRZE

Das Projekt Agreed war ein internes Projekt des DLR. Ziel war die Entwicklung von Automatisierungslösungen für flexible und erweiterbare Schalenmontagen mit digitaler Intelligenz. Das DLR hat neben technologischer Forschung die administrative und planerische Rolle übernommen. Die Koordination der Arbeiten erfolgte in Zusammenarbeit mit dem beauftragten Generalunternehmer Premium Aerotec GmbH. Für umfangreiche Forschungsarbeiten wurden weitere Beteiligte aus Industrie und Wissenschaft unterbeauftragt: Broetje-Automation GmbH, Viscotec GmbH, Bergische Universität Wuppertal, Fraunhofer IFAM, Fraunhofer IFF und Cag Gemini.

- 1 s.dlr.de/Agreed1
- 2 s.dlr.de/Agreed2

programmiert werden konnten, noch bevor die Anlagen aufgebaut wurden. Die virtuelle Umgebung bildete jeden Schritt der Fertigung ab. Die digitalen Zwillinge waren auch die Grundlage für den täglichen Arbeitsplan, denn sie zeigten, wie viele Werkerinnen und Werker und wie viele Roboter im Einsatz waren. Die Fachleute wurden mit Augmented-Reality-Brillen ausgestattet. Diese blendeten Arbeitsschritte sowie passende Hilfestellungen ein und steuerten so die Verteilung der Aufgaben zwischen Menschen und Robotern. In einigen Prozessschritten wurde künstliche Intelligenz eingesetzt, die die Programmierung übernahm, beispielsweise bei den komplexen Einfädelbewegungen der Clips bei der Vormontage. An anderen Stellen bewegten sich die Roboter gänzlich autonom, wie beim Bohren und der Vollständigkeitsprüfung. Die Bohr- und Nietwerkzeuge wurden speziell entwickelt und zusammen mit Leichtbaurobotern auf mobilen Transporteinheiten an den jeweiligen Einsatzort gebracht. Deren Routen wurden ebenfalls über den digitalen Zwilling gesteuert.

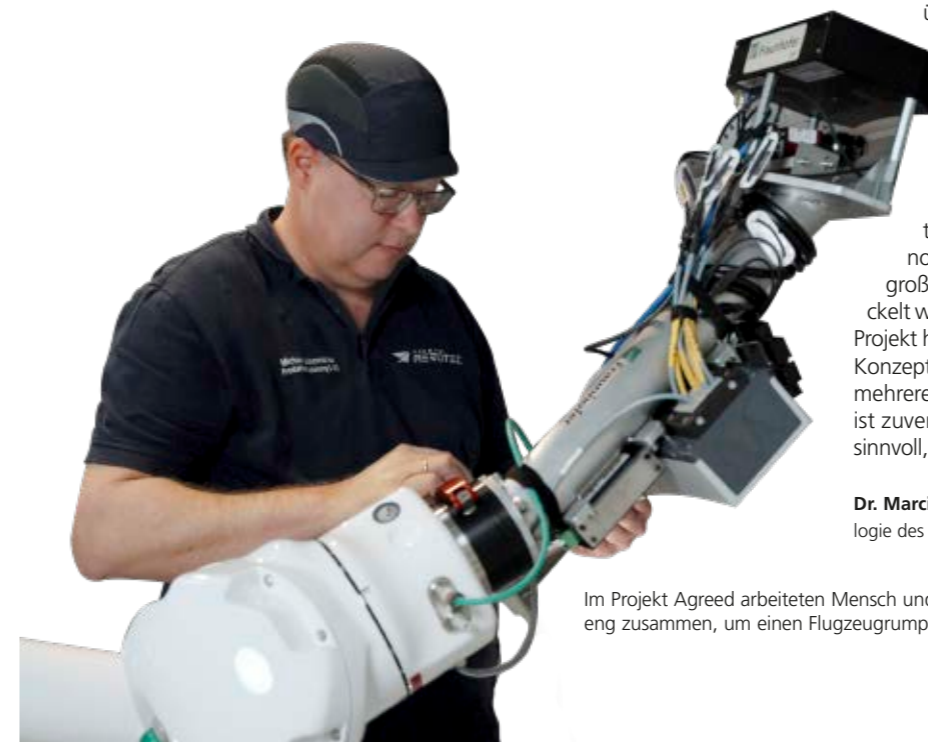
Parallel entwarfen die Forschenden die Roboter und die Werkzeuge, die zum Reinigen der Außenhaut und zum Fixieren der Stützstruktur benötigt wurden. Auch hier profitierten die Fachleute von dem digitalen Zwilling. „Das Programm zeigte uns direkt, ob unser Werkzeug die richtige Größe hatte oder an der richtigen Stelle angebracht war und wo wir noch Anpassungen vornehmen mussten. So konnten wir uns den Bau von vielen Prototypen sparen“, ergänzt Malecha.

Zwei Konzepte wurden erfolgreich getestet

Im Laufe des Projekts konnte das Team die Vormontage komplett automatisieren. Der Prozess lief ab, ohne dass ein Mensch eingreifen musste. Bei der Endmontage arbeiteten Mensch und Maschine eng zusammen. Auch die Qualitätssicherung am Ende wurde von einem Roboter übernommen. Dieser verglich die Position der Niete und Bohrlöcher anhand von Fotos mit der auf den digitalen Konstruktionsplänen. Nur wenn eine Position nicht übereinstimmt, musste eine Fachkraft beurteilen, ob nachgebessert werden sollte.

Aktuell laufen die Anlagen auf den Forschungsstrecken von Premium Aerotec. „Bis eine erste automatisierte oder kooperative Station in der Fertigung genutzt wird, wird es wahrscheinlich noch zwei bis drei Jahre dauern. Seitens der Industrie herrscht aber großes Interesse gegenüber den Technologien, die in Agreed entwickelt wurden“, erklärt Marcin Malecha. Wenn es nach ihm geht, ist das Projekt hier aber nicht zu Ende. Zusammen mit Premium Aerotec soll ein Konzept für eine Station entwickelt werden, an der Roboter parallel an mehreren Bauteilen arbeiten und der Sektionsmontage folgen. Und er ist zuversichtlich: „Nicht bei allen Prozessen ist eine Automatisierung sinnvoll, aber wir haben unsere Möglichkeiten noch nicht ausgereizt.“

Dr. Marcin Malecha ist Projektleiter am Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie des DLR. **Julia Heil** ist Redakteurin in der DLR-Kommunikation.



Im Projekt Agreed arbeiteten Mensch und Maschine eng zusammen, um einen Flugzeugrumpf zu fertigen.

DER GUTE TON

Die Klangprobe erlaubt Aussagen über Eigenschaften und Belastbarkeit von neuen Werkstoffen

von Michel Winand

Jan Roßdeutscher führt eine Klangprobe durch, um die elastischen Eigenschaften des Werkstoffs zu ermitteln.

© DLR



Wenn Werkstoffe unter Spannung stehen oder kleine Risse aufweisen, verändern sie ihren Klang. Auch Zug- oder Druckbelastung beeinflussen das Schwingungsverhalten von Materialien. Dies macht man sich beispielsweise beim Spielen einer Gitarrensaite zunutze. Bereits in der Antike führten Töpferinnen und Töpfer nach dem Brennen ihrer Tongefäße die Klangprobe durch. Beschädigte Gefäße haben einen dumpferen Klang. Auch heute wird die Klangprüfung eingesetzt, um bei der industriellen Serienfertigung die Qualität von Erzeugnissen aus Ton oder Porzellan zu überprüfen und beschädigte Teile schnell auszusortieren. Die Forscherinnen und Forscher im DLR-Institut für Werkstoff-Forschung verwenden diese Methode jedoch auch, um neue Hochleistungswerkstoffe für Luftfahrt, Raumfahrt oder den Energiesektor zu entwickeln.

„Bislang mussten wir unseren Werkstoff immer zerstören, um zu überprüfen, ob sich seine Belastbarkeit verändert hatte. Da der Werkstoff in einem großen Temperaturbereich eingesetzt wird, mussten entsprechend viele Proben geprüft werden, was zeitaufwändig und kostspielig war. Mit der zerstörungsfreien Klangprobe ist das nun nicht mehr nötig“, beschreibt Jan Roßdeutscher, wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR-Institut für Werkstoff-Forschung, das Verfahren.

Stabil auch bei großer Hitze

Faserkeramische Bauteile werden beispielsweise in Hochtemperaturbrennkammern eingesetzt. Herkömmliche Brennkammern aus Metalllegierungen haben eine materialbedingte Belastungsgrenze von rund 1.200 Grad Celsius. Brennkammern aus Faserkeramik sind weitaus resistenter gegenüber hohen Temperaturen, was für die Verbrennung



Ein Projektil tippt auf das Bauteil und versetzt es in Schwingung.



Ein Mikrofon zeichnet den Klang des schwingenden Leitschaufel-Modells auf.

von Vorteil ist, da diese dann sauberer und effizienter abläuft. Durch ihre Faserstruktur sind die Keramiken weniger zerbrechlich als ihre Verwandten in Kachelform, haben aber einen ähnlichen Härtegrad.

Der Ton macht die Musik

Mit der Impulserregungstechnik lassen sich Materialproben im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis hin zu 1.600 Grad Celsius untersuchen. Bei den Versuchen wird der Prüfkörper in der Anlage mit einem kleinen Projektil angetippt. Ein Mikrofon zeichnet die entstehende Schwingung auf. Mithilfe der Aufnahme ermittelt das Team um Jan Roßdeutscher sowohl die Resonanzfrequenz der Probe als auch ihre Dämpfung, also in welchem Maß sie die Schwingungsenergie überträgt. Die aufgezeichneten Messkurven liefern Erkenntnisse darüber, wie sich das Material im Einsatz verhält und gegebenenfalls verändern wird.

Die Forscherinnen und Forscher können auch mögliche Materialumwandlungseffekte wie das Versintern von Keramiken und chemische Reaktionen im Material erkennen. „Wir sparen extrem viel Zeit und Material, denn im Gegensatz zur Zugprüfung, die wir bislang eingesetzt haben, müssen wir nicht mehr für jede Temperatur eine neue Werkstoffprobe untersuchen, sondern können mit einer Probe beliebig viele Messpunkte aufnehmen. So können wir das temperaturabhängige Verhalten deutlich besser beschreiben“, ergänzt Jan Roßdeutscher.

