

## BAHN DIGITAL

DAS DLR MACHT DIE SCHIENE FIT FÜR DIE ZUKUNFT

Weitere Themen:

- ▶ **ALLES NEU?**  
Was für klimaneutrales Fliegen alles mitgedacht werden muss
- ▶ **MIT HUNDERT EXPERIMENTEN INS ALL**  
Ambitioniertes Forschungsprogramm auf der ISS

## 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

Druck: AZ Druck und Datentechnik GmbH, 87437 Kempten  
 Gestaltung: CD Werbeagentur, Burgstraße 17, 53842 Troisdorf, www.cdonline.de  
 ISSN 2190-0094

Online lesen:

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

Onlinebestellung:

[DLR.de/magazin-abo](https://www.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.



Gedruckt auf umweltfreundlichem, chlorfrei gebleichtem Papier.



## NEUE FORMEN DES AUSTAUSCHS

Von der EXPO 2020 über das 60-jährige Jubiläum des DLR-Standorts Stuttgart bis hin zum jährlich stattfindenden Astroseminar, auf dem Interessierte in 2022 mehr über Schwarze Löcher erfahren können: Das DLR und seine Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sind auf den unterschiedlichsten Veranstaltungen präsent – online und vor Ort. Denn während Events aufgrund der Pandemie im letzten Jahr ausschließlich virtuell stattfanden, sind mittlerweile – mit den entsprechenden Nachweisen – sogar wieder Präsenz-Veranstaltungen möglich.



Der Messestand des DLR auf dem ITS Kongress (Intelligent Transport Systems) 2021

Doch die Pandemie brachte auch ganz neue Formate hervor: So entstanden virtuelle Messestände, auf denen sich die Gäste durch Bildergalerien und Vortragsräume bewegten, oder es wurden mit zunehmenden Lockerungen sogenannte Hybrid-Veranstaltungen durchgeführt – ein Mix aus online und analog. Vortragende, die nicht anreisen können, vermitteln ihre Inhalte via Livestream, Interessierte, die nicht an der Veranstaltung teilnehmen können, haben die Möglichkeit, die Vorträge später im Online-Archiv abzurufen. Auch aus Nachhaltigkeitsaspekten haben sich die Formate bewährt, denn sie bedeuten weniger Reisen und weniger Müll, der sonst beim Abbau der Messestände entstanden wäre. Nichtsdestotrotz kann ein Austausch im virtuellen Konferenzraum kaum ein reales Gespräch ersetzen. Auch wenn Präsenz-Veranstaltungen aktuell wieder zunehmen, werden die hybriden Formate wohl kaum wieder gänzlich verschwinden, zu groß sind ihre Vorteile. Gleichzeitig wird im DLR beständig an innovativen Formaten für Events gearbeitet, um die Weichen zu stellen, wie wir uns in Zukunft austauschen werden.

Alle Veranstaltungen von und mit dem DLR finden Sie unter [event.DLR.de](https://www.event.dlr.de).



Ausschnitt aus der neuen DLR-Plattform zur Planung von Events

## Liebe Leserinnen und liebe Leser,

um die Klimaziele im Bereich Verkehr zu erreichen, spielt ein hochmoderner, klimafreundlicher Schienenverkehr eine wichtige Rolle. Dieser sollte sowohl unter wirtschaftlichen als auch unter ökologischen und gesellschaftlichen Gesichtspunkten auf Dauer tragfähig sein. Automatisierung, neue Kommunikationstechnologien und -standards sowie der Einsatz von maschinellem Lernen und künstlicher Intelligenz haben das Potenzial, den Bahnverkehr wesentlich attraktiver und wettbewerbsfähiger zu machen. Die DLR-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler arbeiten deshalb an neuen Ideen, Konzepten und Technologien, um die Schiene fit für die Zukunft zu machen.

Doch auch die Luftfahrt hat Veränderung nötig. Gerade unter dem Aspekt des klimaneutralen Fliegens müssen Antriebe und Routenplanung neu überdacht werden. Dazu hat das DLR eine neue Luftfahrtstrategie veröffentlicht. Ihr Ziel ist es, das Wachstum der Luftfahrtbranche von der Umweltbelastung zu entkoppeln. Ein Weg, den Ausstoß klimaschädlicher Gase zu vermindern, könnte Wasserstoff sein. Doch ist es möglich, alles darauf umzurüsten? Und vor allem: Ist es sinnvoll? Darüber unterhalten sich eine Klimaforscherin, ein Luftfahrtantriebsingenieur und eine Energieforscherin im Interview.

Weitere Themen dieses Dezember-Heftes sind die Mission Cosmic Kiss des ESA-Astronauten Matthias Maurer, der nach mehreren Startverschiebungen wohlbehalten auf der Internationalen Raumstation ISS angekommen ist und dort mit seiner Arbeit begonnen hat, DLR-Technologien, die gemeinsam mit einer Hilfsorganisation im Hinblick auf Katastropheneinsätze weiterentwickelt werden, sowie ein Versuch in der ehemaligen TITAN-Druckkammer, bei dem Taucher im DLR eine Tiefe von mehr als 600 Metern erreichten – ganz ohne Wasser.

Wir wünschen Ihnen eine unterhaltsame Lektüre und besinnliche Feiertage. Kommen Sie gut ins neue Jahr.

Ihre Redaktion

# DLRmagazin 169



BAHN DIGITAL

8



MIT HUNDERT EXPERIMENTEN INS ALL

28



FERNE MONDE UND MEERE

32



ALLES NEU?

16



AUF DEN SPUREN DER ZEIT

36



KLEINE KRISTALLE, GROßE WIRKUNG

24



ENTSPANNTE INSPEKTION

20



RAUMFAHRT TRIFFT SPIRITUALITÄT

54

|   |    |
|---|----|
| <b>MELDUNGEN</b>  | 6  |
| ▶ <b>BAHN DIGITAL</b><br>Ideen für die Zukunft auf der Schiene                                | 8  |
| <b>FIT FÜR VERÄNDERUNG</b><br>Die neue Luftfahrtstrategie des DLR                             | 14 |
| ▶ <b>ALLES NEU?</b><br>Ein Gespräch über klimaneutrales Fliegen                               | 16 |
| <b>ENTSPANNTE INSPEKTION</b><br>Instandhaltungsprozesse bei Flugzeugen verbessern             | 20 |
| <b>ACHTUNG, ACHTUNG!</b><br>Ein Warnsystem soll Vogelschläge verhindern                       | 22 |
| <b>KLEINE KRISTALLE, GROßE WIRKUNG</b><br>HALO untersucht Kondensstreifen und kalte Eiswolken | 24 |
| <b>EINE STÄTTLICHE FLOTTE</b><br>Überblick über die DLR-Forschungsflugzeuge                   | 26 |
| ▶ <b>MIT HUNDERT EXPERIMENTEN INS ALL</b><br>Ambitioniertes Forschungsprogramm auf der ISS    | 28 |
| <b>FERNE MONDE UND MEERE</b><br>DLR-Instrumente werden Jupiters Trabanten vermessen           | 32 |
| <b>AUF DEN SPUREN DER ZEIT</b><br>Ein neues Höhenmodell des Satellitenduos TanDEM-X           | 36 |
| <b>VOLL VERSPIEGELT</b><br>Solarthermische Turmkraftwerke                                     | 40 |
| <b>DIE PFADFINDERIN</b><br>Wie Algorithmen mithilfe von Quanten lernen                        | 42 |
| <b>WENN JEDE MINUTE ZÄHLT</b><br>Humanitäre Hilfseinsätze mit I.S.A.R. Germany                | 46 |
| <b>STADT, MENSCH, ZUKUNFT</b><br>Die Modellprojekte Smart Cities                              | 48 |
| <b>NACHGEFRAGT</b><br>DLR-Forscherinnen und -Forscher antworten                               | 51 |
| <b>TIEFTAUCHEN OHNE WASSER</b><br>Ein außergewöhnlicher Versuch in der Druckkammer            | 52 |
| <b>RAUMFAHRT TRIFFT SPIRITUALITÄT</b><br>Die Tom-Sachs-Ausstellung in den Deichtorhallen      | 54 |
| <b>FEUILLETON</b>   | 56 |

## DER MARS IST ANGEBOHRT

Seit dem 18. Februar 2021 befindet sich der NASA-Rover Perseverance im Krater Jezero auf dem Mars. Das DLR ist an der Mission wissenschaftlich beteiligt und bearbeitet unter anderem die Fotos der MastCam-Z, mit der die Geologie der Umgebung festgehalten wird. An dem nach einer französischen Kleinstadt benannten Felsen La Rochette, auf Deutsch „kleiner Felsen“, hat Perseverance im September zwei schulkreidegroße Gesteinsproben genommen und in Metallhülsen verstaut. Es sind die ersten erbohrten Proben eines anderen Planeten. Mithilfe dieser Proben möchten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Frage beantworten, ob in der Frühzeit des Mars, als noch Wasser über seine Oberfläche strömte, Lebewesen dort existiert haben könnten. Die Proben von dem heute eiskalten, staubtrockenen und unwirtlichen Planeten sollen Anfang der 2030er Jahre von Nachfolgeemissionen der ESA und NASA zur Erde gebracht werden.

In dem Felsen La Rochette sind die beiden Löcher zu erkennen, die der Rover Perseverance im September 2021 gebohrt hat. Unter dem Loch auf der rechten Seite ist eine runde Stelle zu sehen, an der der Rover einen Teil der Gesteinsoberfläche abgeschliffen hat.



NASA/JPL-Caltech



5G gilt als Schlüsseltechnologie für die digitale Gesellschaft.

## FAHREN UND HEIZEN MIT WASSERSTOFFAUTOS

Wasserstoffautos können mehr als nur fahren, sie können auch als mobile Kraftwerke fungieren: Die Brennstoffzellen der Fahrzeuge sind in der Lage, hohe Leistungen an Strom und Wärme zu liefern. Außer für den Antrieb der Fahrzeuge lassen sich die Zellen als unabhängige Aggregate einsetzen oder an Stromnetze anschließen. So können Wasserstoffautos als dezentrale Energiespeicher dazu beitragen, Schwankungen erneuerbarer Energien auszugleichen und die Verteilernetze zu stabilisieren. Die DLR-Institute für Fahrzeugkonzepte und Vernetzte Energiesysteme entwickeln Verfahren, wie sich die Energieflüsse zwischen Fahrzeugen, Verbrauchern und Verteilernetzen koordinieren lassen. Die Fachleute erproben dies mithilfe eines umgebauten Wasserstoffautos. Dafür haben sie die Brennstoffzelle des Fahrzeugs mit externen Anschlüssen ausgestattet. Mit seinem Tankinhalt von 6,3 Kilogramm Wasserstoff kann das Fahrzeug rund 100 Kilowattstunden Strom erzeugen. Das entspricht ungefähr dem durchschnittlichen Verbrauch eines Einpersonenhaushalts pro Monat. In den Brennstoffzellen entsteht dabei Abwärme. Mit aktuell 20 Kilowatt Wärme- und elektrischer Leistung lässt sich mit dem Fahrzeug bereits ein modernes Haus beheizen.



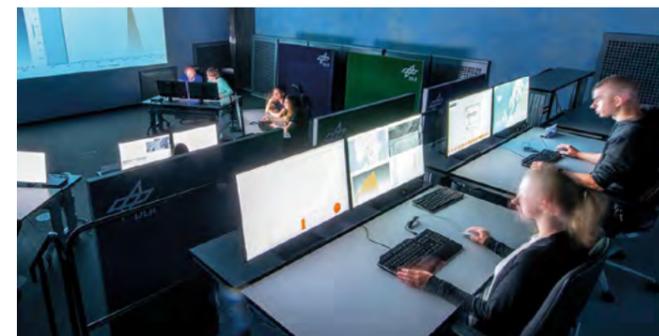
Wasserstoffautos auf dem DLR-Gelände in Stuttgart

## 5G GEMEINSAM TESTEN

Im 5G-Reallabor erforscht das DLR gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie, welche Vorteile der Mobilfunkstandard 5G in der Praxis hat. Sein Herzstück ist die Software-Plattform, die Fahrzeuge, Infrastrukturelemente, Daten-Plattformen und Dienste vernetzt. Interessierte Unternehmen, Kommunen und Städte können die Ergebnisse des Reallabors über das 5G-Forum nutzen, sich selbst einbringen und in der Infrastruktur des Reallabors Anwendungsfälle erproben. Im Bereich Mobilität testen die Forschenden beispielsweise den Einsatz einer Rettungsdrohne.

Aber auch für immer komplexer werdende Bauprojekte bietet 5G eine Lösung: Im Sommer 2021 untersuchten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gemeinsam mit Assmann Beraten + Planen im Rahmen eines Industriebaus verschiedene 5G-Anwendungsfälle. Die Forschenden der TU Braunschweig beteiligten sich ebenfalls am 5G-Reallabor und bewerteten verschiedene Standards für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen.

## KOORDINIERUNGSZENTRUM FÜR DEN START VON KLEINSATELLITEN



Der erste Demonstrator des Launch-Coordination-Centers wird am Braunschweiger DLR-Institut für Flugführung aufgebaut. Die Basis bildet unter anderem der Airport and Control Center Simulator (ACCES).

Fachleute rechnen damit, dass im aktuellen Jahrzehnt mehr als 15.000 Satelliten starten werden, viele von ihnen mit kleineren Raketen, sogenannten Micro-Launchern. Häufen sich die Starts, müssen diese mit der Luft- und Seefahrt koordiniert werden. Dazu baut das DLR in Braunschweig ein Launch-Coordination-Center auf. Ein erster Demonstrator soll zeigen, wie zukünftig eine Vielzahl an Starts und Wiedereintritten mit Abläufen in der Luft- und Seefahrt sicher koordiniert werden kann. Das Koordinierungszentrum wird mit softwaregestützten Verfahren eine sichere, effiziente und flexible Durchführung von Raumfahrtaktivitäten beim Start und beim Wiedereintritt ermöglichen. Missionen sollen von der Planung über die Echtzeitüberwachung bis hin zur Auswertung begleitet und unterstützt werden. Bis zum Jahr 2024 wird der erste Demonstrator durch das DLR-Institut für Flugführung mit Unterstützung des DLR-Technologiemarketings aufgebaut.

## EIN TESTFELD FÜR BRENNSTOFFZELLEN



Schematische Darstellung des BALIS-Testfelds, auf dem Brennstoffzellen für die Luftfahrt entwickelt werden sollen

Auf dem Innovationscampus Empfingen im Nordschwarzwald entsteht auf 2.000 Quadratmetern ein Testfeld, auf dem Antriebe für verschiedene Verkehrsträger, beispielsweise Flugzeuge, entwickelt und erprobt werden können. Im Fokus stehen Brennstoffzellen-Systeme mit einer Leistung von rund 1,5 Megawatt. Solche Antriebe wären geeignet, um Regionalflugzeuge mit 40 bis 60 Sitzen und einer Reichweite von 1.000 Kilometern anzutreiben. Das DLR-Institut für Technische Thermodynamik verantwortet das Projekt BALIS. Das Testfeld bildet das Gesamtsystem ab, also sowohl die Hardware als auch die Infrastruktur mit Brennstoffzellen-Systemen, Wasserstofftanks, Elektromotoren sowie Steuerungs- und Regelungstechnik. Erste Versuche sollen 2023 starten.

## REGIONALMELDUNGEN

**OBERPFÄFFENHOFEN:** Im neu eröffneten Galileo-Kompetenzzentrum arbeiten DLR-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler an der Weiterentwicklung des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo. Unter anderem analysieren sie dessen Performance und entwickeln, testen und bewerten neue Ideen und vielversprechende Technologien.

**BRAUNSCHWEIG:** Das DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik hat einen VRU-Simulator entwickelt und gebaut. VRU steht für Vulnerable Road Users und der Name ist Programm: Radfahrerinnen und Fußgänger sind die verletzlichsten Teilnehmenden im Straßenverkehr. Bisher wurden sie in der Forschung rund um das automatisierte Fahren allerdings noch nicht ausreichend berücksichtigt. Nun können die Forschenden das gesamte System Straße in zukünftige Simulationen einbeziehen.