Aktuell nutzen die Forscherinnen und Forscher die Impulserregungstechnik, um Materialkennwerte zu bestimmen. Diese sind wichtig, um größere Bauteile, die aus dem Werkstoff hergestellt werden sollen, realitätsgetreu simulieren und auslegen zu können. Mit den Ergebnissen der Klangprobe können die Faserverbundkeramiken außerdem effizienter und

DAS DLR-INSTITUT FÜR WERKSTOFF-FORSCHUNG

Hier werden neue Werkstofflösungen und deren Prozesstechniken für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, in der Energie und im Automobilsektor entwickelt. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler untersuchen metallische, hybride und keramische Werkstoffe, sie entwickeln Beschichtungen, die das Einwirken schädigender Umgebungsmedien auf Werkstoffe, Bauteile und Strukturen verhindern, und forschen an thermoelektrischen Systemen wie auch an Aerogelen und Aerogel-Verbundwerkstoffen. Darüber hinaus werden am Institut werkstoffmechanische Prüfungen durchgeführt und Werkstoffe auf mikroskopischer Ebene analysiert.

„Wir sparen extrem viel Zeit und Material, denn im Gegensatz zur Zugprüfung, die wir bislang eingesetzt haben, müssen wir nicht mehr für jede Temperatur eine neue Werkstoffprobe untersuchen, sondern können mit einer Probe beliebig viele Messpunkte aufnehmen.“

Jan Roßdeutscher

ökonomischer hergestellt werden, da die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Qualität bei jedem einzelnen Produktionsschritt überprüfen können und fehlerhafte Bauteile frühzeitig erkennen.

Von Turbinenschaufeln bis Bremscheiben

Die Ergebnisse dienen dazu, Werkstoffe zu entwickeln, die noch beständiger gegenüber hohen Temperaturen sind und dabei gleichzeitig eine hohe Festigkeit und Schadenstoleranz aufweisen. Auch bei ganzen Bauteilen aus faserverstärkter Verbundkeramik, wie beispielsweise neuartigen Turbinenschaufeln oder keramischen Bremscheiben, liefert die Klangprobe Aussagen darüber, ob diese Schwachstellen aufweisen.

Hierbei werden die Resonanzfrequenzen des Bauteils ermittelt und mit einem Bauteil verglichen, dessen Eigenschaften bekannt sind, wie ein Fingerabdruck. Wenn die gemessenen Resonanzfrequenzen deutlich voneinander abweichen, deutet dies auf einen Defekt hin.

In Zukunft möchten die Forscherinnen und Forscher des Instituts außerdem gezielt herstellungsbedingte Unterschiede zwischen ebenen und nicht ebenen Geometrien untersuchen. Das können Platten oder Rohre sein. Mit den Ergebnissen wollen sie die Simulationsmodelle und Fertigungstechnologien für Faserverbundkeramiken weiter optimieren und damit deren Zuverlässigkeit und Effizienz erhöhen.

Michel Winand ist für die Kommunikation an den DLR-Standorten der Region West verantwortlich.

Brennkammern aus Keramik sind äußerst hitzeresistent.





KI BRINGT GEFÜHL IN DIE MUSIK

Ein Musiker und DLR-Forschende haben eine künstliche Intelligenz entwickelt, die die Reaktionen des Publikums live in ein Orchesterstück hineinkomponiert

von Katja Lenz

Ein fröhlicher Gassenhauer ist aus dem Stück nicht geworden. So viel sei schon verraten. Aber dennoch klingt das Orchesterwerk „The Unanswered Question“ von Charles Ives nach der Bearbeitung deutlich anders als davor. Das liegt am Publikum. Und an einer künstlichen Intelligenz (KI), die die Reaktionen der Zuhörerinnen und Zuhörer auf die Originalmusik bewertet hat. Mit den Ergebnissen hat die KI dann das Stück umgeschrieben.

Kunst in der Wissenschaft. Wissenschaft in der Kunst. Der Saarbrücker Musiker Martin Hennecke hatte die Idee zu dem Projekt „The (Un) Answered Question – Eine musikalische Data Science Versuchsanordnung“. Über ein interdisziplinäres Forschungsstipendium der Helmholtz Information & Data Science Academy (HIDA) kam er zum DLR-Institut für Softwaretechnologie. Drei Monate lang hat er dort mit den Forschenden an einer Software gearbeitet, Cluster entwickelt und Daten gesammelt. Die wichtigste Frage lautete: Kann man eine KI dazu bringen, einen Live-Orchesterremix zu komponieren? Man kann. Das hat eine Probeaufführung im Mai in Dortmund bewiesen. Im November soll es ein Konzert im Saarländischen Staatstheater geben. Vor und mit großem Publikum.

Kombination aus Lyrik, Musik und Software

In Dortmund läuft es noch etwas kleiner. Werkstattatmosphäre in der Akademie für Theater und Digitalität, die das Projekt gemeinsam mit HIDA fördert: Drei DLR-Mitarbeiterinnen und ein -Mitarbeiter haben ihre Laptops aufgeklappt und passen die

Software ein letztes Mal an. Zehn Stühle für das Publikum, zwei Kameras für die Gesichtserkennung, neun Notenpulte für die Musikerinnen und Musiker und eines für den Dirigenten stehen bereit. Die Probeaufführung beginnt mit einem Vorspiel, dem ersten Teil des Projekts. Ein Schauspieler rezitiert das Gedicht „The Sphinx“ von Ralph Waldo Emerson (1803–1882). Dazu wird eine riesige MRT-Aufnahme vom schlagenden Herzen des Schauspielers auf einer Leinwand gezeigt, aufgezeichnet in Berlin im Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin, einem weiteren Partner. Das Thema „Großherzigkeit“ zieht sich wie ein roter Faden durch das Projekt. Das Gedicht selbst dreht sich um eine Geschichte aus der griechischen Mythologie: Eine Sphinx belagert die Stadt Theben und tötet jeden, der ihr Rätsel nicht lösen kann. Diese Geschichte war die Grundlage für das Stück „The Unanswered Question“ von Charles Ives (1874–1954). Der US-amerikanische Komponist hat einem Streichquartett lange Töne zugeschrieben. Eine Trompete wiederholt einige Male ein Motiv, das wie eine Frage klingt. Vier Holzbläser spielen ganz andere, unterschiedliche Tonfolgen. Charles Ives galt zu seiner Zeit als experimentierfreudig. Das Stück hat Dissonanzen. Das heißt, es ist bisweilen ziemlich „schräg“.

Sechs Minuten lauscht das Testpublikum den Klängen. Zwar sind die Notenpulte real aufgebaut, aber bei der Probeaufführung wird nicht live gespielt. Es läuft ein Video von einem Sinfonieorchester. Die Zuhörerinnen und Zuhörer in Dortmund tragen Armbänder, die ihren Puls aufzeichnen. Wenn die Flöten einsetzen, steigt bei manchen der Puls. Alle haben vorher einen Online-Fragebogen anonym ausgefüllt: „Ich bin einfühlsam, warmherzig“, „Ich habe mit anderen wenig Mitgefühl“, „Ich bin



Probeaufführung von „The (Un)Answered Question – Eine musikalische Data Science Versuchsanordnung“: Die Reaktionen des Publikums werden von der künstlichen Intelligenz sofort erkannt und angezeigt.

gefälliger und folgen anderen Abläufen. In Saarbrücken werden die Musikerinnen und Musiker den Remix im Saal direkt von einem Tablet ablesen. Dann wird aus „The Unanswered Question“ wieder ein ganz anderes Stück. „Das Zusammenspiel von Orchester und Publikum ist ein besonderes künstlerisches Erlebnis“, sagt Martin Hennecke. „Mit digitalen Mitteln und Techniken aus dem Bereich der Data Science wird dieses Erlebnis lebendiger und menschlicher – kurioserweise durch den Einsatz von Technik und Computern.“

Visualisierungen zeigen dem Publikum, wie die Forschenden arbeiten

In dem Gesamtprojekt mit Gedichtvortrag, Originalstück samt Datenerhebung und Remix steckt auch für die Forschenden am DLR-Institut für Softwaretechnologie etwas Besonderes. „Sogar wenn das Publikum keine Erfahrung

mit Data Science hat, können wir über die Musik und die Visualisierungen vermitteln, was mit den Daten und durch die Daten passiert“, sagt Carina Haupt vom Institut für Softwaretechnologie. Sie leitet gemeinsam mit Andreas Schreiber das Projekt beim DLR. In der Abteilung Intelligente und Verteilte Systeme werden sonst unter anderem komplizierte Softwarearchitekturen über Visualisierungen dargestellt. „Hier haben wir einen ähnlichen Ansatz. Wir arbeiten mit Bildern und Metaphern, um Herzfrequenz und Emotionen zu kombinieren und darzustellen“, ergänzt Andreas Schreiber.

hilfsbereit und selbstlos“, „Andere sind mir eher gleichgültig, egal“. Fünf Antworten zwischen „Stimme überhaupt nicht zu“ und „Stimme voll und ganz zu“ sind möglich. Die KI kann so das Publikum besser einschätzen. Die Gesichtserkennung unterscheidet zwischen Freude, Traurigkeit, Wut, Neutralität, Ekel, Überraschung, Angst. Die Gefühle bilden die Basis für die Bearbeitungen der KI. Wie empfinden die Leute das Stück? Das ist wenig später auf dem Bildschirm zu sehen: Viele kleine Punkte springen meistens zwischen neutral, wütend, traurig und glücklich hin und her, während in der Mitte das abgebildete Herz weiter pocht.

„Sogar wenn das Publikum keine Erfahrung mit Data Science hat, können wir vermitteln, was mit den Daten und durch die Daten passiert.“

Carina Haupt

Dann legt die KI los. Sie nimmt die Gefühlsregungen und den Pulsschlag des Publikums, dazu die Angaben aus den Fragebögen – und schreibt das Stück um. Wie genau, ist nicht vorhersehbar. „Ich bin gespannt, wie es sich gleich anhört“, sagt Martin Hennecke. Die KI arbeitet nicht linear. „Wenn jemand traurig ist, wird das Stück nicht automatisch fröhlicher.“ Der Algorithmus, den die Forschenden im DLR gemeinsam mit Martin Hennecke entwickelt haben, fasst die Daten in Clustern zusammen, bewertet sie und löst damit Änderungen im Remix aus.

Das neue Stück wird sofort aufgeführt. Beim Probedurchgang in Dortmund läuft das rein elektronisch. Der Rhythmus hat sich verändert. Aus sehr langen Tönen sind kürzere geworden. Die Harmonien klingen



Der Musiker Martin Hennecke hat am DLR-Institut für Softwaretechnologie mit den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern zusammengearbeitet. Auf den Bildschirmen ist die MRT-Aufnahme eines schlagenden Herzens zu sehen.

Für Martin Hennecke geht es nach der Novembereinführung im Saarländischen Staatstheater, wo er auch Paukist und Schlagzeuger ist, direkt weiter. Sein nächstes Projekt wird etwas mit Ballett zu tun haben. Martin Hennecke schreibt dazu eine live veränderbare Partitur über die Verarbeitung persönlicher Daten im Internet. Die Daten sollen von den Mitgliedern des Saarländischen Staatsballetts stammen – und natürlich vom Publikum.

Katja Lenz ist Presseredakteurin im DLR.

Zwei Kameras beobachten das Publikum. Die Aufnahmen dienen zusätzlich zu den Informationen von einem speziellen Armband und einem Fragebogen als Basis für das neue Musikstück.

DIE RAUMSTATION IM KLASSENZIMMER

DLR_School_Labs im „Online-Modus“

von Dr. Volker Kratzenberg-Annies



© DLR

In Lernvideos führt DLR-Moderatorin Sina Kürzt Experimente durch, die Kinder zu Hause nachmachen können.

Die Schülerinnen und Schüler schauen gebannt zu, wie im Kölner DLR_School_Lab eine Fallkapsel in die Tiefe stürzt: Wie werden sich Wasser und Luft in dem kleinen Glasbehälter vermischen, wenn sein Inhalt im freien Fall schwerelos wird? Das DLR_School_Lab Jena macht Jugendlichen unterdessen vor, wie man Smartphones mit wenigen Hilfsmitteln in Polarisationsmikroskope verwandelt und so Meteoritenschliffe, aber auch Zwiebelschalen untersuchen kann. Und in Oberpfaffenhofen sorgt eine Führung durch das Raumfahrtkontrollzentrum für Begeisterung. Dabei ist all diesen Beispielen eines gemeinsam: Die Schülerinnen und Schüler sind nicht vor Ort, sondern aus ihren Klassenzimmern online zugeschaltet. Denn es handelt sich um „digitale Schulstunden“ im Tele-Modus, die in der DLR-Nachwuchsförderung während der Corona-Pandemie entwickelt wurden und seitdem viele Male stattfanden.

War das zunächst der bestmögliche Ersatz für den Präsenzbetrieb, der ab März 2020 unterbrochen werden musste, so sind die Online-Formate mittlerweile ein fester Bestandteil im Repertoire der DLR-Schülerlabore. Auch nach Wiederaufnahme des normalen Besuchsprogramms wurden und werden sie weiter ausgebaut.

Selbst ausprobieren macht am meisten Spaß

Rund 40.000 Schülerinnen und Schüler besuchen jährlich die 15 DLR_School_Labs, die es an DLR-Standorten und befreundeten Hochschulen gibt. Die Nachfrage der Schulen ist dabei so groß, dass die Wartezeiten teils über ein Jahr betragen. Seit Eröffnung des ersten DLR-Schülerlabors waren insgesamt fast 450.000 Kinder und Jugendliche zu Gast. Kernelement ist dabei immer das eigene Experimentieren. Unter fachkundiger Betreuung führen die Schülerinnen und Schüler Versuche durch, die altersgerecht vereinfacht mit aktuellen Forschungsthemen zu tun haben: vom elektrischen Fliegen mittels Brennstoffzelle bis zur

Erdbeobachtung per Satellit, von der Nutzung der Solarenergie bis zur Stauvermeidung auf der Straße. Da erkunden die Jugendlichen mit einem kleinen Rover eine künstliche Marslandschaft, spielen Tower-Lotse, untersuchen Verbundwerkstoffe, „backen“ in einer kleinen Weltraumkammer einen künstlichen Kometen, richten Solarzellen optimal auf eine Lichtquelle aus – kurz und gut: Sie tauchen in die Welt der Wissenschaft ein, lernen dabei jede Menge und merken, dass Forschung aufregend ist und richtig Spaß machen kann.

Dann kam Corona und plötzlich war damit Schluss. Anstelle des Präsenzbetriebs wurden Online-Angebote entwickelt – auf Basis einer Konzeptstudie einschließlich einer bundesweiten Umfrage unter Lehrkräften und nach Klärung vieler Fragen zu Technik, Datenschutz und zahlreichen Details. Inzwischen haben rund 10.000 Schülerinnen und Schüler an den „digitalen Schulstunden“ des DLR teilgenommen, neu entwickelte Lernvideos wurden über 60.000 Mal angesehen und auch viele andere „Digi-Formate“ erfreuen sich großer Beliebtheit.



TU Dortmund

Eine Mitarbeiterin des DLR_School_Labs TU Dortmund bei einem Online-Workshop



© DLR

Bei einem ISS-Livecall mit Astronaut Matthias Maurer wurden gleich mehrere Schulen online zugeschaltet.

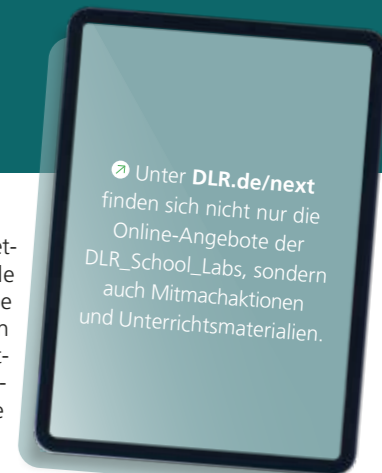
Interesse quer durch die Republik und darüber hinaus

„Ich muss heute noch drei Vorträge vor Schulklassen halten“, verabschiedet sich Dr. Richard Bräucker eilig aus dem montäglichen Skype-Meeting. Dabei befindet sich der langjährige Leiter des Kölner DLR_School_Labs im Homeoffice, während die Schülerinnen und Schüler ihm aus Dresden, Konstanz oder aus anderen Orten zugeschaltet sind, um ihn anschließend mit Fragen zu überhäufen – und die Lehrkraft manchmal sogar dazu überreden, eine weitere Schulstunde „dranzuhängen“. So geht es auch all den anderen Leiterinnen und Leitern der DLR_School_Labs, wie etwa Frank Fischer aus Braunschweig: Eine Schule nach der anderen bucht seine Online-Präsentation zur Internationalen Raumstation ISS. Das Schülerlabor in Bremen betreut mehrwöchige Schulprojekte und gibt aus der Ferne regelmäßig Tipps. In Göttingen werden Laborräume und Hangars, die sonst für Besucherinnen und Besucher unzugänglich sind, in einem virtuellen Rundgang per Livekamera für Schulklassen geöffnet. Dabei kommen auch Schulen mit den DLR-Schülerlaboren in Kontakt, für die der Weg sonst viel zu weit wäre. Das geht sogar über die Landesgrenzen hinaus – etwa im Falle von Online-Schaltungen aus dem DLR_School_Lab Berlin zur Deutschen Schule in Shanghai oder nach Neu-Delhi. Auch Grundschulen oder Kindergärten machen von den Online-Angeboten des DLR Gebrauch. „Für unsere Kinder war die Aktion während der ganzen Corona-Beschränkungen ein echtes Highlight“, schrieb die Erzieherin einer Kindertagesstätte aus dem Odenwald an Tobias Neff, den Leiter des DLR_School_Labs in Lampoldshausen.

Lernen im Online-Modus



© DLR



Unter [DLR.de/next](https://www.dlr.de/next) finden sich nicht nur die Online-Angebote der DLR_School_Labs, sondern auch Mitmachaktionen und Unterrichtsmaterialien.

Am anderen Ende der Bildungskette profitieren auch Studierende von der neuen Aktionslinie: Die internationalen Sommerschulen zu Raumfahrtantrieben und Weltraumwetter, die sonst in Lampoldshausen beziehungsweise Neustrelitz vor Ort stattfinden, wurden zuletzt in digitaler Form durchgeführt – mit Teilnehmenden aus vielen Ländern und Referentinnen sowie Referenten, die unter anderem aus Kourou, Südafrika und Huntsville in den USA zugeschaltet wurden. Auch die DLR_School_Labs an Hochschulen (Aachen, Augsburg, Darmstadt, Dortmund, Dresden und Hamburg) sind online aktiv – mit spannenden Vorträgen von Fachleuten, Tele-Workshops speziell für Schülerinnen, Lernangeboten auf Social-Media-Plattformen wie Instagram oder ganz neuen Formaten wie einem digitalen Escape-Room-Quiz.

Neue Formate erweitern dauerhaft das Angebot

Mit den Online-Formaten hat das DLR eine neue Form der Ansprache junger Zielgruppen umgesetzt, die auch nach der Rückkehr zum Präsenzbetrieb der DLR_School_Labs beibehalten wird. Damit liefern sie fundierten und zugleich faszinierenden Content für die Digitalisierung in der Bildung und unterstützen so dieses wichtige politische Ziel. Zugleich eröffnet sich ein Potenzial, um noch mehr Heranwachsende für Forschung zu begeistern. Weit über berufsorientierende Aspekte hinaus soll so in der jungen Generation verstärkt für eine konstruktive und positive Haltung der Wissenschaft gegenüber geworben werden – ein „Lernziel“, das in heutigen Zeiten vielleicht wichtiger ist denn je.

Dr. Volker Kratzenberg-Annies gehört seit 1989 dem DLR an und ist seit 2007 in der DLR-Nachwuchsförderung tätig.

BRANDNEUE IDEEN

Studierende entwickeln Konzepte zur Waldbrandbekämpfung aus der Luft

von Tobias Dietl und Patrick Ratei



Adobe Stock/Tandem Stock

Viele werden sich noch an den Hitzesommer in diesem Jahr erinnern. Fast täglich vermeldeten die Medien neue Waldbrände, auch in Deutschland. In Frankreich, Italien, Spanien und Portugal zerstörten die Feuer viele tausende Hektar Wald und setzten große Mengen Kohlendioxid frei. Solche Katastrophen könnten aufgrund des fortschreitenden Klimawandels zu einem regelmäßigen Phänomen des europäischen Sommers werden. Fangen Waldstücke Feuer, werden neben Einsatzkräften am Boden auch Flugzeuge und Hubschrauber eingesetzt, um die Flammen einzudämmen. Die Luftfahrzeuge können große Mengen Löschwasser gezielt einsetzen und die Ausbreitung des Brandes verlangsamen. Allerdings ist diese Form der Brandbekämpfung sehr kostspielig und die eingesetzte Technik häufig veraltet. Das DLR hat Studierenden aus ganz Deutschland in der DLR Design Challenge 2022 die Aufgabe gestellt, neue Konzepte für die luftgestützte Waldbrandbekämpfung zu entwickeln.