**KÖLN:** Der im DLR entwickelte Biofilter C.R.O.P.® bereitet stickstoffhaltige Abwässer in einem rein biologischen Verfahren zu einer Düngemittellösung auf. Im Herbst wurde der Biofilter erfolgreich zur biologischen Gülleaufbereitung eingesetzt. Dabei arbeiteten die Fachleute des DLR zusammen mit Landwirtinnen und Landwirten, um den Filter zunächst zu optimieren und ihn dann auf den Feldern zu testen.

**NEUSTRELITZ:** Laut Bundesverkehrswegeplan soll bis zum Jahr 2030 der Güterverkehr mit Binnenschiffen innerhalb Deutschlands um 23 Prozent wachsen. In dem Projekt DigitalSOW untersuchen die Forscherinnen und Forscher des DLR-Instituts für Kommunikation und Navigation, welche Potenziale im hochautomatisierten beziehungsweise autonomen Binnenschiffsverkehr stecken. Als Testumgebung soll das digitale Testfeld Spree-Oder-Wasserstraße dienen, an dessen Aufbau das DLR beteiligt ist.

**ST. AUGUSTIN:** Ende November wurde das DLR-Institut für den Schutz terrestrischer Infrastrukturen eröffnet. Dort werden digitale Modelle entwickelt, die helfen, Schwachstellen von Anlagen zu finden. Zu den kritischen Infrastrukturen zählen unter anderem Wasser- und Energieversorgung, Straßen oder Behörden. Das junge Institut gliedert sich in die Abteilungen „Resilienz – Modelle und Methoden“, „Detektionssysteme“ sowie „Digitale Zwillinge für Infrastrukturen“.

**AUGSBURG:** Auf dem Gelände des Augsburg Innovationsparks haben die Bauarbeiten für das DLR-Institut für Test und Simulation für Gasturbinen begonnen. In dem neuen Institutsgebäude sollen künftig Werkstoffe, Bauteile und ganze Triebwerke mithilfe des „Virtuellen Triebwerks“ geprüft und optimiert werden. Das geplante Bauwerk umfasst ein viergeschossiges Bürogebäude einschließlich Labore sowie eine große Halle mit Infrastruktur für die Prüfstände. Es soll Ende 2023 fertiggestellt sein.

**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)



morgen ist groß: „Ein hochmoderner und klimafreundlicher Schienenverkehr spielt eine zentrale Rolle bei der Verkehrswende“, ist sich Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer sicher. Er ist Mitglied des DLR-Vorstands und verantwortlich für Innovation, Transfer und wissenschaftliche Infrastrukturen. „Personen- und Güterverkehrsaufkommen werden global weiter steigen bei gleichzeitig wachsendem Bedürfnis nach möglichst klimaneutraler Mobilität. In dieser Situation kann eine intensivere Nutzung des Schienenverkehrs ein wichtiger Teil der Lösung sein.“

*„Mit zunehmender Automatisierung ändert sich die Rolle des Menschen – statt selbst vor Ort aktiv zu sein, behebt er Fehler oder überwacht, prüft und kümmert sich um die Wartung.“*

Dr. Jan Grippenkoven

#### Der automatisierte Bahnbetrieb und der menschliche Faktor

Im Straßenverkehr ist das automatisierte und vernetzte Fahren Megatrend und Innovationstreiber. Im Schienenverkehr sind fahrerlose U-Bahnen und Metros bereits heute in vielen europäischen Städten unterwegs. Automatisiert fahrende Güterzüge transportieren im australischen Outback Eisenerz zu den Verladehäfen an der Küste. In manchen Bereichen zählt die Schiene also zu den Vorreitern bei der Automatisierung. Auf das gesamte Schienennetz lässt sich diese Entwicklung jedoch nicht so einfach übertragen. Denn nutzen Hochgeschwindigkeitszüge über weite Teile dasselbe Streckennetz wie die wesentlich langsameren Personen- und Güterzüge, macht das die Ausgangslage für einen automatisierten und vernetzten Bahnbetrieb erheblich komplizierter. Neben der Technik wird also auch der Mensch weiterhin eine wichtige Rolle spielen.

„Mit zunehmender Automatisierung ändert sich die Rolle des Menschen – statt selbst vor Ort aktiv zu sein, behebt er Fehler oder überwacht, prüft und kümmert sich um die Wartung. Dabei ist es wichtig, zu erkennen und zu verstehen, ob die Automation fehlerhaft ist, unvorhergesehen agiert und warum“, erläutert Dr. Jan Grippenkoven. Er arbeitet am DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik, wo das Zusammenspiel zwischen Mensch und Automation im Bahnbereich untersucht wird. Unter anderem erforschen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in Studien mit speziellen Simulatoren, welche psychologischen Herausforderungen damit verbunden sind. Ein Beispiel ist das RailSET-Testlabor (Railway Simulation and Environment for Train drivers and operators). Es bildet den Arbeitsplatz und die Aufgaben von Triebfahrzeugführenden realitätsgetreu ab – als virtuelle Schienenstrecke einschließlich Signalen und Bahnübergängen. Neben Informations- und Assistenzsystemen können auch unterschiedliche Automatisierungsgrade simuliert werden. „Schon bei einem niedrigen Automatisierungsgrad kommt es schnell zu Monotonie- und Ermüdungseffekten. Man verliert den konzentrierten Blick für die Situation und hat nur noch eingeschränkt die Fähigkeit, schnell einzugreifen. Die Wahrscheinlichkeit für Fehler steigt“, erläutert Grippenkoven. Triebfahrzeugführende und Fahrdienstleitende dürfen nicht vollständig von den Prozessen entkoppelt werden und müssen den Stellenwert ihrer Aufgabe kennen. Denn sie sind verantwortlich für hunderte von Passagieren und Tonnen von Fracht.

Im Projekt Next Generation Train entwickeln die DLR-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler neue Konzepte für den zukünftigen Schienenverkehr. Hier ist die komplette Zug-Familie vereint: bestehend aus dem Zubringer NGT-Link, dem NGT-Hochgeschwindigkeitszug und dem NGT Cargo für den Güterverkehr. (von links)



Im RailSET können die Arbeitsplätze von Triebfahrzeugführenden und Fahrdienstleitenden realitätsgetreu abgebildet werden. So können Einflussfaktoren beliebig variiert und ihre Auswirkungen auf den Menschen untersucht werden. Der Simulator steht im DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik in Braunschweig.

# BAHN DIGITAL

Mit innovativen Ideen, Konzepten und Technologien macht das DLR die Schiene fit für die Zukunft

von Denise Nüssle

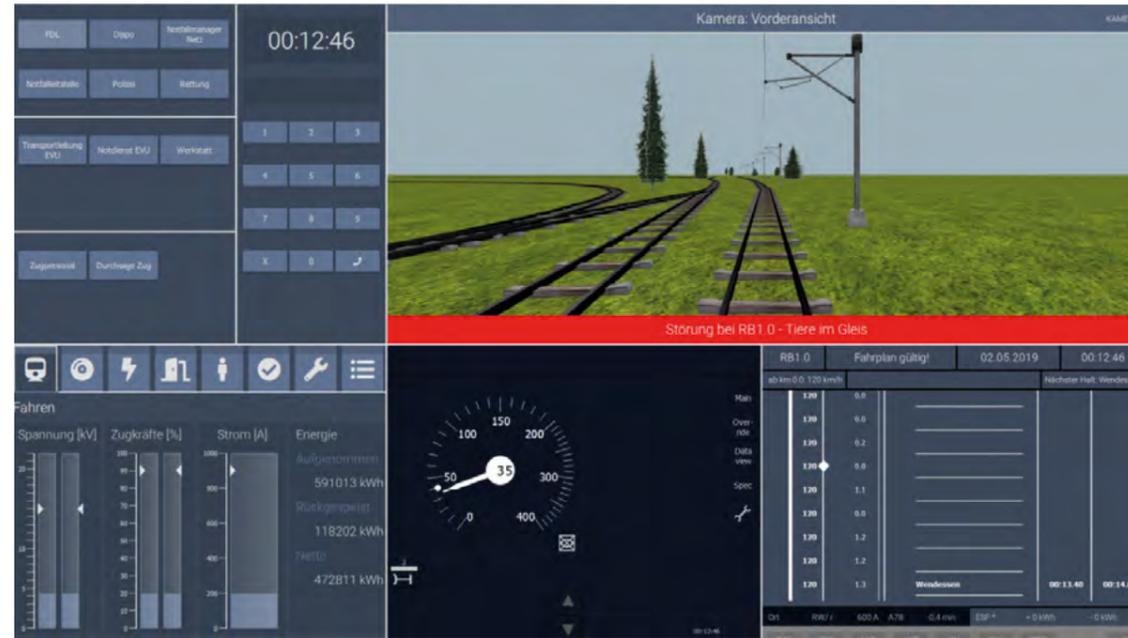
**D**ie Eisenbahn zählt zu den bedeutendsten Erfindungen der Industrialisierung. Mit damals unvorstellbaren Geschwindigkeiten transportierte sie Personen und Güter über weite Distanzen. Längst ist die Welt von Loks, Waggons und Schiene mit viel Hightech verbunden. Nun steht die Bahn vor einer neuen Herausforderung: dem Aufbruch in die Welt der Digitalisierung und Automation. Die Expertinnen und Experten der DLR-Verkehrsforschung sind sich sicher: Auf der Schiene geht was – und zwar ziemlich viel, wie dieser Einblick zeigt.

Automatisierung, neue Kommunikationstechnologien und -standards sowie der Einsatz von maschinellem Lernen und künstlicher Intelligenz haben das Potenzial, den Bahnverkehr wesentlich attraktiver und wettbewerbsfähiger zu machen. Sie ermöglichen deutlich

höhere Kapazitäten auf den Gleisen und insgesamt mehr Effizienz. Gleichzeitig versprechen sie weniger Energieverbrauch sowie ein Plus an Sicherheit, Pünktlichkeit und Komfort. Der Bedarf an zukunftsweisenden Technologien und innovativen Lösungen für die Schiene von



Das RailSET-Labor des DLR



Treten Störungen auf, könnte ein sogenannter Remote-Train-Operator die Züge in Zukunft fernsteuern. Dieser sitzt in einer Leitzentrale und arbeitet mit einem Programm, das alle wichtigen Vorgänge in Echtzeit visualisiert.



Untersuchung des Verkehrsverhaltens an einem Bahnübergang in Braunschweig. Die Ergebnisse zeigten, dass in durchschnittlich jeder sechsten Rotphase ein Verkehrsteilnehmer die Schienen illegal überquerte.

### Schlüsseltechnologien für die automatisierte Schiene: Zug-Zug-Kommunikation und Zuglokalisierung

Ein Zug setzt sich meist aus mehreren Wagen zusammen. Verfügen diese über einen eigenen Antrieb, heißen sie Triebwagen. Verbunden werden die einzelnen Zugteile bis heute mit mechanischen Kupplungen. Diese übertragen Zug- und Druckkräfte beim Beschleunigen beziehungsweise beim Bremsen. Weltweit gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher mechanischer Kupplungen, einige funktionieren halbautomatisch, andere vollautomatisch. Im Güterverkehr werden die einzelnen Wagen oft noch per Hand an- und abgehängt, was sehr aufwändig und zeitintensiv ist. Deshalb gibt es aktuell und europaweit Bestrebungen, auf „Digitale Automatische Kupplungen“ (DAK) umzurüsten. Damit werden Güterwagen sowie deren Strom-, Daten- und Druckluftleitungen automatisch verbunden.

Noch etwas weiter in die Zukunft denken die Forscherinnen und Forscher des DLR und setzen dabei auf neue Kommunikationstechnologien und -standards wie 5G-Mobilfunk und neuartige Lokalisierungsverfahren. Beim Konzept des „dynamischen Flügels“ fahren die einzelnen Zugteile in engem Abstand hintereinander. Sie sind dabei nicht mehr mechanisch verbunden, sondern nur noch digital. An die Stelle der realen Kupplung aus Metall tritt die virtuelle Kupplung auf Basis von Daten. So können sich Wagen und Züge während der Fahrt selbstständig zu längeren Einheiten verbinden und bei Bedarf wieder trennen. Damit das sicher funktioniert, muss die Distanz zwischen den Einheiten kontinuierlich berechnet und falls nötig korrigiert werden – natürlich alles ebenfalls digital und automatisiert. „Das dynamische Flügeln kann den Bahnbetrieb wesentlich flexibler und effizienter machen. Kürzere Abstände zwischen den Zügen beziehungsweise Zugteilen ermöglichen außerdem höhere Transportkapazitäten“, sagt Holger Dittus aus der Abteilung Fahrzeug-Energiekonzepte des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte. „Im Hochgeschwindigkeitsverkehr können Zwischenhalte nur von einem einzelnen Zugteil bedient werden, ohne dass der Hauptzug anhalten muss. So kann auch die Höchstgeschwindigkeit der vorhandenen Strecken besser ausgenutzt werden.“

*„Das dynamische Flügeln kann den Bahnbetrieb wesentlich flexibler und effizienter machen. Kürzere Abstände zwischen den Zügen beziehungsweise Zugteilen ermöglichen außerdem höhere Transportkapazitäten.“*

**Holger Dittus**



Die wichtigste technologische Voraussetzung und gleichzeitig die größte Herausforderung beim dynamischen Flügeln und virtuellen Kuppeln sind die sichere und schnelle Kommunikation zwischen den Zügen beziehungsweise Zugteilen und deren exakte Lokalisierung. Für beides gilt es, Lösungen zu finden, die unabhängig von der Schieneninfrastruktur sind und bei hohen Geschwindigkeiten funktionieren. Außerdem müssen sie redundant sein, damit der zuverlässige Betrieb auch gewährleistet ist, wenn ein System ausfällt. Globale Satellitennavigationssysteme sowie Radar- und Lidar-Sensoren nutzen Radiowellen beziehungsweise Laserstrahlen, um Position, Abstand und Geschwindigkeit zu messen. Außerdem untersucht und testet das DLR-Institut für Kommunikation und Navigation den Einsatz von Magnetfeldsignaturen. In der Schieneninfrastruktur (Gleise,



Leitungen, Brücken, Kabel, Stahlbetonmauern) ist viel Metall verbaut. Dieses beeinflusst das Magnetfeld, stört beispielsweise auch einen Magnetkompass. Die Störungen sind von Ort zu Ort unterschiedlich. „Genau das nutzen wir, um Informationen über Position, Gleis und Geschwindigkeit zu erhalten. Diese Methode funktioniert auch sehr gut in Tunneln“, ergänzt Dr. Andreas Lehner vom DLR-Institut für Kommunikation und Navigation.

Für die Kommunikation zwischen den Zügen oder Zugbestandteilen kann zum Beispiel Mobilfunktechnik zum Einsatz kommen. Wichtig sind dabei ebenfalls eine hohe Zuverlässigkeit, Sicherheit und kurze Latenzzeiten. Darunter versteht man die physikalisch bedingte Verzögerung beim Übermitteln von Daten. Beim neuesten Standard 5G liegt die Latenz bei bis zu unter einer Millisekunde. In diesem Kontext hat das DLR unter anderem ein neuartiges Modul entwickelt, das Funkwellen im Millimeterbereich überträgt – einem Frequenzbereich, der beim Mobilfunk in Zukunft mit 5G und 6G mehr genutzt werden soll. Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass sich damit eine stabile und sichere Kommunikation bis zu einer Distanz von rund 130 Metern aufbauen lässt.

Die Idee, das Magnetfeld der Erde zur Orientierung und Navigation zu nutzen, ist nicht neu, aus den Daten eines Magnetfeldsensors den ortsfesten Anteil herauszulesen und für eine Lokalisierung zu verwenden, allerdings schon. Das Projekt IMPACT untersucht diese neugedachte Art der Navigation. (Bild oben)

Der NGT-Hochgeschwindigkeitszug vernetzt Knotenpunkte schnell, effizient, komfortabel und sicher (links). Als Zubringer dient der NGT-Link (Mitte).