Diese Aufgabe war alles andere als trivial: Die Teams sollten eine Flotte von Luftfahrzeugen konzipieren, die zusammen mindestens 11.000 Liter Wasser pro Flug an den Brandort liefern können. Die Anzahl der Luftfahrzeuge und die Nutzlast blieben ihnen überlassen. Die Vehikel sollten Wasser aus nahen Quellen wie kleinen Seen, Flüssen oder Meeren aufnehmen können, dementsprechend sollten sie auf kurzen Strecken starten und landen können. Jedes Luftfahrzeug sollte entweder von einer Person an Bord, vom Boden aus oder gar hochautomatisiert geflogen werden können und das sowohl nachts als auch bei schlechten Sichtverhältnissen. Auch der modulare Entwurf für die Fertigung war Teil der Aufgabe: Das Kon-

„Dieses Jahr war die Schwierigkeit, neben dem Luftfahrzeugentwurf das Zusammenspiel aller involvierten Systeme zu berücksichtigen.“

Markus Fischer

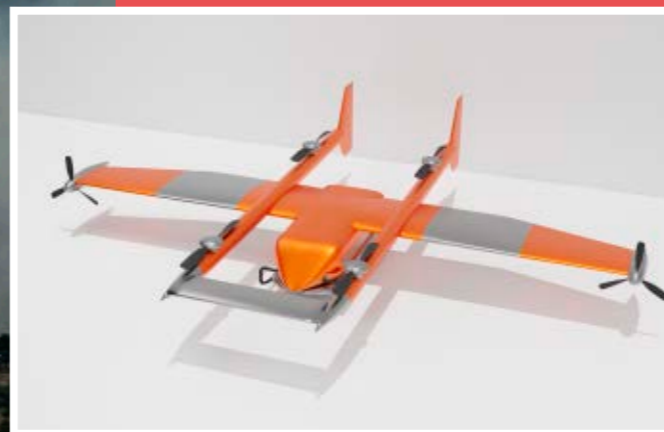
zept musste so aufgebaut sein, dass aus einer einzigen Fertigungslinie entweder ein Löschflugzeug, ein Passagier- oder ein Frachttransporter produziert werden könnte. Die hypothetische Indienstellung war für das Jahr 2030 angesetzt. Insgesamt bekamen die sechs Teams, die sich beworben hatten, vier Monate Zeit, um die Aufgabe zu lösen. „Dieses Jahr war die Schwierigkeit, neben dem Luftfahrzeugentwurf das Zusammenspiel aller involvierten Systeme zu berücksichtigen. Alle Teams haben diese Herausforderungen gemeistert und können stolz auf sich sein“, sagte Dr. Markus Fischer, DLR-Bereichsvorstand Luftfahrt und Juryvorsitzender, bei der Preisverleihung.

DIE ERSTEN DREI PLÄTZE DER DLR DESIGN CHALLENGE



Universität Stuttgart/INFERNO

Das Team der Universität Stuttgart, bestehend aus Ahmet Günay Can, Hannes Kahlo, Benjamin Knoblauch, Nicolas Mandry, Prishit Modi und Johannes Ritter, entwarf mit INFERNO ein modulares Vehikel, das hybrid-elektrisch angetrieben wird und sowohl als Löschflugzeug betrieben werden als auch Personen und Güter transportieren kann.



TU Dresden/PEL-E-FAN-T

Dominik Brunner, Hannes Jerzembek, Lennard Köhler, Paul Sanderbrand und Maximilian Wenk von der TU Dresden entwarfen PEL-E-FAN-T. Das unbemannte Fluggerät kann mit verschiedenen Modulen ausgerüstet werden. So können im Flotteneinsatz beispielsweise zwei Vehikel mit einem Aufklärungsmodul bestückt werden, um wichtige Informationen für den Löscheintritt an die übrige Flotte mit Löschmodulen weiterzugeben.



RWTH Aachen/FireWasp

Der Kombinationsflugschrauber FireWasp entstand an der RWTH Aachen. Das Konzept von Mucahit Fatih Evliyaoglu, Selim Karakus, Dominik Kau und Robin Mörsch nutzt eine konventionelle Gasturbine. Bis zur Indienstellung im Jahr 2030 soll das unbemannte Luftfahrzeug vollständig mit nachhaltigen Kraftstoffen betrieben werden können.

INFERNO aus Stuttgart belegt den ersten Platz

Dies galt auch für das Siegerteam der Universität Stuttgart. „Es war zu Beginn ein eher unscheinbares Thema, aber je tiefer wir darin einstiegen, desto klarer wurde uns, dass wir ziemlich kreativ werden müssen, um alle Anforderungen erfüllen zu können“, sagt Teamleiter Johannes Ritter. Ihr Konzept INFERNO nutzt acht horizontale Rotoren, um senkrecht starten und landen zu können, sowie zwei Propeller für den Vorwärtsflug. Der Antrieb ist hybrid-elektrisch und kann mit nachhaltigen Kraftstoffen betankt werden. Das Fluggefährt hat eine Schöpfvorrichtung, mit der es Wasser aufnehmen kann, aber es kann auch Wasser aus kleineren Gewässern entnehmen, indem es dort ein Stück eintaucht. INFERNO wird von einer Pilotin oder einem Piloten gesteuert, entsprechend viele Gedanken hat sich das Team zum Cockpitdesign und zu Assistenzsystemen gemacht – schließlich muss auch bei schlechter Sicht und bei Nacht sicher geflogen werden. Um Zeit zu sparen, kann man das Vehikel im Einsatz auch in der Luft betanken.



© DLR/Universität Stuttgart/Team INFERNO

V. l. n. r.: Benjamin Knoblauch, Hannes Kahlo, Ahmet Günay Can und Prishit Modi vom Team der Universität Stuttgart

Der zweite Platz ging an das Team der TU Dresden mit ihrem Konzept PEL-E-FAN-T. Das unbemannte Luftfahrzeug wird hybrid-elektrisch angetrieben. Es kann senkrecht starten und landen und so auch sehr kleine Wasserquellen für die Löschaktionen nutzen. Der Kombinationsflugschrauber FireWasp der RWTH Aachen belegte den dritten Platz. Er vereint die positiven Eigenschaften von Hubschraubern und Flächenflugzeugen. Die dazugehörige Flotte besteht aus einem Aufklärungsvehikel und sechs Löschfliegern. Sie wird autonom betrieben und kann bei Bedarf von einer mobilen Bodenstation aus ferngesteuert werden.

Ein Ideengenerator und ein Schritt in die Zukunft

Die DLR Design Challenge wird seit 2017 ausgetragen. Mit der Organisation wechseln sich die DLR-Institute für Aerodynamik und Strömungstechnik und für Systemarchitekturen in der Luftfahrt jährlich ab. Die Themen reichen dabei von revolutionär leisem und emissionsarmem Fliegen über Überschallpassagierflugzeuge und klimaschonende Kleinflugzeuge bis hin zu autonomer und zuverlässiger Luftfahrt in städtischen Gebieten mittels Drohnen. „Wir legen großen Wert darauf, dass die Konzepte der Studierenden in sich schlüssig sind“, sagt Dr. Björn Nagel, Jurymitglied und Direktor des Instituts für Systemarchitekturen in der Luftfahrt, das den Wettbewerb dieses Jahr organisierte.

Für viele Teilnehmende ist der jährlich stattfindende Wettbewerb der Einstieg in weiterführende Arbeiten: Das Konzept HyBird des Gewinnerteams 2019 der Universität Stuttgart wird beispielsweise im DLR-Innovationszentrum für Kleinflugzeug-Technologien weiterentwickelt, aus dem Konzept des Gewinnerteams 2020 der RWTH Aachen für eine Paketdrohne namens Urban Ray ging ein Start-up hervor und an der TU München wird weiter an der Wasserstoffdrohne Mercurius gearbeitet, mit der das Studierendenteam 2020 den dritten Platz belegte. Auch das DLR profitiert von dem Wettbewerb: Seit Beginn wurden regelmäßig neue Mitarbeitende eingestellt, die zuvor als Teilnehmende in der DLR Design Challenge Erfahrung im Entwurf von Flugzeugen erlangt hatten.

Tobias Dietl und Patrick Ratei arbeiten beide im DLR-Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt. Sie übernehmen die Koordination der DLR Design Challenge 2022.

ÖKONOMIE UND KLIMAWANDEL

Die wirtschafts- und gesellschaftswissenschaftliche Perspektive

Interview mit Dr. Stephanie Becker und Dr. Horst Steg



Adobe Stock/khunkorn

Wir sind gefährlich nah dran an einer Erderwärmung um 1,5 Grad Celsius – das zeigen sowohl der aktuelle Sachstandsbericht des Weltklimarats IPCC als auch neuere Auswertungen der Weltorganisation für Meteorologie. Um Klimaneutralität zu erreichen, müssen große wirtschaftliche und gesellschaftliche Herausforderungen gestemmt werden. Es geht darum, ganze Branchen wie die energieintensive Grundstoffindustrie, aber auch unser Verkehrssystem und Mobilitätsverhalten auf die Erfordernisse des Klimaschutzes neu auszurichten. Der Förderschwerpunkt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) „Ökonomie des Klimawandels“, bei dem der DLR Projektträger von Anfang an als Partner mit dabei ist, beschäftigt sich aus ökonomischer Perspektive mit Methoden und Instrumenten, mit denen wir erfolgreich den Klimaschutz voranbringen und insgesamt dem Klimawandel begegnen können.

Warum ist klimaökonomische Forschung so wichtig?

Becker: Um die Ziele, die Erderwärmung deutlich unter 2 Grad Celsius, möglichst unter 1,5 Grad zu halten und Kohlenstoffneutralität bis 2045 zu erreichen, benötigen wir Wissen darüber, wie die ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels aussehen und welche wirkungsvollen Klimaschutzstrategien es gibt. Hier kommt die klimaökonomische Forschung ins Spiel: Sie klärt Fragen, wie eine wirtschaftliche Transformation realisiert werden kann, welche klimapolitischen Instrumente wirksam und effizient sind und wie man mit verbleibenden Klimarisiken umgehen kann. Die klimaökonomische Forschung liefert Datengrundlagen, Orientierungswissen und Entscheidungshilfen für klima- und energiepolitische Debatten. Daher ist sie eine wichtige Voraussetzung für erfolgreiche politische Entscheidungen. Der BMBF-Förderschwerpunkt Ökonomie des Klimawandels ergänzte die lange Zeit stark naturwissenschaftlich geprägte Thematik durch wirtschafts- und gesellschaftswissenschaftliche Perspektiven.

Wie ist es gelungen, die Forschungsergebnisse auch in die Anwendung zu bringen?

Becker: Es wurden beispielsweise Lehren aus früheren Umweltabkommen gezogen und praktikable Empfehlungen für die Zukunft des Pariser Abkommens abgeleitet, etwa die Festlegung eines globalen CO₂-Preises.

Steg: Es ist wichtig, bei der Entwicklung von Fördermaßnahmen den Transfer in Wirtschaft und Gesellschaft mitzudenken. Dazu hat der übergreifende Begleitprozess „Dialog der Klimaökonomie“ beigetragen. Darin wurde dafür gesorgt, dass Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in den direkten Austausch mit den Beteiligten aus Wirtschaft, Verwaltung, Politik und Zivilgesellschaft treten.



© DLR

Dr. Horst Steg ist Volkswirt. Er leitet im DLR Projektträger die Koordinierungsgruppe „Forschungspolitik und Klimaschutz“ und arbeitet hier unter anderem zur sozioökonomischen Klimaforschung und zu forschungspolitischen Konzepten und Strategien für den Klimaschutz.

Becker: In der klimaökonomischen Forschung haben wir in Deutschland inzwischen ein etabliertes Netzwerk wissenschaftlicher Einrichtungen, die sich in ihren Kompetenzen ergänzen und sich untereinander austauschen. So können belastbare Ergebnisse entstehen. Mindestens genauso wichtig für eine dauerhafte, längerfristige Wirkung ist aber auch der wissenschaftliche Nach-

„Wesentlich ist, dass die Themen nicht nur befristet in der Projektförderung beforscht werden, sondern auch längerfristig von wissenschaftlichen Einrichtungen, Unternehmen und der Gesellschaft aufgegriffen werden.“

Horst Steg

Was sind erfolgreiche Beispiele aus der Förderung der letzten Jahre?

Steg: Ein Beispiel ist der Umgang mit dem Kohleausstieg. Konkret untersuchte man die Entwicklungspotenziale der Energiewendewirtschaft in der Lausitz. Im Fokus standen die Technologien Windenergie, Fotovoltaik, Bioenergie, Wärmepumpen sowie energetische Gebäudesanierung. Ein zweites Beispiel ist ein Beitrag zur CO₂-Bepreisung für die Bereiche Wärme und Verkehr im Klimaschutzprogramm 2030.

Wie schafft man es, dass diese Veränderungen kein Strohfeuer sind, sondern nachhaltig verankert werden?

Steg: Schaute man früher bei klimaökonomischer Forschung vor allem in die USA, sind entsprechende Kompetenzen und Kapazitäten inzwischen auch in Deutschland verankert. Wesentlich ist, dass die Themen nicht nur befristet in der Projektförderung beforscht werden, sondern auch längerfristig von wissenschaftlichen Einrichtungen, Unternehmen und der Gesellschaft aufgegriffen werden. Das ist unser Job als Projektträger. Für die Klimaökonomie haben wir in Deutschland eine „Scientific Community“ aufgebaut, die unmittelbar auf klima- und energiepolitische Fragen reagieren kann und fähig ist, diese allgemeinverständlich zu kommunizieren. Diese hat zum Beispiel unmittelbar nach der russischen Invasion in die Ukraine Modelle und Einschätzungen dazu präsentiert, welche Auswirkungen der Krieg für die deutsche und internationale Klimapolitik mit sich bringen könnte und welche wirtschaftlichen Folgen ein Gasembargo haben würde.

wuchs, der in den vergangenen Jahren gezielt aufgebaut wurde. Diese Menschen werden zukünftig in unterschiedlichsten Funktionen tätig werden – nicht nur in der Wissenschaft, sondern auch in Unternehmen, Politik und Verwaltung. Dafür bringen sie wichtiges klimaökonomisches Know-how und Perspektiven mit.

Die Fragen stellten **Britta Paul** und **Stefanie Huland** vom DLR Projektträger.



© DLR

Dr. Stephanie Becker ist Sozialwissenschaftlerin und arbeitet schwerpunktmäßig zu den Themen Klimaschutz und Finanzwirtschaft sowie Klimaökonomie und zu gesellschaftswissenschaftlichen Fragestellungen rund um den Klimawandel.

DAS BMBF-PROGRAMM „ÖKONOMIE DES KLIMAWANDELS“

Das Ziel steht fest: Deutschland soll bis 2045 klimaneutral werden. Angesichts dieser historischen Herausforderung stellen sich zahlreiche Fragen an Wissenschaft und Wirtschaft, Politik und Gesellschaft: Welche Wege zur Transformation können beschritten werden? Welche Zusammenhänge müssen dabei bedacht werden? Und welche Instrumente sind wirksam für einen nachhaltigen und effizienten Klimaschutz? Um das ambitionierte Ziel der Klimaneutralität zu erreichen, wird noch mehr Wissen benötigt. Daher finanziert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) bis Ende 2022 den Förderschwerpunkt „Ökonomie des Klimawandels“ mit insgesamt 29 Forschungsprojekten, die entsprechende wirtschaftswissenschaftliche Kompetenzen ausbauen und praktische Lösungsvorschläge erarbeiten. Der DLR Projektträger ist als fachlicher und administrativer Partner von Anfang an dabei.



TarikVision, Stock.Adobe.com



„Tracy's Rock“ ist eines der berühmtesten Fotos der Apollo-Ära und zeigt Jack Schmitt beim Untersuchen des großen Felsens, der nach der damals neunjährigen Tochter von Kommandant Gene Cernan benannt ist.

EIN MAXIMUM AN ERKENNTNISGEWINN

Das grandiose Finale eines der größten Menschheitsabenteuer

von Ulrich Köhler

Die meisten kennen die berühmtesten auf dem Mond gesprochenen Worte, jene vom kleinen Schritt für den Einzelnen und dem großen Sprung für die Menschheit. Neil Armstrong sprach sie am 20. Juli 1969. Doch auch die letzten vom Mond zur Erde gefunkten Worte haben eine historische Dimension. Sie stammen aus dem Mund von Eugene „Gene“ Cernan, dem Kommandanten von Apollo 17. Vor 50 Jahren, am 14. Dezember 1972, sagte er vor dem Einstieg in die Mondfähre: „Wir verlassen jetzt Taurus-Littrow, so wie wir einst gekommen sind, und, so Gott will, wir werden in Frieden und Hoffnung für die ganze Menschheit zurückkehren. Godspeed the crew of Apollo 17!“ Gut vier Tage später war eines der größten Abenteuer der Menschheit, das Projekt Apollo, mit der Wasserung der Kommandokapsel America beendet.

Die Meilensteine und Superlative dieses 1961 vom damaligen US-Präsidenten John F. Kennedy angekündigten, ausgesprochen gewagten Unternehmens sind Legende. Zwischen 1968 und 1972 verließen 24 Männer das Schwerefeld der Erde, bis heute die Einzigen. Zwölf von ihnen verewigten bei sechs erfolgreichen Mondlandungen ihre Fußabdrücke im Staub des Erdtrabanten. Alle kamen lebend zurück, sogar die Besatzung von Apollo 13 konnte nach der Explosion eines Sauerstofftanks nach zwei Dritteln des Wegs zum Mond gerettet wer-

den. In Erinnerung bleibt allerdings auch der tragische Unfalltod der Astronauten Virgil „Gus“ Grissom, Ed White und Roger Chaffee, die 1967 bei einem Starttest am Boden verbrannten.

Ende 1972 sollte Schluss sein mit Apollo, obwohl noch drei weitere Missionen geplant, Ziele ausgesucht und die Trägerraketen bereits gebaut waren. Präsident Nixon hatte das schon 1971 beschlossen: zu teuer. Zudem befürchtete er, dass kaum politischer Nektar aus diesen drei Missionen zu saugen war. Die NASA wehrte sich noch nicht einmal lautstark. Die Verantwortlichen waren mit der bisherigen Bilanz ausgesprochen zufrieden, zumal alle Astronauten heil und sechs Crews mit

einem riesengroßen Schatz an Mondproben sowie technischen und wissenschaftlichen Erkenntnissen zur Erde zurückgekehrt waren.

Der erste Wissenschaftsastronaut

Das gilt vor allem für die drei letzten Missionen, Apollo 15, 16 und 17. Diese Mondflüge waren in erster Linie der Wissenschaft gewidmet. Das zunächst politisch motivierte Ziel, einen Amerikaner vor den Sowjets auf den Mond zu bringen, um die Überlegenheit der freien, westlichen Welt zu demonstrieren, war von einem Wissenschaftsprogramm begleitet. Um sichergehen zu können, dass der erste Mensch auf dem Mond buchstäblich festen Boden unter den Füßen haben würde, wurde der Erdbegleiter zuvor mit robotischen Sonden erkundet. Die verantwortlichen Wissenschaftler erkannten sofort, welche Bedeutung der Mond für das Verständnis aller vier erdähnlichen Planeten hat. Mit seiner meist über drei Milliarden Jahre alten Oberfläche ist er ein Fenster in die Frühzeit des Sonnensystems. Demzufolge ersannen sie für Apollo 11 sowie für die nachfolgenden fünf Missionen zahlreiche neue Experimente und schulten die Astronauten im Gelände. So wurden aus elf Test- und Navypiloten interessierte und gut geschulte Laienwissenschaftler.

Für die letzte Mission wurde aber mit Harrison „Jack“ Schmitt endlich auch ein „echter“ Forscher ausgewählt. Dies sollte die wissenschaftliche Ausbeute noch einmal steigern. Der Geologe Schmitt startete als Teil der Crew von Apollo 17 am 7. Dezember 1972 mit Donnerhall in den Nachthimmel über Florida; es heißt, der Start einer Saturn V sei der größte je vom Menschen erzeugte Lärm. Eine halbe Million Menschen ließ sich dieses mitternächtliche Spektakel nicht entgehen.