## Intelligente Güterwagen und intermodales Cargo-Terminal

Aktuell beherrschen „Ganzzüge“ den Güterverkehr. Sie transportieren eine große, einheitliche Frachtmenge, wie beispielsweise Autos oder Container. Der sogenannte Einzelwagenverkehr, bei dem ein Güterzug aus Waggons mit Fracht von unterschiedlichen Auftraggebern besteht, ist mit aufwändigen Prozessen und starren Betriebsabläufen verbunden. 30 bis 40 Prozent der Kosten fallen allein für das Zusammenstellen und Trennen des Zuges an. Zahlreiche manuelle Kupplungsvorgänge führen zu langen Stillstandzeiten der Wagen. So kommt es, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit in Deutschland im Einzelwagenverkehr nur 18 Kilometer pro Stunde beträgt. Vor allem für die Wachstumsbranchen Kurier-Express-Paket-Dienstleistungen, Lebensmittel und Stückgut ist die Schiene daher wenig attraktiv. Um das zu ändern, arbeitet ein Team aus mehreren DLR-Instituten im Rahmen des Großprojekts Next Generation Train (NGT) an einem zukunftsweisenden Konzept für den Güterverkehr auf der Schiene. Es umfasst einen Gütertriebwagenzug, den NGT Cargo, und einen neuartigen Güterbahnhof, das Next Generation Station (NGS) Logistics Terminal.

Das Ziel des NGT Cargo ist es, die Transportzeiten zu verkürzen, flexibler und pünktlicher zu sein sowie die Kosten zu senken. Erreichen wollen das die Forscherinnen und Forscher, indem sie das Zugkonzept – wo immer möglich – modular gestalten und für alle Einzelwagen eine eigene, unterbrechungsfreie Stromversorgung vorsehen. „Das ist die Grundlage für jede Form von Automatisierung und unabdingbar für die zuverlässige Datenkommunikation und die Digitalisierung vieler fahrzeugseitiger Funktionen“, erklärt David Krüger vom DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte.

Die automatisiert fahrenden NGT-Cargo-Züge werden je nach Bedarf aus Einzelwagen und leistungsstarken Triebköpfen zusammengestellt und automatisch gekuppelt. Der Zugverbund bleibt so lange zusammen, wie es logistisch Sinn ergibt, danach trennen sich die Wege der einzelnen Wagen wieder. „Jeder einzelne intelligente Güterwagen kennt seinen Bestimmungsbahnhof und erhält aus der Verkehrsleitstelle gegebenenfalls Updates. Er verfügt über einen eigenen Antrieb, der auf Elektromotoren basiert, und über eine Batterie, welche die beim Bremsen zurückgewonnene Energie speichert. Dadurch können die



Regallager im Logistics-Terminal-Konzept sind entlang der Zugwagen positioniert. Güter werden automatisch vorsortiert und direkt am Gleis zwischengelagert.



Einzelwagen selbstständig rangieren, Rangierpersonal und Rangierloks oder Oberleitungen entfallen“, beschreibt DLR-Wissenschaftler Krüger das Konzept. Außerdem können die Einzelwagen selbstständig die letzten Kilometer zum jeweiligen Kunden fahren. Dazu sind sie mit der entsprechenden Sensorik ausgestattet. So lassen sie sich zum Beispiel auch jederzeit lokalisieren und die Kunden können auf diese Weise exakte Angaben zum aktuellen Status und der erwarteten Ankunftszeit ihrer Fracht erhalten.

Das NGS Logistics Terminal ist der passende Bahnhof für diesen Zugverkehr. Es bildet die Schnittstelle zwischen dem NGT Cargo und dem lokalen Güterverkehr. An logistisch günstigen Knotenpunkten verknüpfen diese intermodalen Güterbahnhöfe die Schiene mit der Straße oder auch dem Luftraum. Autonom fahrende Lkw oder Lastenräder oder für besonders eilige Güter auch Drohnen überbrücken dann die „letzte Meile“ zum Ziel. Die Hauptbestandteile des Logistics Terminals sind Regallager, die entlang der Zugwagen positioniert sind. Hier werden die Güter vorsortiert und direkt am Gleis zwischengelagert. Die Vorsortierung, aber auch die Be- und Entladung funktioniert automatisch über Regalbediengeräte, Aufzüge und Rollböden.

*„Jeder einzelne intelligente Güterwagen verfügt über einen eigenen Antrieb, der auf Elektromotoren basiert, und über eine Batterie, welche die beim Bremsen zurückgewonnene Energie speichert. Die Einzelwagen rangieren selbstständig, Rangierpersonal, Rangierloks oder Oberleitungen entfallen.“*

David Krüger



NGT-Cargo-Triebkopf mit Einzelwagenanhängern und automatischer Kupplung

## Vorausschauende Instandhaltung

Das Schienennetz in Deutschland hat eine Länge von rund 38.000 Kilometern. Neben den Gleisen selbst müssen auch Stellwerke, Weichen und Oberleitungen regelmäßig überprüft und gewartet werden. Dies geschieht mit Messfahrzeugen und Begehungen mit entsprechenden Messgeräten. Solche aufwändigen und personalintensiven Verfahren sind notwendig, um Schäden ausfindig zu machen, Komponenten vorsorglich auszutauschen und den Zustand der Schieneninfrastruktur festzustellen. „Maschinelles Lernen und künstliche Intelligenz ermöglichen eine ganz neue Dimension, nämlich die vorausschauende Instandhaltung. Das heißt, wir erhalten zusätzlich eine Prognose, wie sich das Material beziehungsweise die Komponenten unter den gegebenen Bedingungen entwickeln werden. So kann man dem Risiko möglicher Schäden vorbeugen, Anlagenausfälle vermeiden und Wartungsarbeiten wesentlich gezielter vornehmen“, beschreibt Dr. Jörn Groos vom DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik das mögliche Zukunftsszenario.

Damit eine künstliche Intelligenz das leisten kann, muss sie zuvor mit jeder Menge Informationen gefüttert und immer wieder anhand von Beispielen trainiert werden. Daten von Sensoren und Kameras, die auf den Zügen mitfahren, spielen dabei eine wichtige Rolle. Mit ihrer Hilfe lässt sich ein sehr exaktes digitales Abbild der Infrastruktur erstellen. Auch historische Datenreihen sowie das Wissen und die Erfahrung von Expertinnen und Experten fließen in die Algorithmen und Modelle ein. Die DLR-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler arbeiten daran, Informationen systematisch zu erheben und datenwissenschaftlich so umzusetzen, dass eine künstliche Intelligenz damit arbeiten kann.

Im Bereich der Hafengebäude hat das DLR diese Technologie in die Praxis umgesetzt. Hafengebäude stellen den Transport von Gütern innerhalb von See- und Binnenhäfen sicher. Sie müssen jederzeit vollständig einsatzbereit sein, um auch zeitkritische Logistikaufträge zuverlässig abzuwickeln. Gemeinsam mit dem Bahntechnik-Unternehmen Vossloh Rail Services, dem Softwareentwickler IS Predict und der Hafengebäudegesellschaft Braunschweig hat das DLR eine

sogenannte eingebettete Zustandsüberwachung entwickelt und im Rangierbetrieb erprobt. Dazu stattete das Projektteam eine Rangierloks im Braunschweiger Hafen mit einem Multi-Sensor-System aus. Es bestand aus Kameras, Beschleunigungs- sowie Drehratensensoren, lieferte hochaufgelöste Bilddaten und maß kontinuierlich die Vibrationen. Daraus gewannen die Forschenden Informationen über den Zustand der Gleisinfrastruktur sowie die Positionsdaten. Gleichzeitig war das die Grundlage, um ein entsprechendes KI-basiertes Analyseverfahren zu entwickeln. Die Ergebnisse – also ein Überblick des aktuellen Zustands der Schienen sowie etwaiger Schäden – konnten die Anlagenverantwortlichen dann mittels einer interaktiven Karte einsehen. „Schon heute können solche Systeme wertvolle Informationen für die Betriebsleitungen kleiner Industriebahnen bereitstellen, um manuelle Inspektionen zielgerichteter und effektiver durchzuführen. Die Weiterentwicklung der Analyseverfahren wird es zukünftig erlauben, den Anteil manueller Inspektionen mit Aufenthalt im Gleisbereich immer weiter zu reduzieren“, fasst DLR-Forscher Groos zusammen.



Auch den Bahnhof der Zukunft denken die DLR-Forschenden neu: Als Mobilitäts-Hub verbindet und vernetzt er Menschen und Verkehrsträger möglichst effizient und nachhaltig.

## DIESE DLR-INSTITUTE UND -EINRICHTUNGEN FORSCHEN IM BEREICH SCHIENENVERKEHR:

- Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik
- Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie
- Institut für Datenwissenschaften
- Institut für Fahrzeugkonzepte
- Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
- Institut für Kommunikation und Navigation
- Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin
- Institut für Materialphysik im Weltraum
- Institut für Softwaretechnologie
- Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik
- Institut für Systems Engineering für zukünftige Mobilität
- Institut für Verkehrsforschung
- Institut für Verkehrssystemtechnik
- Institut für Werkstoffforschung

## Eine ganzheitliche Perspektive für die Zukunft

Die Welt der Schiene reicht von futuristischen Hochgeschwindigkeitszügen über den Intercity-, Regional-, Nah- und Güterverkehr und bildet so eine spannende und zugleich herausfordernde Ausgangssituation für die Wissenschaft. Gleichzeitig birgt sie enormes Marktpotenzial für Technologien und Geschäftsmodelle. „Die Schienenverkehrsforschung im DLR verfügt über umfassende Expertise in fast allen für den Bahnbereich relevanten Technologien und kombiniert diese mit einer ganzheitlichen Perspektive, die ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Aspekte vereint. So wird die Basis für erfolgreichen Transfer in den Markt gelegt. Unsere Forscherinnen und Forscher sind international gefragte Ansprechpartner, wenn es darum geht, bestehende Systeme zu optimieren und gänzlich neue Konzepte zu entwerfen – immer in enger Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie“, fasst Karsten Lemmer zusammen.

Denise Nüssle ist Presseredakteurin im DLR.



# FIT FÜR VERÄNDERUNG

Eine neue Strategie weist den Weg zur emissionsfreien Luftfahrt

von Andreas Klöckner und Falk Dambowksy

**D**ie Luftfahrt soll auch in Zukunft Menschen, Kulturen und Wirtschaftsräume auf der ganzen Welt verbinden. Damit dies möglich bleibt, ist eine umfassende Transformation notwendig, denn bis zur Mitte des Jahrhunderts sollen Wirtschaft und Gesellschaft im Rahmen des European Green Deal klimaneutral sein. Dafür muss das Wachstum des Luftverkehrs von der Umweltbelastung entkoppelt werden. Das bedeutet ein umfassendes Engagement in Forschung und Entwicklung. Dazu hat das DLR eine Luftfahrtstrategie vorgelegt, die den Forschungsweg zum klimaneutralen Fliegen vorzeichnet. Die Basis ist die Entwicklung deutlich effizienterer Flugzeuge, die weniger als halb so viel Energie benötigen wie heutige Modelle. Dafür müssen diese noch einmal deutlich leichter und aerodynamisch effizienter werden. Hier spielen sowohl neue Sensorik als auch eine innovative Flugregelung eine wichtige Rolle.

Um zukünftig nur noch Energie aus regenerativen Quellen in der Luftfahrt einzusetzen, sollen Flugzeuge passend zu Reichweite und Größe mit klimafreundlichen Antriebskonzepten und nachhaltigen Brennstoffen abheben. Das DLR erforscht ganzheitlich die optimale Kombination aus emissionsarmen Luftfahrtantrieben, energieeffizienten Flugzeugtechnologien und einem emissionsreduzierten Lufttransportsystem. Damit positioniert sich das DLR als virtueller Hersteller für eine beschleunigte Energiewende in der Luftfahrt. 25 Institute und Einrichtungen forschen in diesem Bereich. Dank ihrer Kompetenzen und Fähigkeiten sowie einer einzigartigen Forschungsinfrastruktur verfügt das DLR über ein breites

Verständnis der Luftfahrt und alle Möglichkeiten, diese für das 21. Jahrhundert fit zu machen.

Das DLR übernimmt die Rolle eines Architekten – von den Grundlagen bis hin zur Anwendung in enger Abstimmung und in Kooperation mit der Luftverkehrsindustrie und -wirtschaft. Auf 40 Seiten legt die neue DLR-Luftfahrtstrategie dar, welche Herausforderungen in den nächsten Jahren und Jahrzehnten für die Vision einer emissionsfreien Luftfahrt zu meistern sind. Evolutionäre Schritte sind ebenso nötig wie der konsequente Einsatz revolutionärer Technologien.

## NEUE ANTRIEBSTECHNOLOGIEN UND KONZEPTE FÜR ALLE STRECKEN

### TURBOANTRIEBE MIT NACHHALTIGEN BRENNSTOFFEN BIS ZUR LANGSTRECKE

Auf den Kurz- bis Langstrecken ermöglichen hocheffiziente Turbofan-Triebwerke gemeinsam mit regenerativ erzeugtem Kerosin einen weitgehend klimaneutralen Betrieb. Möglich ist das für die gesamte bestehende Flotte mit nur minimalen technischen Modifikationen der Triebwerke und der vorhandenen Infrastruktur. Die sogenannten Sustainable Aviation Fuels (SAFs) senken den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck deutlich und reduzieren zusätzlich die Klimawirkung von Kondensstreifen. Umfängliche Versuchsflüge, Sicherheitsnachweise und breite nachhaltige Produktionskapazitäten sind für den zukünftigen SAF-Einsatz nötig.



### ANTRIEBE MIT WASSERSTOFF-DIREKTVERBRENNUNG BIS ZUR MITTELSTRECKE

Wasserstoff kann die lokalen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Luftverkehr auf null reduzieren. Für Wasserstoffantriebe stellen Volumen und Gewicht sowie Integration und Sicherheit eine besondere Herausforderung dar. Mittelfristig ist der Einsatz von Wasserstoff besonders für Flugzeuge im Regional- und Kurzstreckenbereich geeignet. Die Erforschung einer sicheren und zuverlässigen Wasserstoffverbrennung sowie des Umgangs mit dem Energieträger soll in den nächsten fünf Jahren die kommerzielle Anwendbarkeit in Flugzeugen vorbereiten.



### HYBRID-ELEKTRISCHE ANTRIEBE MIT BRENNSTOFFZELLE IM REGIONALVERKEHR

Trotz ihrer sehr hohen Wirkungsgrade sind sowohl Batterien als auch Brennstoffzellen auf absehbare Zeit nur für Kleinflugzeuge und Regionalflugzeuge geeignet. Notwendig ist die Erforschung von Hochleistungs-Elektromotoren, Batterien und Brennstoffzellen. Dann kann in den nächsten fünf Jahren über eine mittelfristige Anwendung in Verkehrsflugzeugen entschieden werden.



### REDUZIERTER KLIMAWIRKUNG DURCH OPTIMIERTE FLUGROUTEN

Das größte Potenzial, um die Klimawirkung des Flugverkehrs schnell zu senken, bietet die Reduktion der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte durch geeignete Flugrouten. Sie machen etwa zwei Drittel der Klimawirkung des Luftverkehrs aus. Optimierte Lang- und Mittelstreckenflüge können die Klimawirkung von Kondensstreifen besonders stark reduzieren. Notwendig sind dafür die entsprechenden politischen Rahmenbedingungen, um in den nächsten fünf Jahren die kommerzielle Umsetzbarkeit und Wirksamkeit von klimaoptimierten Flugrouten nachzuweisen und in die Anwendung zu bringen.



Die Luftfahrt der Zukunft benötigt die Digitalisierung als entscheidendes Werkzeug. Ihr konsequenter Einsatz soll Entwicklungszeiten halbieren sowie die Erprobung und Zulassung zu großen Teilen in den Rechner verlegen. So wird der Transfer von der Forschung in die Anwendung beschleunigt. Mit der Mischung aus Expertise, Interdisziplinarität und ganzheitlich-programmatischer Ausrichtung, verbunden mit industrienahen Großanlagen, ist das DLR hervorragend aufgestellt, um die Transformation hin zur klimaverträglichen Luftfahrt wissenschaftlich und technologisch zu gestalten.

**Andreas Klöckner** ist zuständig für die Strategie des Bereichs Luftfahrt im DLR. **Falk Dambowksy** ist Redakteur in der Pressestelle des DLR.