Ron Evans barg die zylinderförmigen Filmkassetten in fast 400.000 Kilometer Entfernung zur Erde.



Fast 3.000 Tonnen Masse hoben mit der Mission Apollo 17 vom Kennedy Space Center in Florida zum letzten bemannten Mondflug ab.

Die Planetenforschung profitierte enorm

Die Mondlandung vier Tage später war schon fast Routine, selbst die hohen Berge um das Taurus-Littrow-Tal stellten für Schmitt und Cernan kein Hindernis dar. Drei Tage und drei Stunden verbrachten die beiden am Südostrand des von vulkanischen Gesteinen angefüllten Mare Serenitatis, der östlichsten aller Landestellen. Dieses Gebiet wurde gewählt, um ein älteres Einschlagsbecken untersuchen zu können. Das 3,8 Milliarden Jahre alte Imbriumbecken, das die Mondvorderseite dominiert, war bei vorherigen Missionen schon mehrfach beprobt worden.

Bei drei über sieben Stunden langen Ausflügen mit dem Mondrover legten die beiden Astronauten 34 Kilometer zurück und verstauten am Ende 110 Kilogramm Mondproben in der Challenger. Ron Evans, der Pilot des Kommando- und Servicemoduls, erkundete mit Kameras, Spektrometern und erstmals einem Radar den Mond aus der Umlaufbahn – mit 75 Mondumrundungen hält er auch einen Rekord. Nach der Rückkehr wussten die NASA-Wissenschaftler nicht, ob sie melancholisch über das vorzeitige Ende der Apollo-Ära werden oder über die großartige Ausbeute all der Experimente an der Landestelle, bei den Exkursionen und aus der Umlaufbahn jubeln sollten. Bis heute werden die Proben untersucht und die Daten ausgewertet. Die Ergebnisse füllen Bände. Apollo war Geschichte. Bill Anders, der 1968 mit Apollo 8, der ersten „Mondmission“, den Trabanten umkreiste und das berühmte Foto vom Erdaufgang schoss, lieferte ein weiteres berühmtes Zitat und fasste damit vorab den wichtigsten Erkenntnisgewinn aufs Schönste zusammen: „Wir brachen auf, den Mond zu erkunden, aber tatsächlich entdeckten wir die Erde.“

Ulrich Köhler ist Geologe am DLR-Institut für Planetenforschung und verfolgte die letzten Schritte von Astronauten auf dem Mond als Neunjähriger. Schon die erste Mondlandung weckte in ihm die Begeisterung für den Erdtrabanten.

Bilder: NASA

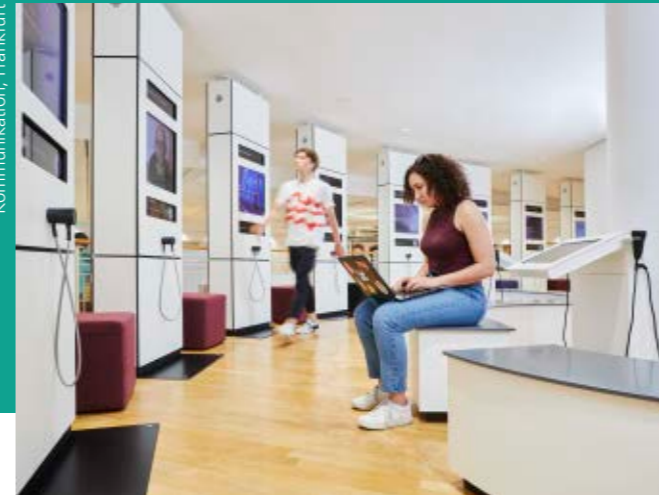
VON BABYLON ZU BREITBAND

Besuch im Museum für Kommunikation in Frankfurt
von Joshua Tapley

Thomas Giesner/MSPT



Katharina Dubno/MSPT/Museum für Kommunikation, Frankfurt



neues Phänomen. In den frühen 1900er Jahren hatte das Vereinigte Königreich ein faktisches Monopol auf Unterseekabel, die zur Kommunikation über den Atlantik verwendet wurden, während die Deutsche Bundespost bis 1990 ein Monopol auf Haustelevone in (West-)Deutschland besaß.

Das Museum macht deutlich, dass die neuen Kommunikationstechnologien sowohl das Beste als auch das Schlechteste in uns zu verstärken scheinen. Der einzige Trend scheint darin zu bestehen, dass die Technologien in unserem Alltag an Bedeutung gewinnen. Je mehr die Kommunikation zensiert wird, desto mehr Menschen verlegen sich auf Piraterie. Die Deutschen umgingen das Monopol der Bundespost auf Telefonapparate, indem sie illegale ausländische Modelle kauften und ins Land schmuggelten, während die Bürgerinnen und Bürger der Sowjetunion ihre Freiheit auf ihren „Knochen“ demonstrierten, indem sie Schallplatten mit verbotenen Volksliedern und Hits von Elvis Presley auf gebrauchte medizinische Röntgenfilme ritzten. Die Aufnahmen kann man sich im Museum anhören.

Vertrauen und Geschäfte

Wie eine Elvis-Platte in einem sowjetischen Untergrund-Musikclub scheinen auch wir in der Wiederholung stecken geblieben zu sein. Das Internet mag der aktuelle Höhepunkt unseres Bedürfnisses sein, mehr und schneller zu kommunizieren, aber es bringt auch uralte Herausforderungen und Bedenken in Bezug auf Vertrauen, Privatsphäre, Freiheit, Sicherheit, Kontrolle und Monopole mit ins digitale Zeitalter. Auch Datenschutz und Fake News sind keine neuen Probleme: Volkszählungsdaten über „Rassen“ wurden vom nationalsozialistischen Regime in Deutschland gesammelt und verwendet, und Sendungen, die den nicht ganz wahrheitsgemäßen Erfolg der jüngsten Kriegsanstrengungen verkündeten, sind so alt wie das Radio selbst.

Die Geschichte geht weiter

Dabei ist das Museum selbst eine beeindruckende Leistung der Kommunikation. Hier wird Geschichte durch eine Kombination aus zweisprachigen schriftlichen Inhalten, Bildern, Modellen, akustischen Beispielen, Demonstrationen, Antiquitäten, Anekdoten und Spielen lebendig. Es bietet Aktivitäten für Kinder und Erwachsene. Die freundlichen und sachkundigen Mitarbeitenden stehen für Führungen zur Verfügung, doch es steht den Gästen frei, sich auf eigene Faust durch das Haus zu bewegen.

MUSEUM FÜR KOMMUNIKATION FRANKFURT

Schaumainkai 53, 60596 Frankfurt am Main
Telefon 069 6060-0

Preise:
Erwachsene: 6 €,
Ermäßigter Eintritt: 4 €,
Kinder, Jugendliche: 1,50 €,
Kinder bis 5 Jahre: frei

Öffnungszeiten:
Di. bis So. 11–18 Uhr, Mi. 10–20 Uhr

mfk-frankfurt.de

Denjenigen, die sich für einen eigenen Rundgang entscheiden, würde es allerdings helfen, wenn die chronologische Reihenfolge der Exponate im Museum klarer angegeben wäre.

Den Abschluss bildet eine Dauer- ausstellung mit 21 Videobotschaften von Expertinnen und Experten zu verschiedenen Themen: Werden wir in Zukunft unsere Privatsphäre kaufen müssen? Wie werden wir in 30 Jahren kommunizieren? Wie sieht die Zukunft der Mensch-Maschine-Interaktion aus? Werden Virtual-Reality-Arbeitsplätze im Zeitalter der zunehmenden Fernarbeit alltäglich werden? Die wunderbaren und besorgniserregenden Möglichkeiten für die Zukunft regen auf dem Heimweg zum Nachdenken an.

Genau wie der Frankfurter Brieffund werden diese Videobotschaften vielleicht in Jahrhunderten ihren Weg zurück ins Museum finden. Zukünftige Besucherinnen und Besucher werden dann lernen, wie wir im 21. Jahrhundert kommuniziert haben, und mehr erfahren über unsere Hoffnungen und Ängste. Vielleicht werden sie sogar innehalten und darüber nachdenken, ob sie selbst immer noch vor den Herausforderungen stehen, die wir von Babylon bis zum Breitband meistern mussten.

Joshua Tapley ist Redakteur für das englische DLRmagazin bei EJR-Quartz.



Viele halten eine sofortige und uneingeschränkte Kommunikation für selbstverständlich, aber die Art der Kommunikation ändert sich ständig, im Laufe der Zeit und auf der ganzen Welt. Das Frankfurter Museum für Kommunikation zeigt Besucherinnen und Besuchern, wie Kommunikation Technik und Gesellschaft miteinander verbindet und dass die Menschheit seit Jahrtausenden immer wieder vor denselben Herausforderungen steht.

Die Geschichte der Kommunikation handelt davon, wer sprechen darf, was diese Person sagen darf und wer zuhören darf. Es ist die Geschichte neuer Technologien und neuer Nutzender – von dem Codex Hammurabi bis zu Gutenbergs Druckerpresse, von Marconis Radio bis zum Telekommunikationssatelliten Telstar 1. Es ist auch die Geschichte zunehmender Effizienz und Geschwindigkeit – und unseres Versuchs, mit weniger mehr zu sagen und dies schneller als je zuvor. Ideen wurden zu 1.700 Hieroglyphen, diese zu zwei Dutzend Buchstaben und jene wiederum zu Bytes und Radiowellen. Jede neue Technologie erfordert neue Fähigkeiten, die ihre Wirksamkeit steigert, von Hard Skills wie Alphabetisierung und digitaler Kompetenz bis hin zu Soft Skills wie poetischer Sprache oder Überzeugungskunst.

Die Exponate im Frankfurter Museum für Kommunikation sind nicht nur Zeugnisse davon, wie Zeitgenossen miteinander kommunizierten. Der Frankfurter Brieffund – eine Sammlung lokaler Briefe aus dem 16. Jahrhundert – ist ein Fenster zur Vergangenheit, Akte der Kommunikation über die Zeit hinweg. Während wir die Art und Weise, wie wir uns ein Bild von uns selbst machen und es der Außenwelt präsentieren, als ein Phänomen moderner sozialer Medien betrachten, zeigen diese Briefe, zusammen mit Liebesbriefen von Goethe und Kafka sowie Telegrammen von Titanic-Passagieren, die ebenfalls im Museum ausgestellt sind, dass das Ringen um die Kontrolle darüber, wie die Welt uns, unsere Gedanken, Gefühle, Ängste und Wünsche wahrnimmt, nicht so neu ist, wie es uns scheint.