Weitere Informationen finden Sie hier:

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



# ALLES NEU?

Ein Gespräch über  
klimaneutrales Fliegen

von Jana Hoidis

**W**ie müsste Mobilität am Himmel beschaffen sein, um die durch den Luftverkehr verursachten Emissionen drastisch zu senken? Die ganze Welt spricht von Wasserstoff als Heilsbringer. Um mit ihm fliegen zu können, sind nicht nur völlig neue Antriebe nötig: Wasserstoff muss erzeugt und zum Flughafen transportiert werden. Wie können diese Änderungen vollzogen werden und gleichzeitig das Fliegen noch wirtschaftlich bleiben? Die Klimaforscherin Dr. Katrin Dahlmann, der Luftfahrtantriebs-Ingenieur Jannik Häby und Dr. Veatriki Papantoni, die im Bereich erneuerbare Energien forscht, sprechen darüber, wie eine emissionsarme Luftfahrt erreicht werden kann.

Vision einer zukünftigen  
Wasserstoffwirtschaft

**Die deutsche Bundesregierung strebt mit dem Klimaschutzgesetz Treibhausgasneutralität bis 2045 an. Welche Rolle spielt dabei der Luftverkehr?**

**HäBy:** 2019, auf Vorpandemieniveau, hat dieser weltweit circa drei Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht. Mit steigender Impfquote wird der Wunsch nach Geschäfts- und Urlaubsreisen vermutlich zurückkehren. Außerdem ist davon auszugehen, dass der weltweite Bedarf nach Flugreisen in den nächsten Jahrzehnten weiter ansteigt.

**Dahlmann:** Gerade beim Luftverkehr beeinflussen neben CO<sub>2</sub> auch andere Effekte das Klima. Aktuell trägt die Luftfahrt fünf Prozent zum menschengemachten Treibhauseffekt bei. Um die Luftverkehrsemissionen und deren Klimawirkung zu senken, besteht akuter Handlungsbedarf.

**Muss man denn zwingend weniger reisen, wenn man das Klima schonen will?**

**HäBy:** Meiner Meinung nach ist die Welt zu vielfältig und schön, um vollständig auf Fernreisen zu verzichten. Interkultureller Austausch ist wichtig für eine friedliche Welt. Aber natürlich sollten wir uns bei jeder Flugreise fragen, ob sie notwendig ist. Radikale innovative Flugzeugkonzepte könnten eine deutlich geringere Klimawirkung erzielen. Allerdings haben Luftfahrtantriebe lange Entwicklungszeiten.

**Dahlmann:** Kurzfristiger könnte die Klimawirkung durch Änderungen in der Flugführung und der Routenplanung reduziert werden. Wenn man in einer tieferen Atmosphärenschicht fliegt, ließen sich klimaerwärmende Auswirkungen um bis zu 42 Prozent verringern. Ein Problem ist allerdings, dass die Flugzeuge aufgrund der höheren Reibung mehr Treibstoff verbrauchen und langsamer fliegen. Eine andere Möglichkeit ist, Gebiete zu umfliegen, in denen sich vermehrt Kondensstreifen bilden. Auch lange Strecken im Formationsflug könnten Treibhausgas einsparen und die Bildung von Kondensstreifen verringern. Hierfür wären lediglich Lösungen im Bereich der Flugsteuerung und des Luftverkehrsmanagements nötig.

**Und welche technischen Neuerungen kämen zur Schonung des Klimas in Betracht?**

**HäBy:** Heutige Luftfahrt-Gasturbinen können durch größere Fans, neue Materialien, wie Keramiken oder weiterentwickelte Kühltechnologie, effizienter werden und weniger Treibhausgas ausstoßen. Außerdem können nachhaltige Kraftstoffe, sogenannte Sustainable Aviation Fuels (SAFs), eingesetzt werden. Sie führen zu einem geschlossenen Kohlenstoffkreislauf, da sie bei der Verbrennung nur das CO<sub>2</sub> freisetzen, das bei der Kraftstoffherstellung gebunden wurde. Der Einsatz von Wasserstoff als Treibstoff macht einen Luftfahrtantrieb kohlenstofffrei. Wasserstoff wird entweder in einer Fluggasturbine verbrannt oder in einer Brennstoffzelle elektrochemisch umgesetzt. Allerdings sind hierfür viele Neuerungen nötig. Ein Beispiel sind andere Tanks, denn flüssiger Wasserstoff hat im Vergleich zu Kerosin ein höheres Volumen und muss bei extrem niedrigen Temperaturen gelagert werden.

**Dahlmann:** Außerdem können neu ausgelegte Flugzeugflügel den Treibstoffverbrauch verringern. Das würde einen tieferen Flug schon wesentlich kosteneffizienter machen. Etwas teurer wird es dennoch bleiben. Politische Vorgaben, zum Beispiel der Handel mit Emissionszertifikaten, könnten das in der Praxis leichter umsetzbar machen und Anreize für Airlines schaffen



**Jannik Häby** ist seit 2018 als Wissenschaftler am DLR-Institut für Antriebstechnik tätig. Er beschäftigt sich mit der Konzeptauslegung, Modellierung und Bewertung von revolutionären Antriebskonzepten für die Luftfahrt.

*„Wenn ich das erste Mal in einem mit Wasserstoff betriebenen Linienflugzeug sitzen sollte, wird es ein tolles Gefühl sein zu wissen, wie viele technische Schwierigkeiten von einer Vielzahl von Menschen aus Industrie und Wissenschaft gelöst wurden, um das zu ermöglichen.“*

**Jannik Häby**

**Ist die Corona-Pandemie ein guter Zeitpunkt, um Innovationen voranzutreiben?**

**Dahlmann:** Im April 2020 gab es pandemiebedingt 90 Prozent weniger Passagier-Luftverkehr, das heißt weniger CO<sub>2</sub>, Ozon und Kondensstreifen, also kurzfristig weniger Klimawirkung. Um unser Klima zu schützen, brauchen wir langfristige Effekte. Ich denke, die Fridays-for-Future-Kampagne und die Unwetter im Sommer 2021 haben die Problematik ins Bewusstsein der Gesellschaft gebracht. Auch wenn die Pandemie die gesamte Luftfahrtbranche schwer getroffen hat, ist jetzt ein wichtiger Zeitpunkt zum Umdenken.

**Frau Dahlmann, im Zusammenhang mit dem Klimawandel ist oftmals vom CO<sub>2</sub> als Verursacher die Rede. Eingangs erwähnten Sie auch andere Einflüsse. Welche Effekte haben diese?**

**Dahlmann:** Neben CO<sub>2</sub> entstehen auch Stickoxide (NO<sub>x</sub>) bei der Verbrennung von konventionellem Treibstoff. Diese reagieren mit Sauerstoff und erhöhen die Ozonproduktion. In der Stratosphäre schützt die Ozonschicht die Lebewesen auf der Erde vor zu viel Sonneneinstrahlung. In tieferen Atmosphärenschichten, genau genommen der oberen Troposphäre, in der der heutige Luftverkehr stattfindet, wirkt Ozon allerdings erderwärmend. Außerdem ist die Wirkung von Kondensstreifen nicht zu unterschätzen. Sie sind nichts anderes als Wolken und halten die Wärme in der Atmosphäre.

**Herr Häby, haben Sie schon Pläne für Antriebssysteme, die auch diese Probleme lösen könnten?**

**Häby:** Eine Gasturbine, die ausschließlich mit Wasserstoff angetrieben wird, erzeugt kein CO<sub>2</sub>, sondern hauptsächlich Wasserdampf. Außerdem könnten weniger Stickoxide als bei der Verbrennung von konventionellen oder synthetischen Kraftstoffen entstehen. Es bilden sich außerdem keine Rußpartikel und somit auch weniger Kondensstreifen. Wenn Wasserstoff in Brennstoffzellen umgesetzt wird, könnten NO<sub>x</sub>-Emissionen sogar vollständig entfallen.

**Ist Wasserdampf nicht ein starkes Treibhausgas?**

**Dahlmann:** Stimmt. Allerdings hat er in der oberen Troposphäre nur eine kurze Verweildauer. Erst in größeren Höhen steigt diese an und entfaltet so eine höhere Klimawirkung. Wasserstoffdirektverbrennung erzeugt zwar mehr Wasserdampf, Studien zeigen aber, dass dieser gerade mal zehn Prozent der Klimawirkung ausmacht. Den Einfluss untersuchen wir zurzeit mit unserem Klimamodell AirClim.

**Heutige Flugzeuge funktionieren alle ähnlich mit altbewährten Luftfahrtgasturbinen. Wie kann man neue Technologien so einsetzen, dass Ticketpreise weiterhin erschwinglich bleiben?**

**Häby:** Derzeit ist noch nicht ganz klar, welche Technologie sich wo bewährt. Aktuell gehen wir davon aus, dass Brennstoffzellen sich eher dazu eignen, kleine Kurzstreckenflugzeuge anzutreiben. Für die Mittel- bis Langstrecke könnte sich die Verbrennung von Wasserstoff in Gasturbinen durchsetzen. Die kurzfristige Alternative wären SAFs. Aktuell verursacht der Kraftstoff circa 20 bis 30 Prozent der Betriebskosten eines Verkehrsflugzeugs. SAFs werden diese Kosten zunächst steigern. Das DLR arbeitet aber an Möglichkeiten, diese wieder zu senken. Das ginge beispielsweise über eine andere Flotteneinsatzplanung. Kürzere Strecken könnten die Airlines mit kleineren, effizienteren und voll ausgelasteten Flugzeugen zurücklegen. Die Ticketpreise werden sich aber mit Sicherheit erhöhen.

**Und hat CO<sub>2</sub> bei der Verbrennung von nachhaltigen Flugkraftstoffen (SAFs) oben in der Atmosphäre nicht auch andere Effekte als am Boden, so wie Ozon?**

**Dahlmann:** Nein, CO<sub>2</sub> verteilt sich durch die sehr lange Lebenszeit gleichmäßig in der Atmosphäre.

**Wenn sich die Flugzeuge so verändern, muss sich die Infrastruktur, beispielsweise Flughäfen, nicht auch anpassen?**

**Papantoni:** Je mehr Flugzeuge mit Wasserstoff betrieben werden, desto größer wird auch die benötigte Menge. Lkw können kleinere Mengen Wasserstoff zum Flughafen transportieren. Bei steigendem Bedarf wird der Ausbau eines entsprechenden Versorgungsnetzes nötig. In Regionen mit einem hohen Potenzial an erneuerbaren Energien würde sich eine Elektrolyse direkt vor Ort rechnen.

**Wie viel Wasserstoff wird benötigt, um große Flotten zu betanken?**

**Häby:** Der Energiegehalt von Wasserstoff pro Kilogramm Treibstoff ist circa drei Mal so hoch wie der von Kerosin. Im Jahr werden in Deutschland ungefähr zehn Millionen Tonnen Kerosin benötigt. Dementsprechend bräuchte man ein Drittel davon an Wasserstoff. Aber die Bereitstellung in Deutschland alleine reicht nicht aus, auch die Zielflughäfen müssten über eine Wasserstoff-Infrastruktur verfügen.



**Dr. Katrin Dahlmann** ist Klimaforscherin in der Abteilung Erdsystemmodellierung am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre. Dort betreibt sie das Klima-Response-Modell AirClim, das die Klimawirkung verschiedener technologischer und operationeller Maßnahmen bewerten kann.

*„Ich hoffe mit meiner Arbeit einen Beitrag zu leisten, die Klimaerwärmung zu verringern. Und dass wir in Zukunft ferne Länder mit gutem Gewissen erkunden können.“*

**Dr. Katrin Dahlmann**



So könnte das Kurzstreckenflugzeug der Zukunft aussehen. Durch die Direktverbrennung von Wasserstoff entstehen kaum noch klimawirksame Treibhausgase.

**Wie kann genug Wasserstoff für einen weltweiten Luftverkehr nachhaltig und wirtschaftlich produziert werden?**

**Papantoni:** Nicht nur die Luftfahrt benötigt Wasserstoff, sondern auch Branchen, die anders kaum zu dekarbonisieren sind, wie die Stahl- und Chemieindustrie oder die Schifffahrt. Dafür müsste die Produktion erneuerbarer Energien ausgebaut werden. Das Energiesystem müsste effizienter werden. Regionen mit wenig Wind oder Sonne werden allerdings auf Importe angewiesen sein. Eine höhere Bepreisung von CO<sub>2</sub>, zum Beispiel durch den EU-Emissionshandel, wird Wasserstoff als alternativen Energieträger attraktiver machen.

**Welche Umweltauswirkungen hat es, Wasserstoff per Elektrolyse zu produzieren? Ist es nicht ineffizient, wenn SAFs und Wasserstoff erst aufwändig erzeugt werden müssen?**

**Papantoni:** Die Klimawirkung ist nur ein Teil der Umweltwirkung. Die Erzeugung von Wasserstoff benötigt Strom, Wasser und die entsprechenden Anlagen. Für ein Kilogramm benötigt man bis zu 18 Liter besonders reines Wasser. Wir müssen also beim Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft beachten, dass genug Wasser vorhanden ist. Außerdem untersuchen wir Umweltwirkungen, die beim Abbau der Rohstoffe für die Anlagen entstehen. Für leicht zu elektrifizierende Anwendungen wie Pkw sind SAFs und Wasserstoff wahrscheinlich weniger relevant. Für Langstreckenflüge oder maritime Anwendungen sind diese Energieträger eine öko-effiziente Alternative. Es gibt auch Synergieeffekte bei der Herstellung von SAFs und Wasserstoff. Saisonabhängig kann die Menge der zu erzeugenden erneuerbaren Energien schwanken. Es ist möglich, überschüssigen Strom in Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen zu speichern.

**Wie schaffen Sie es als Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, das alles so genau vorherzusehen?**

**Häby:** Flugzeuge sind sehr komplexe Systeme, denn zwischen den einzelnen Komponenten bestehen viele Abhängigkeiten. Im DLR gibt es Fachleute für die jeweiligen Systeme und Disziplinen. Die Schwierigkeit besteht darin, alles Wissen zu bündeln und als Einheit nutzbar zu machen. Im Projekt EXACT entwickeln wir eine Software, die die Fähigkeiten der unterschiedlichen DLR-Institute vereint. Wir bewerten so eine ganze Bandbreite an Szenarien mit verschiedenen Antriebskonzepten und Flugzeugtypen bis hin zu deren Klimawirkung. Erkenntnisse aus dem Projekt könnten der Industrie helfen, sich für oder gegen eine Technologie zu entscheiden.

**Dahlmann:** Mit unserem AirClim-Modell ermitteln wir die Änderung der globalen bodennahen Temperatur aufgrund von Emissionen und Kondensstreifen. In Verbindung mit anderen DLR-Softwaretools evaluieren wir mögliche Lösungsansätze, wie der Einfluss des zukünftigen Luftverkehrs auf den Klimawandel trotz steigender Verkehrszahlen reduziert werden kann.



**Dr. Veatriki Papantoni** arbeitet seit 2020 in der Abteilung Energiesystemanalyse des DLR-Instituts für Vernetzte Energiesysteme in Oldenburg. Ihr Ziel ist es, Konzepte und Technologien zu identifizieren, die sowohl eine geringe Umweltwirkung haben als auch wirtschaftlich betrieben werden können.

*„Ich würde mich auf jeden Fall in ein Wasserstoffflugzeug setzen, um meine Familie in Griechenland zu besuchen. Wenn ich dabei einen geringeren ökologischen Fußabdruck hinterlasse, macht das Reisen gleich noch mehr Spaß.“*

**Dr. Veatriki Papantoni**

**Papantoni:** Neben der Klimawirkung durch Emissionen untersuchen wir in EXACT auch die Umweltwirkung, die beim Betrieb der Flugzeuge entsteht oder bei ihrer Produktion. Dazu erstellen wir eine sogenannte Ökobilanzierung, die Energie- und Materialflüsse über den gesamten Lebenszyklus analysiert. Damit können wir abschätzen, welche Belastungen für das Ökosystem oder die menschliche Gesundheit zu erwarten sind.

Das Interview führte **Jana Hoidis**, Kommunikatorin an den Nord-Standorten des DLR.

# ENTSPANNTE INSPEKTION

In Hamburg forschen DLR-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler daran, Instandhaltungsprozesse bei Flugzeugen zu verbessern

von Jana Hoidis



**S**eit Anfang des Jahres ist in Hamburg das neue Applikationszentrum MRO in Betrieb. MRO steht für Maintenance, Repair and Overhaul, auf Deutsch: Wartung, Reparatur und Überholung. Hier wird gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie an der Instandhaltung von morgen geforscht.

Ein Teil eines Flugzeugflügels steht in der einen, ein Versuchsstand mit einem Roboterarm in der anderen Ecke. Im Kontrast dazu sehen die Werkbänke am hinteren Ende des Raums recht konventionell aus. Was hier erforscht wird, ist allerdings alles andere als gewöhnlich, sondern höchst innovativ. Die Leiterin der Abteilung Wartungs- und Reparaturtechnologien, Dr. Rebecca Rodeck, und Andreas Wilken, der Leiter des Applikationszentrums MRO, führen durch das neue Labor. Beide arbeiten am DLR-Institut für Instandhaltung und Modifikation.

Die wenigsten Passagiere machen sich Gedanken darüber, was mit einem Flugzeug geschieht, bevor sie für eine Reise an Bord gehen. Wer macht eigentlich das Flugzeug startklar? Was muss alles überprüft werden? Vor jedem Abflug und in regelmäßigen Intervallen checken Servicemitarbeitende akribisch die technischen Systeme sowie die Kabine. Beschädigte Teile werden ausgetauscht oder repariert. Schließlich soll der Flieger sicher ans Ziel gelangen.

## Effizient prüfen

Instandhaltungsprozesse sind für die Sicherheit des Flugverkehrs unerlässlich, genauso wie in anderen Industriebereichen. Heutzutage wird eher einmal zu viel geprüft als zu wenig. Allerdings gibt es hier großes Potenzial, Prozesse effizienter zu gestalten. Derzeit haben Planungs-, Inspektions- und Reparaturschritte noch einen hohen manuellen Anteil. „Hier setzt unser Forschungslabor an“, erklärt Rebecca Rodeck. „Im kleineren Maßstab können wir hier neue digitale Verfahren erproben, sodass diese im nächsten Schritt auf reale Versuchsumgebungen übertragen werden können“. Das Applikationszentrum MRO ist seit Januar 2021 im DLR in Hamburg-Finkenwerder im ZAL TechCenter in Betrieb. Ein interdisziplinäres Team von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern forscht bereits an mehreren Projekten.

## Roboter helfen Menschen

Einer der selteneren Instandhaltungsprozesse ist die Inspektion der Treibstofftanks. Diese befinden sich im Rumpf sowie in den Flugzeugflügeln. Hierfür muss das Flugzeug in den Hangar gefahren werden. Dann wird das Kerosin abgelassen. Nach heutigem Stand der Technik kriechen Servicemitarbeitende in den Tank, um diesen von innen zu inspizieren – eine physisch und psychisch sehr belastende und sogar gefährliche Aufgabe. „Gerade arbeiten wir an einem Konzept, dies zukünftig bei gefülltem Tank mit einem Tauchroboter, der eine Kamera führt, zu bewerkstelligen“, erklärt Rodeck.

Um eine Vorstellung von den Geometrien des Flügels zu bekommen, wird dieser im Labor genau untersucht. Die Forschenden überlegen, wie sich der Roboter durch die einzelnen Kammern im Tank „schlängeln“ könnte. Zur Flügelspitze hin werden diese immer kleiner und verwinkelter. Rodeck deutet auf den Flugzeugflügel. „Uns ist es sehr wichtig, den Menschen bei seiner Arbeit zu unterstützen. Wir stellen uns vor, dass Servicemitarbeiterinnen und -mitarbeiter bald nicht mehr selbst in den Tank müssen“, beschreibt die Forscherin ihre Vision von ergonomischeren Arbeitsweisen. Andreas Wilken ergänzt: „Das hilft, Fehler zu vermeiden, und beschleunigt Wartungsprozesse, die den Flugbetrieb damit auch nachhaltiger machen.“

Das Applikationszentrum MRO ist modular und lässt sich für andere Versuche und Forschungsvorhaben flexibel umgestalten. Zukünftig sollen Instandhaltungsarbeiten vorausschauend und bedarfsgerecht ablaufen. Händisch an Flugzeugen gemessene Inspektionsdaten sollen digital mit anderen Informationen synchronisiert werden. Verschiedene Instandhaltungssysteme können die Daten so unkompliziert austauschen und weiterverarbeiten. Wie solche Prozesse technisch umgesetzt werden



Ein Tauchroboter schlängelt sich durch Treibstofftanks im Flügel. Das macht die Inspektion für Servicemitarbeitende sicherer und effizienter.



können, erforschen die Fachleute mit verschiedenen Versuchsaufbauten im Labor. Mithilfe von einheitlich digital aufbereiteten Daten wird die gesamte Wertschöpfungskette in einem Instandhaltungsbetrieb optimiert – vom Auftragseingang des Kunden über die Lieferung von Material und Ersatzteilen bis hin zur Auslieferung. „Es gibt viele Visionen und Ideen“, so Rebecca Rodeck, „genau das macht die Forschung so spannend. An der Gestaltung der Zukunft mitzuwirken, fasziniert mich seit jeher.“ Im Applikationszentrum MRO wollen die Forschenden Konzepte entwickeln, wie Hersteller und Betreiber von Luftfahrzeugen deren Wartung und Instandhaltung von Anfang an mitdenken, bis zum Recycling am Ende ihres Lebenszyklus. Auch ein Technologietransfer in andere Branchen ist angestrebt.

Jana Hoidis ist am DLR-Standort Hamburg für die Kommunikation verantwortlich.

**Andreas Wilken**  
vom DLR-Institut für  
Instandhaltung und  
Modifikation leitet das  
Applikationszentrum  
MRO.



**Dr. Rebecca Rodeck**  
leitet die Abteilung  
Wartungs- und Reparatur-  
technologien des  
DLR-Instituts für Instand-  
haltung und Modifikation.



# ACHTUNG, ACHTUNG!

Ein Warnsystem soll Zusammenstöße zwischen  
Vögeln und Flugzeugen verhindern

von Dr. Isabel Carole Metz und Michael Drews

**V**ögel und Luftfahrzeuge nutzen den Luftraum gemeinsam. Das ist nicht immer unproblematisch. Bereits bei einem der ersten motorisierten Flüge kam es zu einem Zusammenstoß: Den ersten Vogelschlag dokumentierte Wilbur Wright nach einem Flug mit dem „Wright Flyer II“ am 7. September 1905. Die wohl bekannteste Kollision endete 2009 mit der Notlandung eines Airbus A320 im Hudson River vor New York. Zehn Jahre später musste ein Airbus A321 aus demselben Grund in einem Maisfeld bei Moskau landen. Durch herausragende Leistungen der Crews und der Rettungskräfte überlebten in beiden Fällen alle Passagiere. Nicht jeder Zusammenstoß endet so glimpflich. Seit 1905 sind insgesamt 618 Flugzeuge durch Vogelschläge zerstört worden und 534 Menschen ums Leben gekommen. 2019 wurden in Deutschland rund 1.500 Vogelschläge gemeldet. Um diese Zahl zu verringern, forscht das DLR-Institut für Flugführung an einem Warnsystem, das Vogelschläge verhindert.

Das Risiko von Vogelschlägen besteht insbesondere an Flughäfen sowie in den angrenzenden An- und Abflugkorridoren – 95 Prozent der Kollisionen ereignen sich unterhalb von 1.000 Metern. Deshalb sind Wildhüterinnen und -hüter im Einsatz, die das Gelände für die Vögel so unattraktiv wie möglich gestalten. Das reduziert die Gefahr von Zusammenstößen in Bodennähe bereits deutlich. Den Luftraum – vor allem die An- und Abflugkorridore oder die Streckenkorridore für niedrig fliegende Luftfahrzeuge wie Drohnen oder Lufttaxis – erreichen ihre Maßnahmen allerdings nicht. Um hier das Kollisionsrisiko zu minimieren, müssen diejenigen einbezogen werden, die die Flugpfade kontrollieren und steuern: das Lotsenpersonal sowie Pilotinnen und Piloten.

## Warten, bis die Gefahr vorüber ist

Zusammenstöße während des Abflugs sind am gefährlichsten, denn dann sind die Drehzahlen der Triebwerke besonders hoch. Das erhöht die Wahrscheinlichkeit für einen Schaden. Hinzu kommt, dass es extrem schwierig ist, ein Flugzeug in solch niedriger Höhe mit einer reduzierten oder ganz ausgefallenen Triebwerksleistung notzulanden. Aus betrieblicher Sicht lassen sich Starts vergleichsweise einfach verschieben. Deshalb weist das entwickelte Warnsystem die Fluglotsinnen und -lotsen an, den Start des Flugzeugs zurückzuhalten, wenn es eine erhöhte Vogelschlaggefahr festgestellt hat. Sobald die Gefahr vorüber ist, erteilt es ihnen die Startfreigabe.

Damit das System das Risiko möglichst präzise vorhersagen kann, benötigt es Kenntnisse über die Vogelbewegungen vor Ort. Immer mehr Flughäfen nutzen Vogelradare zum gezielten Tracken von Vögeln. Das Konzept des Warnsystems wurde mit Radardaten eines niederländischen Flughafens in Verbindung mit Wetterradarinformationen in Simulationen getestet. So wurde der kritische Luftraum bis 1.000 Meter Höhe abgedeckt. Die gewonnenen Daten wurden mithilfe eines dafür eigens entwickelten Modells in „Flugpläne für Vögel“ eingeteilt und in einen Luftverkehrssimulator der TU Delft integriert. Schnellzeitsimulationen berechneten, wie ein Vogelschlagwarnsystem für Lotsenpersonal die Anzahl an Kollisionen minimieren kann, wie sich die Verzögerungen von Starts auf die Landebahnkapazität auswirken und inwieweit Verspätungen im Flugplan entstehen.

Dem Warnsystem liegt ein Algorithmus zugrunde, der die Schwere und die Wahrscheinlichkeit des Vogelschlags in mehreren Stufen ermittelt. Dazu berechnet er den Flugpfad der Vögel und kann so voraussagen, wie wahrscheinlich ein Zusammenstoß ist. Anschließend ermittelt er die kinetische Energie der möglichen Kollision. Wenn das Risiko, also das Produkt aus Wahrscheinlichkeit und erwarteter Schwere des Zusammenstoßes, einen bestimmten Grenzwert übersteigt, weist das System das Lotsenpersonal an, den Start zurückzuhalten.

## Tausende Kilometer Vogelflug für den Test

Das System stellte seine Wirksamkeit in über 100.000 Schnellzeitsimulationen unter Beweis. Dabei wurden drei Szenarien miteinander verglichen: kein System, ein System, das Kollisionen perfekt voraussagt, und eines, welches die Starts aufgrund des berechneten Risikos zurückhält. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Vogelschlag-Warnsystem, mit dem Lotsinnen und Lotsen im Notfall Starts verzögern, selbst bei stark ausgelasteten Landebahnen nur geringe Verspätungen generiert. Dies setzt voraus, dass Starts nur dann verzögert werden, wenn die vorhergesagten Kollisionen besonders wahrscheinlich sind und hohe Schäden verursachen würden.

Um Vogelschläge in Zukunft effektiv zu verhindern und damit die Flugsicherheit zu erhöhen, ist es nötig, möglichst genau und kurzfristig vorherzusagen, wo jeder einzelne Vogel in Flughafennähe entlangfliegen wird. Um diese Präzision zu erreichen, wird das System, das auf einem mathematischen Modell basiert, aktuell um ökologische und biologische Faktoren erweitert und mit Methoden der künstlichen Intelligenz trainiert. Die Idee, Vogelschläge mittels künstlicher Intelligenz zu verhindern, wurde 2020 im Wettbewerb der Visionen des DLR ausgezeichnet und wird in diesem Rahmen gefördert.

**Dr. Isabel Carole Metz** erarbeitete im Rahmen ihrer Doktorarbeit und in Kooperation mit der TU Delft das Vogelschlag-Warnsystem und entwickelt es jetzt am DLR-Institut für Flugführung weiter. **Michael Drews** ist dort für die Kommunikation zuständig.

Vogelschlag-Radardaten des Flughafens Eindhoven, Niederlande. Die Sensoren zeichnen sowohl die Positionen und Bewegungen von Fahr- und Flugzeugen auf als auch die der Vögel, die sich in der Nähe des Flughafens befinden.

- 📡 Radar
- ✈️ Flugzeug
- 🚗 Fahrzeug
- 👥 Schwarm
- 🔴 Großer Vogel
- 🟡 Mittelgroßer Vogel
- 🟢 Kleiner Vogel
- 🛫 Start- und Landebahn

Quelle: Robin Radar Systems BV



# KLEINE KRISTALLE, GROßE WIRKUNG

Mit dem Forschungsflugzeug HALO in  
Kondensstreifen und kalten Eiswolken unterwegs

von Dr. Tina Jurkat-Witschas und Prof. Dr. Christiane Voigt

**S**ie winden sich wie silbrige Schleier über den Himmel und bergen viele Geheimnisse: Zirren, auch Federwolken genannt, sind Eiswolken, die sich in großen Höhen bilden. Welchen Einfluss sie auf das Klima haben, ist noch nicht vollständig geklärt. Dasselbe gilt für ihre künstlichen Geschwister: Kondensstreifen, die durch den Luftverkehr entstehen. Kaum zu glauben, dass die Wirkung dieser oft malerischen kalten Wolkenstreifen auf das Klima größer ist, als das vom Luftverkehr emittierte Kohlendioxid. Wie sich die Kondensstreifen von den natürlichen Zirren unterscheiden, in welchen Regionen die Kondensstreifenzirren ihre Wirkung am stärksten entfalten und welche Maßnahmen man zu ihrer Vermeidung treffen kann, sind mitunter die drängendsten Fragen, die zur Gestaltung eines nachhaltigen Luftverkehrs beantwortet werden müssen.

Kondensstreifen bilden sich auf dem emittierten Ruß im Abgasstrahl von Flugzeugen, die in kalten Regionen der Atmosphäre fliegen. Wenn die Atmosphäre feucht genug ist, können sich Kondensstreifen zu Kondensstreifenzirren, also Eiswolken, entwickeln. Diese lassen sich von den natürlichen Zirren mit dem bloßen Auge nicht mehr unterscheiden, sie liefern aber neuesten Erkenntnissen zufolge den größten Beitrag zur Erwärmung des Klimas durch den Luftverkehr. In der Kampagne CIRRUS-HL machte sich ein Team von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus neun deutschen Universitäten und Forschungseinrichtungen mit dem Forschungsflugzeug HALO auf den Weg, um sowohl neue Messdaten in Kondensstreifen als auch in natürlichen Zirren zu sammeln und um Möglichkeiten zu finden, den Einfluss des Luftverkehrs auf das Klima zu verringern. Die Leitung der Kampagne lag beim DLR-Institut für Physik der Atmosphäre.

Kondensstreifenzirren halten einen Teil der langwelligen irdischen Strahlung in der Atmosphäre gefangen und wirken daher im Mittel wärmend. Dieser Effekt tritt nachts stärker auf, wenn keine Sonne scheint. Tagsüber können die Zirren sogar eine kühlende

Das Forschungsflugzeug HALO taucht in der Abenddämmerung über Schottland in ein Zirrenmeer ein. Die Unterflügelsonden vermessen dabei die Anzahl und Größe der Eiskristalle.

Wirkung ausüben, indem sie die Sonnenstrahlen reflektieren und so verhindern, dass diese den Erdboden erreichen. Modelle zeigen zudem, dass nicht jeder Kondensstreifen gleich klimawirksam ist und dass bestimmte Regionen besonders stark von ihrer Klimawirkung betroffen sind. Zu untersuchen, wie die kleinen Eiskristalle die Strahlungsbilanz der Zirren in mittleren und hohen Breiten verändern, war eine zentrale Fragestellung von CIRRUS-HL. Darüber hinaus wollte das Team herausfinden, wie sich natürliche Zirren von Kondensstreifen unterscheiden. Gerade in den nördlichen Breiten, wo in den Wintermonaten keine Sonne scheint und damit die reflektierende Wirkung der Wolken verschwindet, sind die Zirren stark wärmend. Die Frage war hier, welche Rolle die Zirren bei der überproportional starken Erwärmung der Arktis im Vergleich zum globalen Mittel spielen.