Märkte und Monopole

Eine weitverbreitete Angst im Zusammenhang mit sozialen Medien ist die vor dem Monopol – dass eine kleine Anzahl von Unternehmen zu viel Kontrolle über die Infrastruktur erlangen könnte, die wir zur Kommunikation nutzen. Aber auch das ist alles andere als ein

Am Eingang des Museums wird die Geschichte der Kommunikation lebendig.



J. Tapley

Die Massenmedien halten Einzug in die Haushalte. Sie werden für gute und weniger gute Zwecke genutzt ...



J. Tapley



GENERATIONENAUFGABE

Machen wir uns keine falschen Hoffnungen: Wir werden wohl nicht mehr miterleben, wie der Mars besiedelt, geschweige denn begrünt wird, so gerne wir dies vielleicht möchten. Der Weg zu unserem roten Nachbarplaneten ist weit und für eine Besiedlung sind noch viele wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen und technische Fortschritte zu erzielen. Das ist ein Projekt für mehr als eine Generation. Und es ist äußerst komplex. Welche Hürden und Fallstricke lauern können, wenn man einen fremden Planeten bewohnbar machen möchte, davon erhalten Spielerinnen und Spieler im Brettspiel **Terraforming Mars (Schwerkraft Verlag)** einen Vorgeschmack.

Bis zu fünf Pionierinnen und Pioniere dürfen während einer Partie nachvollziehen, wie ambitioniert sowohl eine mögliche Besiedlung als auch das sogenannte Terraforming unseres Nachbarplaneten sein können. So bezeichnet man die Änderung von Atmosphäre und Oberflächenbeschaffenheit. Besonders interessant ist dabei, dass das Spiel auf real existierenden Technologien sowie laufenden Projekten und Ansätzen basiert. Im Verlauf der Spielpartie gilt es, drei Kernparameter zu erhöhen: Sauerstoffgehalt, Wassermenge und – darin hat die Menschheit bereits leider eine außerordentlich hohe Kompetenz bewiesen – die Temperatur.

In wiederkehrenden Forschungs-, Aktions- und Produktionsphasen vertreten die Spielerinnen und Spieler einen Konzern. Jeder der Konzerne vertritt andere unternehmerische Interessen. Mehr als 200 Karten stellen Projekt- und Baupläne dar, die auf verschiedene Weise dem Terraforming dienen: Mikroben züchten, Wälder pflanzen, Täler fluten, Städte bauen oder gar Asteroiden einschlagen lassen. Zusätzlich kann man jederzeit mit dem nötigen Kleingeld – sogenannten Megacredits, also sehr viel Kleingeld – unter anderem Städte, Grünflächen oder Ozeane in hexagonaler Plättchenform anlegen. Am besten direkt aneinander, denn auch auf dem Mars sind Naherholung und Meerblick von Vorteil. Je weiter die Zeit fortschreitet, desto spektakulärer werden die durchführbaren Projekte und desto zahlreicher die Plättchen auf dem Spielbrett. Erfahrungsgemäß dauert eine Partie zwischen 90 und 180 Minuten. Dabei wirken sich die Aktionen unterschiedlich aus auf die drei Terraforming-Parameter oder die Ressourcenbilanz des Konzerns, was durch hübsche, metallisch schimmernde Würfel dargestellt wird. Schnell wird deutlich: Um den Mars bewohnbar zu machen, braucht man neben Ideen und Geduld vor allem Baumaterial, Energie, Pflanzensetzlinge und natürlich enorme Mengen Geld. Das Spiel endet, sobald mit 14 Prozent ausreichend Sauerstoff zum Atmen die Atmosphäre füllt, alle neun Ozeanplättchen Seen und Meere bilden und die globale „Übergangsjacken“-Temperatur von 8 Grad Celsius erreicht ist.

Auf dem Weg dorthin entbrennt Generation für Generation ein epischer Wettlauf um die Siegpunkte und den effektivsten Terraforming-Konzern, stets mit Blick auf die Ressourcen und die Konkurrenz. Wer noch mehr Herausforderung sucht, findet diese in verschiedenen Spielerweiterungen. Bei Terraforming Mars erleben die Spielerinnen und Spieler das sich zunehmend verändernde Antlitz der Marsoberfläche von einem roten Wüstenplaneten hin zu einem farbenfrohen, lebenswerten Hoffnungsträger für die Menschheit, nachdem diese die bereits hervorragend von der Natur geformte Erde verspielt hat.

Daniel Beckmann



DER KLANG DES UNIVERSUMS

Nichts Geringeres als die Suche nach der Weltformel beschreibt Michio Kaku, Professor am City College of New York, in **Die Gottesformel. Die Suche nach der Theorie von Allem (Rowohlt)**. Vom Urknall bis zum Ende des Universums fasst diese Formel alle Phänomene und die Gesamtheit der Physik in einer einzigen Gleichung zusammen – der Heilige Gral der Physik. Als „Theorie von Allem“ vereint sie alle bekannten Kräfte und Wechselwirkungen: die Gravitation, den Elektromagnetismus sowie die starken und schwachen Kernkräfte. Aus Kakus Sicht ist der vielversprechendste Weg dorthin die Stringtheorie. Sie beschreibt die Welt als Schwingungen winziger Saiten, den sogenannten Strings, in einem zehndimensionalen Raum – eine Mathematik, die jenseits unserer Vorstellungskraft liegt. Sie vereint Gravitation, die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie und die Quantenphysik ganz selbstverständlich.

Kaku beginnt mit einer Revue der großen Entdeckungen der Physik: von Newtons Gravitationsgesetzen, Maxwells und Faradays Elektromagnetismus, Einsteins Relativitätstheorie über die Quantenphysik des Lichts und der Materie bis zur Quantengravitation und der Multiversum-Theorie. Anschaulich zeigt Kaku die entscheidende Rolle von Symmetrien in den Gleichungen. Sie sind der Schlüssel zur Erkenntnis und zur Vereinigung aller Gesetze des Universums. Dabei verbindet der Autor geschickt Wissenschaft, Philosophie und sogar Religion mit der Frage nach der Existenz Gottes.

Das Buch fasziniert und macht mehr als neugierig – auch wegen Kakus wundervoller Gabe, höchst komplexe physikalische Zusammenhänge mit einer Klarheit und chirurgischen Präzision zu beschreiben, die nur den ganz Großen so gelingt. Ein physikalisches Hintergrundwissen erfordert das Buch jedoch schon. Ebenso das Verständnis, dass die „Theorie von Allem“ für uns noch sehr viel Unerklärliches im Universum offenbart. Die Hoffnung auf die „Gottesformel“ bleibt.

Jens Mende



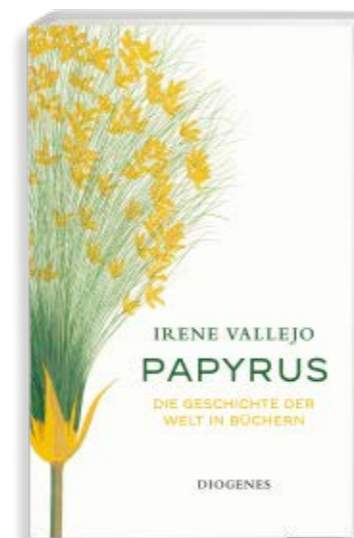
DIE AHNEN DES BUCHS

Ein Buch, eine Sammlung gebundener Seiten, bedruckt mit Buchstaben, die erst durch deren Zusammenfügen zu Worten zum Leben erwachen. Wer denkt schon über den langen Weg nach, der dem Lesen vorausging? Wer ahnt die Mühe, Symbole und Bilder in Stein zu ritzen, Buchstaben zu erschaffen? Wer weiß von der Anstrengung der Kopisten, dank derer Bücher Verbreitung fanden? Wer konnte, wer durfte lesen und wie wurde Wissen aufbewahrt?

Irene Vallejo erzählt in **Papyrus (Diogenes)** von den Ursprüngen, vom Werden und vom Bleiben des Buchs. Die in Spanien geborene Philologin (Jahrgang 1979) verfolgt akribisch älteste Spuren, vergleicht Quellen, findet Bezugspunkte in Druckwerken und Filmen neuer Zeit. Wir erfahren, wie einst aus dem Mark von Zypergras Papyrus-Platten hergestellt wurden. Wir lesen, wie Tierhäute so lange gedehnt und ihre Oberflächen Schicht für Schicht abgeschabt wurden, bis ein weißes Pergament entstand, lesen, wie Bücher als „von Wörtern bewohnte Körper, auf die Haut tätowierte Gedanken“ von Hand zu Hand gereicht wurden.

Die bildhafte Sprache der Autorin, ihr eigenes Spiel mit nicht alltäglichen Worten sorgen für einen ganz besonderen Lesegenuss. Papyrus ist auch ein Abenteuer, ein nicht ganz müheloser Weg durch die Geschichte. Die überbordende Fülle von historischen Fakten und Sprüngen durch Raum und Zeit fordert die Lesenden heraus. Vallejo schuf mit ihrem 660-Seiten-Werk mehr als ein Sachbuch. Es regt zum Nachschlagen und nochmals Lesen an und macht dabei auf eine charmante Weise schlau. Papyrus verleiht dem persönlichen Bücherschatz Glanz, nicht nur wegen seines edlen Einbands in Leinen und des schön gestalteten Umschlags in den Farben von Papyrus, Moosgrün und Gold.

Cordula Tegen





IST DAS RAUMFAHRT ODER KANN DAS WEG?

Der Weltraum ist fester Bestandteil unseres Lebens auf der Erde – schon allein deshalb dürfen wir ihn nicht vernachlässigen. Was mit der Neugier auf fremde Welten und der Demonstration vor allem technischer Fähigkeiten zu Zeiten des Kalten Krieges begann, steht heute vor einer Zeitenwende: Wie sieht die Zukunft der Raumfahrt aus? Dieser vielschichtigen, herausfordernden und spannenden Frage geht der Astrophysiker, Raumfahrtjournalist und Autor Dirk H. Lorenzen in seinem Buch **Der neue Wettlauf ins All (Kosmos)** nach. Auf 200 kompakten Seiten schafft es dieses mit vielen Illustrationen und Fotos, fundierter Sachkenntnis und persönlichen Anekdoten gespickte Buch, allen an Raumfahrt interessierten Laien einen guten Überblick über das aktuelle „Koordinatensystem“ der globalen Aktivitäten im All zu geben; über die Errungenschaften, aber auch die aktuellen und künftigen Herausforderungen und Ziele einer immer stärkeren Nutzung des grenzenlosen (?) Raums, der unseren blauen Planeten umgibt. Wie kann Raumfahrt nachhaltiger und Weltraumschrott vermieden werden? Auch Expertinnen und Experten bietet dieses Kompendium überraschende Einsichten.