## Von Bayern in den hohen Norden

Mit dem DLR-Forschungsflugzeug HALO (High Altitude and Long Range Research Aircraft) lassen sich sowohl natürliche Eiswolken als auch Kondensstreifen auf einzigartige Weise untersuchen. Mehr als 25 Instrumente waren während der Mission an Bord installiert und registrierten Anzahl, Größe und Bestandteile von Eiskristallen in Zirren, aber auch ihre Vorläufer, die Aerosolpartikel. Im Juni und Juli 2021 starteten vom bayerischen Oberpfaffenhofen aus lange Forschungsflüge: Ihre Ziele waren einerseits Gebiete mit hohem Flugverkehr über Mitteleuropa bis nach Spanien und andererseits der Polarkreis, also Spitzbergen, Island und Schweden. Unterwegs zeigten sich häufig die Spuren des Klimawandels: 27 Grad Celsius Bodentemperatur in Nordschweden, Waldbrandaerosole in großen Höhen und Gewitter mit Starkregen über Deutschland.

## Viele Stunden durch die Eiswolken

Dank der großen Reichweite von HALO war der Flieger bis zu acht Stunden in den Kondensstreifen und Zirren unterwegs, um sie von der Bildungsregion bis zur Auflösung zu untersuchen. HALO flog dabei stufenweise durch die Wolken und scannte die Zirren bei unterschiedlichen Höhen und Temperaturen. Die Daten helfen, schon in den nächsten Jahren die drängendsten Fragen zu den Eigenschaften und der Klimawirkung von Kondensstreifenzirren und ihren natürlichen Pendanten zu klären. Erste Ergebnisse zeigen, dass künstliche Zirren eher aus vielen kleinen Eiskristallen bestehen, während die Eiskristalle



Da sich die dünnen hohen Eiswolken nur schwer von Wettermodellen vorher-sagen lassen, wurden die Flugpläne oft kurzfristig angepasst. So kam es zu einem regelrechten Wettlauf mit den Eiskristallen.

der natürlichen Zirren im hohen Norden eher größer und komplexer sind. Dies wirkt sich auf ihre Wechselwirkung mit der Strahlung aus. Noch lange, nachdem sich Kondensstreifen gebildet haben, unterscheiden sie sich aufgrund der zahlreichen kleinen Eiskristalle von der natürlichen Bewölkung.

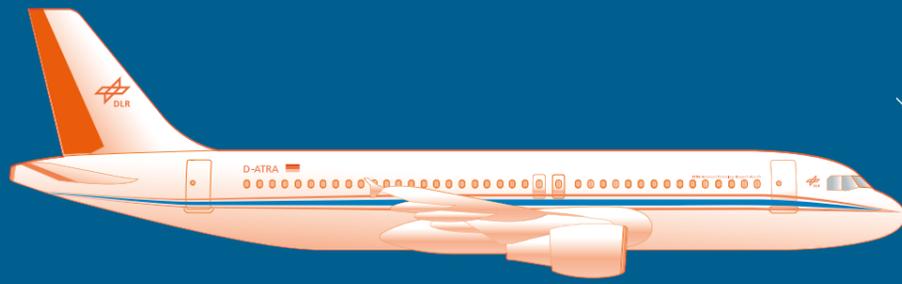
## Vermeidbare Klimawirkung?

Wie selbstverständlich Kondensstreifen für unsere Wahrnehmung des Himmels sind, wurde während des ersten Lockdowns klar, als der Himmel frei und damit etwas blauer war. Während der CIRRUS-HL-Kampagne war das Flugverkehrsaufkommen über Europa bei etwa 60 Prozent von 2019. In speziellen Flügen untersuchte das Team auch, ob aktuelle Wetterinformationen in Kombination mit einem Kondensstreifen-Modell ausreichend sind, um die größer ausgedehnten, besonders klimawirksamen Kondensstreifencluster zu finden. Außerdem planten die Forscherinnen und Forscher einen Flugweg etwas oberhalb, auf dem möglichst keine Kondensstreifen entstehen. Dieser wurde gleichzeitig für Fernerkundungsmessungen genutzt. Noch stellt die genaue Vorhersage von Kondensstreifen eine Herausforderung für Wettermodelle dar. Die Daten, die HALO auf der CIRRUS-HL-Mission sammelte, sollen die Modelle verbessern und zuverlässiger machen. Dann wäre auch eine wetterabhängige Flugroutenplanung möglich, die die Klimaeinflüsse der Zirren berücksichtigt. So könnten Kondensstreifen in Zukunft wetterabhängig vielleicht sogar komplett vermieden werden.

Beide Autorinnen arbeiten als Wissenschaftlerinnen im DLR-Institut für Physik der Atmosphäre. **Dr. Tina Jurkat-Witschas** ist Co-Koordinatorin der CIRRUS-HL-Kampagne. **Prof. Dr. Christiane Voigt** leitet die Abteilung Wolkenphysik und koordiniert das CIRRUS-HL-Projekt.



Der Forschungsflieger HALO war für die Mission mit mehr als 25 Instrumenten ausgerüstet. Streulichtspektrometer detektierten die Eispartikel. Bei dieser Messung wird ein Laserstrahl eingesetzt, durch den sich die Eispartikel wie durch eine Lichtschranke bewegen. Der Schattenwurf der Partikel liefert Informationen über ihre Größe und Anzahl. Diese präzise arbeitenden Wolken-sonden waren unter dem Flügel von HALO angebracht, um die Eiskristalle möglichst ungestört abzubilden. Mit einem Lidar konnten die Wissenschaft-lerinnen und Wissenschaftler gleichzeitig die vertikale Ausdehnung und die optischen Eigenschaften der Kondensstreifen und natürlichen Zirren bestimmen und so einen sehr umfassenden Datensatz sammeln.



## D-ATRA

### ↓ Airbus A320

Im DLR seit 2008

- Bis 2020 Nutzung vor allem in den Bereichen Flugführung, synthetische Kraftstoffe, Aerodynamik und Lärm
- Ab 2023 neue Verwendung geplant

## D-CODE

### ↓ Dornier DO 228-101 ↓

Im DLR seit 1986

- Technologien für ferngesteuerte Luftfahrtsysteme
- Autonomes Fliegen
- Sense & Avoid
- Lärmreduktion



## D-9833

### ↑ Discus-2c ↑

Im DLR seit 2011

- Referenzflugzeug in der Flugleistungsvermessung
- Erprobung neuer Messtechniken
- Flugmechanische und Aeroelastikuntersuchungen
- Atmosphärische Messungen
- Dynamische Untersuchungen instationärer Flugzustände mit moderner Druckmesstechnik
- Flugversuche ohne Vibration und elektromagnetische Störungen
- Digitale Instandhaltungsmethoden

## D-ADLR

### → Gulfstream G550 →

Im DLR seit 2009

- Chemische Zusammensetzung der Atmosphäre
- Luftverschmutzung und deren Transport
- Meteorologie und Dynamik der Atmosphäre
- Bildung und Lebenszyklus von Aerosolpartikeln, Wolken und Niederschlag
- Globaler Kohlenstoffkreislauf
- Transport und Dynamik in höheren Atmosphärenschichten

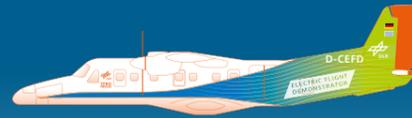


## D-CEFD

### ↑ Dornier DO 228-202k ↑

Im DLR seit 2021

- Erprobung von Technologien, Komponenten und Systemen für elektrische Flugantriebe
- Brennstoffzellen-basierter Elektroantrieb



## D-CMET

### → Dassault Falcon 20E-5 →

Im DLR seit 1976

- Umwelt- und Klimaforschung
- Messung von Emissionen vorausfliegender Luftfahrzeuge
- Validierung von Satelliten und Klimamodellen
- Kommunikation, Navigation, Surveillance



## D-BDLR

### → Dassault Falcon 2000LX →

Im DLR seit 2020

- Digitalisierung
- Automation
- Unbemannte Systeme
- Aerodynamik
- Flugsysteme und -regelung
- Flugverfahren



## D-FDLR

### ↓ Cessna 208B Grand Caravan ↓

Im DLR seit 1998

- Fliegender Hörsaal / Sommerschule für Studierende der Meteorologie oder Luft- und Raumfahrt
- Luftqualitätsmessungen in der Grenzschicht und Troposphäre
- Hochaufgelöste Luftbildaufnahmen



## D-HFHS

### → EC 135 →

Im DLR seit 2002

- Implementierung und Erprobung von aktiven Steuerorganen (Sidesticks), Sensoren und Sichtsystemen
- Erprobung von Pilotenassistenzsystemen
- Flugeigenschaftsvermessung
- Ausbildung Testpilotinnen / -piloten und Flugversuchingenieurinnen / -ingenieure
- Simulation des Flugverhaltens anderer Hubschrauber
- Sensorplattform für hochauflösendes optisches Kamerasystem

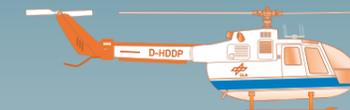


## D-HDDP

### → BO 105 CB →

Im DLR seit 1974

- Verkehrsmonitoring und Katastrophenschutz
- Lärmarme Anflüge
- Pilotenassistenzsysteme
- Außenlasten
- Flugeigenschaften und Strömungsverhältnisse am Rotor



## D-EDVE

### ↓ Robin DR400-200R ↓

Im DLR seit 1991

- Schleppflugzeug für Forschungssegelflugzeug Discus-2c DLR
- Pilotentraining
- Intruder für „Sense & Avoid“-Systeme



# EINE STÄTTLICHE FLOTTE

## Ein Überblick über die DLR-Forschungsflugzeuge

Vom großen Airbus-Verkehrsflugzeug über Hubschrauber und Propellerflugzeuge bis zum Segelflieger ist alles dabei: Mit seinen zwölf Luftfahrzeugen betreibt das DLR die größte zivile Forschungsflotte Europas. Verantwortlich für den Forschungsflugbetrieb ist die Einrichtung Flugexperimente im niedersächsischen Braunschweig und bayerischen Oberpfaffenhofen. Vom südlichen Forschungsfeld aus starten die Flugzeuge zumeist als Mess- und Sensorplattformen für Atmosphären-, Klima- und Umweltforschung, Erdbeobachtung sowie zur Erprobung von Kommunikations-, Radar- und Navigationssystemen. Am nördlichen Standort heben die Flieger schwerpunktmäßig im Rahmen von Forschungsarbeiten zur Verbesserung der Effizienz und Umweltverträglichkeit von Luftfahrzeugen ab, wobei vor allem Aerodynamik, Aeroelastik, Flugsysteme und Flugverkehrsmanagement im Fokus stehen. Das älteste Mitglied der Flotte ist der Hubschrauber BO 105 mit 47 Dienstjahren, dicht gefolgt von der Dassault Falcon 20 mit 45 Dienstjahren. Die jüngsten Mitglieder der Flotte sind die Dassault Falcon 2000 („ISTAR“) sowie die DO 228 (D-CEFD), die als fliegendes Labor für elektrische Flugantriebe genutzt wird.

## D-CFFU

### ↓ Dornier DO 228-212 ↓

Im DLR seit 1991

- Radarsysteme
- Hyperspektralsensoren
- Hochaufgelöste Luftbildaufnahmen



Abbildungsgröße der Flugzeuge nicht exakt maßstäblich.



Die Crew-3 an Bord der Dragon-Kapsel. Von links: ESA-Astronaut Matthias Maurer sowie Thomas Marshburn, Raja Chari und Kayla Barron von der NASA.

# MIT 100 EXPERIMENTEN UM DIE WELT

Ambitioniertes Forschungsprogramm für Matthias Maurer auf der ISS

von Elke Heinemann und Michael Müller

„**H**atch open“ am 12. November um 2:10 Uhr mitteleuropäischer Zeit. Durch die Luftsleuse im Harmony/Node-2-Verbindungs-knoten schwebt Matthias Maurer ins Innere der Internationalen Raumstation ISS, sein neues Zuhause für die kommenden sechs Monate. Die Reise von Cape Canaveral zur ISS hatten er und seine drei Crew-Mitglieder an Bord einer SpaceX-Dragon Kapsel zurückgelegt. Eine Premiere für einen deutschen Astronauten. Nun kann die Arbeit beginnen!

Bis April 2022 wird der gebürtige Saarländer und promovierte Werkstoffwissenschaftler mehr als 100 internationale Experimente, davon 36 deutsche, an Bord der ISS betreuen. Das Spektrum reicht von Grundlagenforschung bis zur anwendungsorientierten Wissenschaft in den Bereichen Lebenswissenschaften, Medizin, Biologie, Materialwissenschaft, Physik und Erdbeobachtung. Fünf Experimente werden in diesem Artikel vorgestellt. Matthias Maurer wird während seiner Mission auch viele Bildungsaufgaben übernehmen, um die junge Generation für Wissenschaft und Technik zu begeistern. Hier hat das DLR eine ganze Reihe an Maßnahmen vorbereitet – diese reichen von Mitmachexperimenten über Wettbewerbe bis hin zu Funkkontakten von Schulen mit der ISS. Bei diesen sogenannten ARISS-Calls (Amateur Radio on

the International Space Station) bringen die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR und der Deutsche Amateur-Radio-Club e.V. (DARC) Raumfahrt ins Klassenzimmer. Während des Funkkontakts haben die Schülerinnen und Schüler Gelegenheit, Matthias Maurer jede Menge Fragen zu stellen. „Bei jedem der ARISS-Events ist die Anspannung mit Händen greifbar. Die Schülerinnen und Schüler haben sich wochenlang darauf vorbereitet – und wenn per Funk ‚This is N A I I S S, ready for your questions‘ ertönt, ist das Raumfahrtfieber vollends ausgebrochen. Es ist großartig mitzuerleben, welche Begeisterung und Motivation solch ein Projekt bei den Kindern und Jugendlichen auslöst“, sagt Oliver Amend, Vorsitzender von ARISS Europa.

Elke Heinemann und Michael Müller arbeiten in der DLR-Kommunikation.