Elisabeth Mittelbach

DEUTSCHER FORTSCHRITTSATLAS

Wie funktionieren Innovationen? Wie bringen sie uns vorwärts? Und was sind die entscheidenden Faktoren für ihren Durchbruch? Kurz: Was können wir von Innovatorinnen und Innovatoren lernen? Christoph Keese, Autor von *Silicon Valley* und *Silicon Germany*, begibt sich mit **Life Changer. Zukunft made in Germany (Penguin)** auf die Suche nach Antworten.

Das Buch ist vollgepackt mit Einblicken, wie Neues in die Welt gelangt und welche Hebelwirkung es dort entfalten kann. Natürlich darf Elon Musk mit SpaceX da genauso wenig fehlen wie BionTech. Richtig spannend aber wird es, wenn der Autor Storys aus deutschen Innovations-Labs berichtet: von CubeSat-Konstellationen zur Erderkundung und 5G-Kommunikation über deutsche Micro-Launcher-Projekte bis hin zum Einsatz industrieller Serienbauteile (COTS) im Orbit und Geo-Services für die Agrarwirtschaft – zahlreiche Themen finden sich übrigens auch in der DLR-Forschung wieder.

Doch das Buch ist kein bloßes Sammelsurium: Das „First Principle“ fungiert als roter Faden und gibt Orientierung. Gemeint ist, dass statt bloßer Verbesserung von Produkten grundlegende Bedürfnisse identifiziert und bestmöglich bedient werden sollen. Dabei unterscheidet Keese zwischen „echten Innovationen“, die Leben, Gesundheit, Sicherheit oder Umwelt fundamental verbessern, und vermeintlichen „Neuerungen“, die zwar angenehm sind, aber ansonsten wenig bewirken.

Life Changer zeigt die vieldimensionale Wirkung von Innovationen und schlägt gekonnt die Brücke von der Theorie zur Praxis. Der Autor beweist ein gesundes Marktverständnis und ist ein exakter Beschreiber; er zoomt in die Materie hinein und findet Analogien ebenso wie Einzigartiges. All das macht das Buch zu einer spannenden Pflichtlektüre für Innovationsbegeisterte.

Robert Klarner



VON ENTDECKUNGEN UND ENTBEHRUNGEN



Eiskalt ist der Kontinent Antarktika und darüber hinaus schwer zugänglich. Auch nach seiner Entdeckung vor etwa 200 Jahren dauerte es weitere 100 Jahre, bis ein Mensch die Antarktis durchquerte und den Südpol erreichte. Heute ist die Antarktis ein wichtiger Ort für Klima-, Meeres- und Umweltforschung und durchgehend von Forschenden bewohnt. Auch für Biologinnen und Biologen ist sie interessant, denn auf dem kilometerdicken Eis fühlt sich eine Spezies besonders wohl: die Pinguine.

Sie waren es auch, die den neuseeländischen Wissenschaftler und Autoren Lloyd Spencer Davis in den Siebzigern zum ersten Mal in die Antarktis lockten. In der Vorbereitung auf seine Forschung stieß Davis auf den in Vergessenheit geratenen

Polarforscher George Murray Levick, der 1910 zusammen mit einer Gruppe um den britischen Abenteurer Robert Falcon Scott den Südpol erreichen wollte. Die Sache wurde kompliziert und Levick sowie fünf Mitstreiter mussten ein halbes Jahr in Eis und Schnee ausharren. In **Das geheime Liebesleben der Pinguine (DVA)** erzählt Lloyd Spencer Davis die Geschichte Murray Levicks und wie er, lange bevor in der Antarktis strukturell geforscht wurde, als Erster Adeliepinguine studierte und eine interessante Entdeckung machte: Ihr Liebesleben ist dem unseren erstaunlich ähnlich.

Davis verknüpft seine eigene Forschung an Adeliepinguinen mit der von Murray Levick. Basierend auf fundierten Recherchen zeichnet er ein Bild der Antarktisforschung, welches von den abenteuerlichen Anfängen rund um die berühmten Pioniere Roald Amundsen, Fridtjof Nansen, Robert Falcon Scott und Ernest Shackleton bis in die heutige Zeit reicht. Plastisch schildert er Schmerz, Entbehrungen, Robbenfleisch, Waltran und den Tod als ständigen Begleiter. Und er zeichnet das Bild eines Mannes, der im Kampf um das eigene Überleben sein Interesse an diesen galanten Vögeln entdeckte – ein kluger Spagat und eine spannende Lektüre.

Timo Küsters

VON MENDEL BIS ZUR GENSCHERE



Wie funktioniert Vererbung? Welche Rolle spielen die Gene dabei? Was ist eigentlich DNA? Und was haben all diese Erkenntnisse mit einem neugierigen Mönch im Jahr 1856 zu tun? Diese Fragen beantworten die Autorin Carla Häfner, die selbst Ärztin ist, und die Illustratorin Mieke Scheier in **Der Code des Lebens (Knesebeck)**. Die beiden führen kleine oder große Leserinnen und Leser durch das spannende und breit gefächerte Gebiet der Genetik und begeben sich auf eine Entdeckungsreise zu den kleinsten Bestandteilen des Körpers. Die grafischen Darstellungen geben einen kindgerechten Einblick in die komplexe Wissenschaft. Im Fokus steht die Antwort auf die Frage, warum du so bist, wie du bist. Aber das Buch behandelt auch aktuelle Ergebnisse der Genforschung und -technik. Hierbei erfahren

die jungen Leserinnen und Leser beispielsweise, dass sich damit sowohl das Erbgut von Menschen als auch das von Pflanzen verändern lassen. Häfner und Scheier ist es ausgezeichnet gelungen, das breite Thema verständlich darzustellen, ohne dabei die Zielgruppe aus den Augen zu verlieren. Das Buch wird empfohlen für Kinder ab zehn Jahren. Nicht zuletzt ist es eine gute Ergänzung zum oder Vorbereitung auf den Biologieunterricht in der Schule.

Celina Jacobi

LINKTIPPS

DAS „ALLPHABET“

planetarium.berlin/kinderpodcast-abgespaced-der-weltraum-von-bis-z

„Abgespaced“ bringt Kindern in anschaulicher Weise den Weltraum und seine spannenden Themen näher. Buchstabe für Buchstabe geht ein Team aus jungen Reporterinnen und Reportern, begleitet von einer Moderatorin, durch das Alphabet und durchleuchtet verschiedene Themen: von A wie Astronautin/Astronaut bis Z wie Zwergplanet. So gelingt ein unterhaltsames Programm mit pädagogischem Wert.

GAS SPAREN LEICHT GEMACHT

verbraucherzentrale.de/wissen/energie

Nicht nur vor dem Hintergrund der derzeitigen Krise ist es unabdingbar, Ressourcen und Energie zu sparen. Es schont Umwelt und Geldbeutel und ist häufig gar nicht so schwer. Die Internetseite der Verbraucherzentrale gibt wertvolle Tipps, wie sich der Gasverbrauch schon mit einigen wenigen Handgriffen senken lässt. Darüber hinaus berät die Verbraucherzentrale kostenlos und unabhängig über Themen wie Versicherungen oder Ernährung.

EIN MEER AUS VERNETZUNGEN

youtu.be/zGg5MhXizUc

Der Ozean umfasst 90 Prozent des belebten Raums der Erde und beherbergt Millionen unbekannter Arten, Lebensgemeinschaften und Landschaften. Über deren Dynamik, Anpassung und Resilienz ist wenig bekannt. So weit entfernt, wie diese Regionen auch scheinen mögen, sie sind mit uns vernetzt. In diesem Vortrag, den Prof. Dr. Antje Boetius dieses Jahr auf der Messe re:publica gehalten hat, thematisiert die Direktorin des Alfred-Wegener-Instituts die internationalen Ziele für den nachhaltigen Umgang mit den Ozeanen und Polarregionen und was diese mit uns zu tun haben.

SCHÖNHIT JENSEITS DES TELLERRANDS

webb.nasa.gov

Vor einem Jahr startete das James Webb Space Telescope (JWST) von Französisch-Guyana, um einen Punkt, 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt, näher zu betrachten. Fernab jeglicher Zivilisation blickt JWST tief ins All hinein auf der Suche nach erdähnlichen Planeten und nach Antworten zur Entstehung unseres Universums. Die ersten Bilder zeigten prächtige Staubwolken und das letzte Flackern eines sterbenden Sterns und begeisterten die Öffentlichkeit. Aber auch jetzt lohnt sich der Blick in die Bilderbibliothek vom Rande des Kosmos.

CHRONOLOGIE DER PLANETENFORSCHUNG

raumfahrtmissionen.dlr.de

Wer wissen möchte, wie viele Sonden auf dem Mond gelandet sind oder wann genau Voyager I gestartet ist, wird hier fündig. Im Archiv der Raumfahrtmissionen sind alle Missionen versammelt, mit denen die Planeten und Monde des Sonnensystems erforscht wurden. Auch geplante Missionen sind hier aufgelistet. Die Plattform ist ein Service der planetaren Bildbibliothek (RPIF) am Institut für Planetenforschung des DLR.

Titelbild

Das Titelbild des DLRmagazins 171 zeigt die Testanlage für Wärmespeicherung in Salzschnelzen (TESIS). Die Forschungsanlage des DLR-Instituts für Technische Thermodynamik in Köln ist die erste für Flüssigsalzspeicher und -technologie in diesem Maßstab in Deutschland. Hier kann die Industrie Komponenten zur Flüssigsalzspeicherung unter realen Einsatzbedingungen erproben. Anwendungsfelder sind energieintensive Industrieprozesse wie bei der Produktion von Stahl, Eisen, Nichteisenmetallen, Glas, Zement oder chemischen Produkten. Flüssigsalzspeicher können in diesen Prozessen die Energieeffizienz steigern und einen Beitrag zur Wärmewende liefern.