## ÜBERBLICK ZU DEN EXPERIMENTEN DER MISSION

### NACHWUCHSFÖRDERUNG

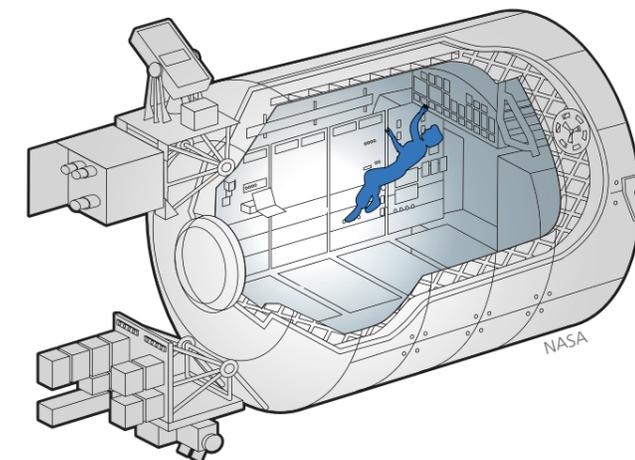
|   |  |
|---|--|
| <b>CalliopeO</b>  | Programmierwettbewerb  |
| <b>Granular Damping</b>                                     | Granulare Medien   |
| <b>Touching Surfaces</b>                                    | Kontamination von Oberflächen                                    |
| <b>Dzhanibekov-Experiment</b>                               | Rotation eines Körpers   |
| <b>Beschützer der Erde (Earth Guardian 3)</b>               | Schulwettbewerb: Fernerkundung aus dem All zum Schutz des Klimas |
| <b>Hand in Hand um die Welt</b>                             | Malwettbewerb  |
| <b>ARISS-Calls</b>  | Funkkontakte mit Matthias Maurer                                 |
| <b>Space Seeds II</b>                                       | Blumenwachstum auf der ISS                                       |
| <b>Überflieger (außerhalb des Cosmic-Kiss-Zeitfensters)</b> | Studierendenwettbewerb   |

### PHYSIK UND MATERIALWISSENSCHAFTEN

|   |  |
|---|--|
| <b>EML</b>  | Schmelzöfen für Legierungsproben       |
| <b>MSL</b>  | Metallschmelzen in Schwerelosigkeit    |
| <b>TRANSPARENT ALLOYS</b>                               | Transparente organische Substanzen     |
| <b>PK-4</b>   | Komplexe Plasmen                       |
| <b>Concrete Hardening</b>                               | Kristallisation von Betonmischungen    |
| <b>FLARE</b>  | Brandsicherheit bei Weltraummissionen  |
| <b>Cold Atoms Lab</b>                                   | Kalte Atome                            |
| <b>GraSCha (außerhalb des Cosmic-Kiss-Zeitfensters)</b> | Schallausbreitung in granularen Medien |

### LEBENSWISSENSCHAFTEN

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| <b>Thermo-Mini</b>            | Körpertemperaturregulation              |
| <b>AI Retinal Diagnostics</b> | Netzhautdiagnostik                      |
| <b>EasyMotion</b>             | Muskelstimulation über Spezialanzug     |
| <b>Exercise Kinetics</b>      | Bewegungskinetik                        |
| <b>Immuno-2</b>               | Stressfaktoren für das Immunsystem      |
| <b>Myotones</b>               | Eigenschaften der Skelettmuskulatur     |
| <b>Immunity assay</b>         | Humanphysiologie                        |
| <b>CerISS</b>                 | Bandscheibenvorfälle während Raumflügen |
| <b>SMASH</b>                  | Weltraumkopfschmerz                     |



### BIOLOGIE

|                      |                                  |
|----------------------|----------------------------------|
| <b>Cellbox-3</b>     | Zellkulturen in Schwerelosigkeit |
| <b>Space Fabric</b>  | Biozide Textilien                |
| <b>Dosis 3D Mini</b> | Strahlungsverteilung auf der ISS |
| <b>Biofilms</b>      | Bakterien auf Oberflächen        |

### TECHNOLOGIE

|   |   |
|---|---|
| <b>Cimon 2.1</b>  | KI-Assistenzsysteme                                 |
| <b>On Board Training in Virtual Reality</b>             | Astronautentraining über Virtual Reality            |
| <b>WICONet – Wireless Communication Network</b>         | Technologiedemonstration, Kommunikation, Wearables  |
| <b>Metabolic Space</b>                                  | Nichtinvasive Diagnostik, Atemgasanalyse, Wearables |
| <b>ICARUS</b>   | Tiermigration, Technologie                          |
| <b>Laplace (außerhalb des Cosmic-Kiss-Zeitfensters)</b> | Planetenentstehung                                  |

## BAUSTOFF FÜR ERDE, MOND UND MARS

Weltweit werden jährlich 38 Gigatonnen CO<sub>2</sub> ausgestoßen, drei davon entstehen bei der Herstellung von Zement. Um Beton, ein Gemisch aus Zement, Sand und Wasser, klimaneutraler herzustellen, sind Einsparungen an vielen Stellen der Prozesskette nötig. Sehr wichtig ist es, die Aushärtung besser zu verstehen. Schon die ersten Sekunden nach dem Mischen sind sensitiv gegenüber der Schwerkraft. Der gesamte Aushärtungsprozess dauert jedoch Wochen bis Monate.

**MASON/Concrete Hardening** verspricht ein besseres Verständnis von Beton. So soll der Baustoff perspektivisch einerseits auf der Erde effektiver eingesetzt werden können, andererseits ist das Experiment im Zusammenhang mit der astronautischen Erkundung anderer Himmelskörper von Bedeutung: Beton dient hier als Referenz zu Alternativen wie dem 3D-Druck von Habitaten aus dem Mondstaub Regolith. Mit Vergleichsmessungen am Boden können einzelne Aspekte der Aushärtung geklärt werden. In Schwerelosigkeit sollen dann wertvolle Vergleichsmessungen stattfinden. Bei dem Experiment MASON arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des DLR-Instituts für Materialphysik im Weltraum mit den Universitäten Duisburg-Essen und Köln sowie mit dem schweizerischen Biotechnology Space Support Center zusammen. Eine Kooperation besteht hierzu mit Forschenden der Penn State University und der NASA.



Bei MASON werden verschiedene Zementproben auf der Erde und auf der ISS untersucht.

*„Matthias Maurer und ich haben schon seit einiger Zeit gemeinsam über die Optimierungsmöglichkeiten von Beton nachgedacht, unter anderem im Hinblick auf die geplante analoge Mondanlage LUNA Europa. Dass es schon bald ein Experiment hierzu auf der ISS durchführen wird, freut mich daher sehr!“*

**Prof. Matthias Sperl**, Projektleiter für MASON aus dem DLR-Institut für Materialphysik im Weltraum

## MEHR ALS EIN FINGERABDRUCK

Langzeitaufenthalte in einer Raumstation können zu einer eigenen Mikroflora führen, die sich aus mitgeschleppten Mikroorganismen wie Bakterien, Viren und Schimmelpilzen entwickelt. Diese kann Auswirkungen auf die Gesundheit der Crew haben. Zudem können von Mikroorganismen gebildete Strukturen (Biofilme) zu Materialschäden führen. Daher sind antimikrobielle Kontaktoberflächen und eine effiziente Vorbeugung gegen Mikroorganismen ein wichtiges Thema für astronautische Raumfahrtmissionen, aber auch für öffentliche Einrichtungen, Transportmittel, Krankenhäuser und die Lebensmittelindustrie.

Bei **Touching Surfaces** werden neuartige laserstrukturierte antimikrobielle Oberflächen aus Kupfer und Messing auf der ISS getestet. Deren Wirksamkeit soll sich vor allem im Zusammenhang mit den dort herrschenden Umweltbedingungen wie Schwerelosigkeit und Isolation erweisen. An verschiedenen Punkten der ISS werden Probenträger angebracht, die zwei Arten antimikrobieller metallischer Oberflächen enthalten – sowohl glatte als auch strukturierte Flächen, welche die Anhaftung der Mikroorganismen erhöhen beziehungsweise reduzieren. Die Test-Flächen werden innerhalb der Mission regelmäßig berührt und anschließend auf der Erde mikrobiologisch und materialwissenschaftlich untersucht. Durchgeführt wird das Experiment vom DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin in Kooperation mit der Universität des Saarlandes, dem University College London und der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg.



Probenträger des Experiments

*„Als Projektleiter bin ich sehr stolz auf das Teamwork zwischen den nationalen und internationalen Partnern. Besonders beeindruckend fand ich den Einsatz unserer jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ... inmitten einer Pandemie ein Weltraumexperiment mit auf die Beine zu stellen, war großartig!“*

**Prof. Dr. Ralf Möller**, Projektleiter für Touching Surfaces aus dem DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin

Das DLR-Team von Retinal Diagnostics besteht aus Dr. Claudia Stern, Scott Ritter und Dr. Jürgen Drescher. Hier testen Claudia Stern und Scott Ritter die Technologie.



*„Diese Technologie kann sowohl im All als auch für die terrestrische Medizin und die Notfalldiagnostik eingesetzt werden. So könnte diese nicht-invasive Form der Retinadiagnostik als Spiegel ins Gehirn beispielsweise auch via Smartphone für Patientinnen und Patienten aus unterentwickelten Regionen zugänglich werden.“*

**Dr. Claudia Stern**, Abteilungsleiterin Klinische Luft- und Raumfahrtmedizin im DLR

*„Mit der EMS-Technik legt Matthias Maurer den Grundstein für ein neuartiges Trainingskonzept für Astronautinnen und Astronauten im All. Wenn es uns gelingt, das tägliche Training effektiver zu gestalten, hat die Crew mehr Zeit für spannende Experimente an Bord der ISS.“*

**Christian Rogon**, Abteilung Forschung und Exploration der Deutschen Raumfahrtagentur im DLR

Matthias Maurer trainierte zur Vorbereitung bereits auf der Erde mit dem EasyMotionSkin-System.



## STROM LÄSST MUSKELN WACHSEN

Halten sich Menschen längere Zeit in Schwerelosigkeit auf, beginnen sich ihre Muskeln in Rumpf und Gliedmaßen abzubauen, denn sie müssen nicht mehr ständig gegen die Schwerkraft arbeiten. Um diesen Muskelschwund und den dadurch bedingten Knochenabbau zu verhindern, muss die Crew auf der ISS täglich und zweieinhalb Stunden trainieren. Matthias Maurer wird während seiner Mission das **EasyMotionSkin-System** testen. Es besteht aus einem speziellen Anzug, in den Elektroden eingearbeitet sind. Diese geben schwache Stromimpulse ab und reizen dadurch die Muskeln zusätzlich während des Trainings. Diese Methode nennt sich Elektromuskel-Stimulation (EMS). Durch die Kombination von erhöhter Grundspannung und gezieltem Muskeltraining kann sie den Trainingserfolg deutlich erhöhen. Die Technologie ist auch für den Bereich der Rehabilitation und nach intensivmedizinischen Behandlungen von Interesse.

An EasyMotion sind die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR, die OHB System AG, die EMS GmbH, die Berliner Charité und das Europäische Astronautenzentrum beteiligt. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie finanziert das Projekt.

## NETZHAUTDIAGNOSTIK MIT DEM TABLET

Veränderungen an den Sehnerven und im Gehirn gehören neben der Strahlenbelastung zu den schwerwiegendsten Risiken auf Raumfahrtmissionen. In Schwerelosigkeit verschieben sich die Körperflüssigkeiten Richtung Kopf, was möglicherweise zu länger anhaltenden Blutkreislauf-Störungen und Druckanstieg im Schädel führt. Damit die Raumfahrenden während der Mission gezielt therapiert werden können, müssen die Mikrozirkulation des Blutes im Gehirn sowie ein potenziell erhöhter Hirndruck nichtinvasiv diagnostiziert werden können. Bei **Retinal Diagnostics** passiert dies indirekt mithilfe einer aufsteckbaren Linse, die mit einem Adapter an der Kamera des Crew-Tablets fixiert wird. Sie nimmt die Netzhaut (Retina) des Auges auf, deren Zustand Rückschlüsse auf mögliche Schäden im Gehirn zulässt. Das Verfahren ist preiswert und unkompliziert: Die Bilder und Videos der Retina werden über das Crew-Tablet von der ISS zum Boden übertragen. Mittels maschinellen Lernens erfolgen dort später Analysen, die Augenärztinnen und -ärzte sowie neurologisches Fachpersonal bei der Früherkennung von möglichen Hirnschäden unterstützen.

Künftig soll diese Technologie selbstständig diagnostische Entscheidungen anbieten. Bei zukünftigen astronautischen Erkundungsmissionen außerhalb der Erdumlaufbahn kann Retinal Diagnostics dazu beitragen, dass die Crew ohne Sehstörungen oder mentale Einschränkungen am Mond oder Mars ankommt. Am Experiment beteiligt sind Fachleute aus dem DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, dem DLR-Technologiemarketing sowie dem Europäischen Astronautenzentrum EAC.

CIMON ist die einzig sprechende künstliche Intelligenz an Bord der ISS.

*„Matthias Maurer und CIMON bilden noch auf eine andere Weise ein Team: Maurer ist ESA-Kinderherz-Botschafter – mit CIMON stellt das DLR nun den ersten robotischen Kinderherz-Botschafter, der während der Mission für eine ganz besondere Überraschung sorgen wird.“*

**Christian Rogon** koordiniert das Projekt seitens der Deutschen Raumfahrtagentur im DLR.



## INTELLIGENTER BEGLEITER

Der ballförmige Roboter **CIMON** (Crew Interactive Mobile Companion) kann sehen, hören, verstehen, sprechen – und fliegen. Der autonom agierende Roboterassistent soll die Arbeit der Astronautinnen und Astronauten unterstützen und deren Effizienz steigern. Er kann vielfältige Informationen sowie Anleitungen zu wissenschaftlichen Experimenten und Reparaturen abbilden und erklären. Per Sprachsteuerung haben die Astronautinnen und Astronauten Zugriff auf Dokumente und Medien und somit die Hände frei für ihre Arbeit – ein großer Vorteil. CIMON kann außerdem als mobile Kamera für operationelle und wissenschaftliche Zwecke genutzt werden. Er übernimmt Routineaufgaben, wie die Dokumentation von Experimenten, die Suche nach Objekten und die Inventarisierung. Nach der erfolgreichen Technologiedemonstration mit den ESA-Astronauten Alexander Gerst und Luca Parmitano steht während Matthias Maurers Mission die operationelle und wissenschaftliche Nutzung von CIMON im Vordergrund. Er soll mit Maurer kommunizieren sowie ihn bei komplexen wissenschaftlichen Arbeiten anleiten und unterstützen. Doch CIMON hilft nicht nur auf der ISS: Auf der Erde soll er Innovationen für Anwendungen im Bereich der robotischen Industrieproduktion, der Bildung sowie der Medizin und Pflege vorantreiben.

Entwicklung und Bau von CIMON wurden von der Deutschen Raumfahrtagentur im DLR mit Mitteln des BMWi in Auftrag gegeben und von Airbus umgesetzt. Weiterhin waren an dem Projekt noch IBM Watson, die Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) sowie das Kompetenzzentrum für biomedizinische Weltraumforschung und Medizintechnik Biotesc der Hochschule Luzern beteiligt.

Europa  
Ø 3.122 km

Io  
Ø 3.631-3.660 km

Callisto  
Ø 4.821 km

Ganymed  
Ø 5.268 km

# FERNE MONDE UND MEERE

Zwei DLR-Instrumente werden Jupiters  
Eistrabanten untersuchen

von Ulrich Köhler

**2022** wird die Europäische Weltraumorganisation ESA zum ersten Mal mit einer eigenen Raumsonde ins äußere Sonnensystem aufbrechen. JUICE ist der Name der Mission und das Ziel geht aus dem Akronym hervor: Jupiter Icy Moon Explorer. Der „Eismondeforscher“ ist Bestandteil des Cosmic-Vision-Programms der ESA. Mit an Bord sind zehn wissenschaftliche Instrumente, unter ihnen JANUS und GALA, an denen das DLR maßgeblich beteiligt ist. Nach der Ankunft im Jahre 2031 wird JUICE vor allem die drei großen Eismonde Europa, Ganymed und Callisto erkunden: faszinierende Welten aus Eis, Fels und – Wasser.

Der große toskanische Universalgelehrte Galileo Galilei entdeckte und beschrieb 1610 zum ersten Mal Monde, die um Jupiter, also einen anderen Planeten kreisen. Damit bestätigte er das kopernikanische, heliozentrische Weltbild, das besagt, dass die „von Gott geschaffene“ Erde ein Planet ist wie andere auch. Und alle kreisen sie um die Sonne. Die Monde wurden nach Günstlingen des Zeus benannt: Io, Europa, Ganymed und Callisto. Später wurden sie zu Ehren Galileis als die Galileischen Monde bezeichnet.

## Ungleiche Begleiter eines Planetenriesen

Von Raumsonden aus der Nähe untersucht wurden sie erstmals 1973/74 von den Sonden Pioneer 10 und 11, viel detaillierter dann 1979 beim Vorbeiflug der Missionen Voyager 1 und 2. Die Bilder zeigten faszinierende, ganz unterschiedliche Welten. Io, der innerste Mond, ist der vulkanisch aktivste Körper des Sonnensystems. Dort treten bis zu 1.350 Grad Celsius heiße, stark schwefelhaltige Laven aus, die dem Körper ein surreales gelbes Antlitz verleihen. Europa, von derselben Größe wie der Mond der Erde, gleicht einer glatten Eiskugel, die von Hunderten von Brüchen im minus 170 Grad kalten Eispanzer überzogen ist. Mit fast 5.300 Kilometer Durchmesser ist Ganymed der größte Trabant im Sonnensystem. Unter seiner Eiskruste befindet sich ein Gesteinsmantel und ein Kern aus Eisen, Ursache für ein ausgeprägtes Magnetfeld – das einzige bei einem Mond. Der etwas kleinere Callisto schließlich ist von Tausenden von Einschlagskratern übersät, unter seiner Eiskruste scheint ein Stein-Eisen-Gemisch auf einen kaum differenzierten, schon früh geologisch inaktiven Körper hinzuweisen.

## Ozeane auf Europa und Ganymed?

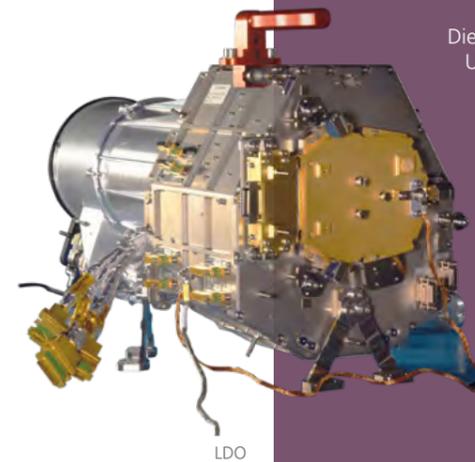
Zwischen 1995 und 2003 erkundete der NASA-Orbiter Galileo diese Welten. Neben den vier großen Monden umkreisen den 140.000 Kilometer großen Planeten noch 75 weitere, zum Teil nur wenige Kilometer große Trabanten. Die Mission brachte belastbare Hinweise zu der Annahme, dass unter den kilometerdicken Eiskrusten von Europa und Ganymed Ozeane existieren müssten.

## JANUS

Die wissenschaftliche Kamera an Bord von JUICE heißt JANUS (Jovis, Amorum ac Natorum Undique Scrutator – Lateinisch etwa für „Umfassende Beobachtung des Jupiter, seiner Liebhaften und Nachkommen“) und wurde in Italien, Deutschland, Spanien und Großbritannien konzipiert. Teile der Hardware wurden im DLR-Institut für Planetenforschung gebaut, welches mit Dr. Thomas Roatsch auch einen der beiden Leiter des Wissenschaftsteams stellt. Die Hauptelektronik wurde am Institut für Datentechnik und Kommunikationsnetze der TU Braunschweig entwickelt.

Eine der Hauptaufgaben von JANUS ist die Kartierung, also die optische Erfassung der Landschaften Ganymeds und Europas sowie der auf den Oberflächen sichtbaren Auswirkungen der Gezeiteneffekte, die für die subkrustalen Ozeane verantwortlich sind. Dazu verfügt das Kamerasystem neben einer hohen räumlichen Auflösung über einen breiten Spektralbereich und eine hohe radiometrische (Licht-)Empfindlichkeit in 13 Farbkanälen. Diese zeichnen Lichtsignale in Wellenlängen von 340 Nanometern (blau) bis 1.100 Nanometern (nahes Infrarot) auf. Aus der Ferne sollen auch Io sowie zahlreiche der kleinen Monde beobachtet werden.

Die hohe Empfindlichkeit wird von der lichtstarken Optik und der sensiblen Detektor- und Elektronikeinheit gewährleistet. JANUS verfügt über einen äußerst lichtempfindlichen Detektor, der die hohe Strahlungsbelastung in der Jupiterumgebung aushält. Die dazu am DLR entwickelte Ausleseelektronik ist äußerst rauscharm.



LDO

ESA/ATG medialab, NASA/JPL/DLR/ESA

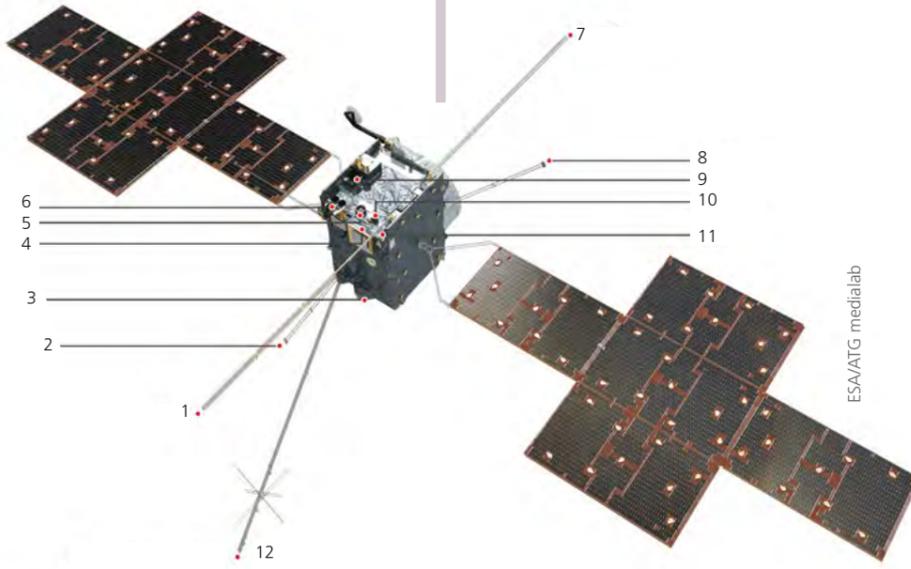
Mondbilder: NASA/JPL/DLR

EXPERIMENTE AUF JUICE

- 1/7 RIME: Radar zur Oberflächenstrukturerfassung
- 2/8 RPWI: Messung Plasma- und elektromagnetische Felder
- 3/9 PEP: Partikelspektrometer für Ionenströme
- 4 MAJIS: Abbildendes Spektrometer
- 5 GALA: Laseraltimeter zur Oberflächenvermessung
- 6 SWI: Submillimeterwellen-Spektrometer
- 10 JANUS: Kamerasystem zur Kartierung
- 11 UVS: Abbildendes UV-Spektrometer
- 12 Magnetometer-Strahl mit RPWI und J-MAG: Magnetometer zur Magnetfeldmessung

IM RAUMFAHRZEUG

3GM: Radiowellen-Analysepaket für Ganymed-Schwerefeldmessungen

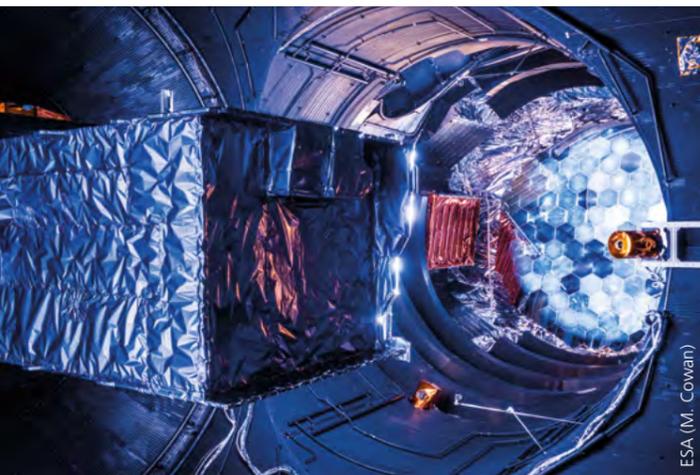


ESA/ATG medialab

Diese könnten mehr Wasser enthalten als alle Meere der Erde, selbst die Existenz einfacher Lebensformen wird für möglich gehalten! Bei Europa scheinen diese subkrustalen Ozeane entlang von Bruchstellen – den vielen, an die Kufenspuren von Schlittschuhläufern erinnernden Linien im Eis – sogar Wasser auf die Oberfläche zu pressen, wo es rasch gefriert und dabei die Landschaft verjüngt und verändert.

Wie ist das möglich, so fern der Sonne, bei Temperaturen von weit unter minus 100 Grad Celsius? Jupiter übt mit seiner enormen Masse gewaltige Gezeitenkräfte auf seine vier großen Monde aus, von denen die Trabanten deformiert und im Inneren durchgeknetet werden. Durch Reibung entsteht dabei Wärme und diese Wärme hält das Wasser über dem Gefrierpunkt. Hinzu kommt, dass Io, Europa und Ganymed zueinander in einer Resonanz stehen, sie umrunden den Planeten im Zeitverhältnis 4 zu 2 zu 1. Wenn die Monde dann immer wieder wie an einer Perlenschnur aufgereiht angeordnet sind, verstärkt dies den Gezeiteneffekt und erzeugt noch mehr Wärme. Bei Europa sind sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sogar ziemlich sicher, dass warmes Ozeanwasser unter dem Eispanzer durch den Gesteinsmantel zirkuliert und dabei Minerale herauslöst, die mit dem Wasser auf die Oberfläche gespült werden – Galileo (die Raumsonde) konnte Mineralsalze auf dem Eis spektroskopisch identifizieren.

Wasser, Wärme, Salze: Das sind einige der wichtigsten Voraussetzungen für das Entstehen und die Existenz von Leben. Längst gelten Europa und Ganymed als potenzielle „Habitate“ für mikrobielles Leben jenseits der Erde – in einer ganz anderen Umgebung als beispielsweise auf dem Mars, wo aktuell intensiv nach Spuren einstigen (und vielleicht sogar noch präsenten) Lebens gesucht wird. Das macht das Jupitersystem zum logischen Ziel weiterer Erkundungen.



Das JUICE Thermal-Entwicklungsmodell in der großen Weltraumsimulationskammer im ESA-Technologiezentrum im niederländischen Noordwijk

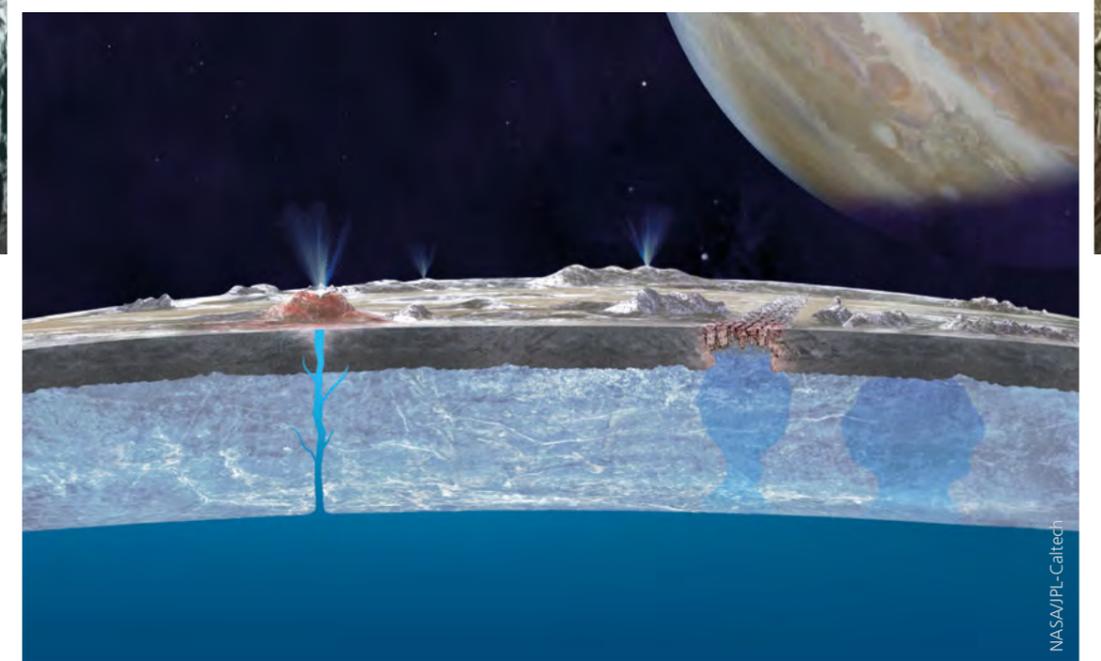
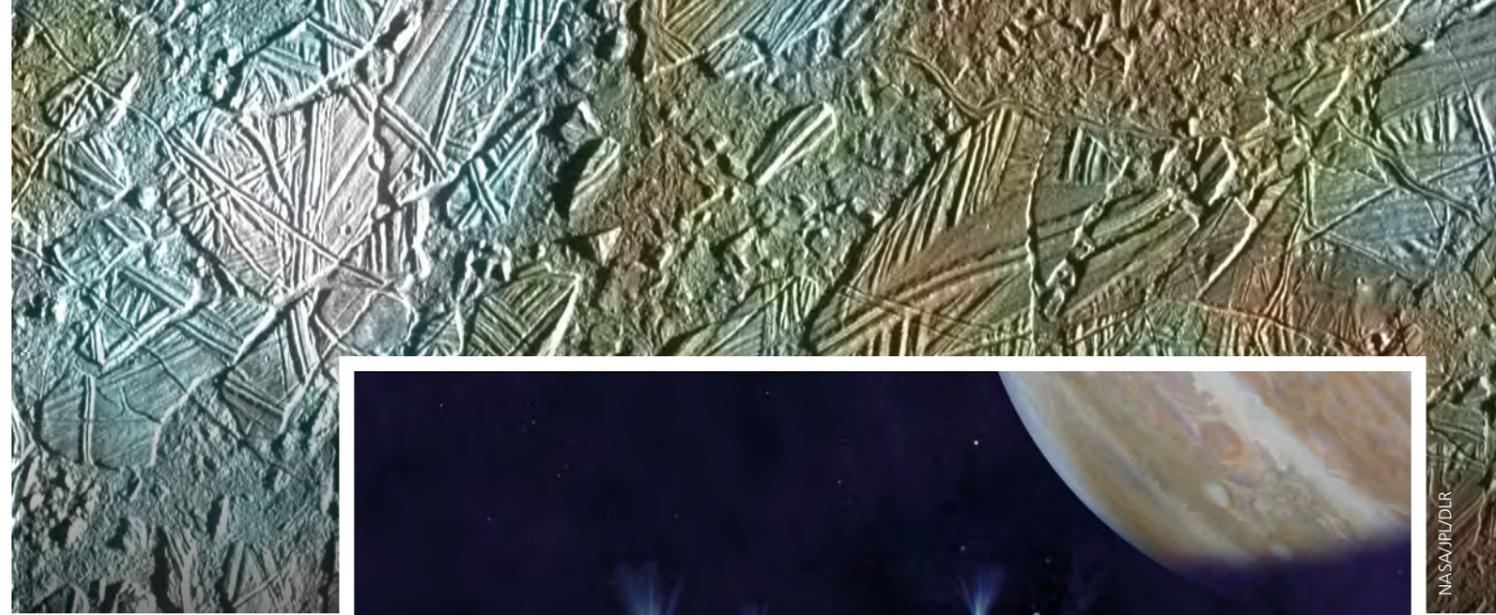
**Unsichtbare Meere und einzigartige Magnetfelder**

JUICE wird in den 2030er Jahren detaillierte Untersuchungen des Jupiter und seines Systems durchführen. Schwerpunkt der Mission ist es, herauszufinden, wie diese möglicherweise lebensfreundlichen Umgebungen unter den Krusten der eisigen Satelliten von Jupiter entstanden sind und wie sie heute aussehen. Dabei liegt der Fokus auf den unsichtbaren Meeren in Ganymed, Europa und möglicherweise auch Callisto. Ganymed soll als quasi-planetarer Körper und potenzieller Lebensraum am intensivsten untersucht werden. Der Mond ist ein natürliches Labor für die Analyse der Natur, Entwicklung und möglichen Bewohnbarkeit von eisigen Welten und darüber hinaus auch wegen seines einzigartigen Magnetfelds und der Plasmawechselwirkungen in der Jupiterumgebung interessant. Untersuchungen von Europa und Callisto werden das Bild dieser Monde vervollständigen. Jupiter selbst ist der Archetyp für die Gasgiganten des Sonnensystems und deshalb auch für die vielen Riesenplaneten, die als „Exoplaneten“ andere Sterne umkreisen und bereits zu Tausenden entdeckt wurden.

**Verschlungene Wege durchs All**

Doch zunächst wird noch viel Zeit vergehen. Aktuell wird die ESA-Raumsonde in Toulouse bei Airbus Space and Defence auf ihren Start an der Spitze einer Ariane 5 im Herbst 2022 vorbereitet. Die Instrumente sind bereits „auf Herz und Nieren“ getestet und kalibriert worden, um das Gütesiegel der „Weltraumtauglichkeit“ zu erhalten, jetzt wird eines nach dem anderen eingebaut. Fast acht Jahre soll die Reise durchs All dauern. Um Jupiter zu erreichen, der sich auf einem Orbit in 780 Millionen Kilometer Entfernung zur Sonne befindet, sind vier Vorbeiflüge an der Erde und einer an der Venus erforderlich. Die Mission gipfelt in einer achtmonatigen Umkreisung Ganymeds, bei der JUICE detaillierte Untersuchungen des Mondes und seiner Umgebung macht und am Missionsende unweigerlich auf Ganymed zerschellen wird.

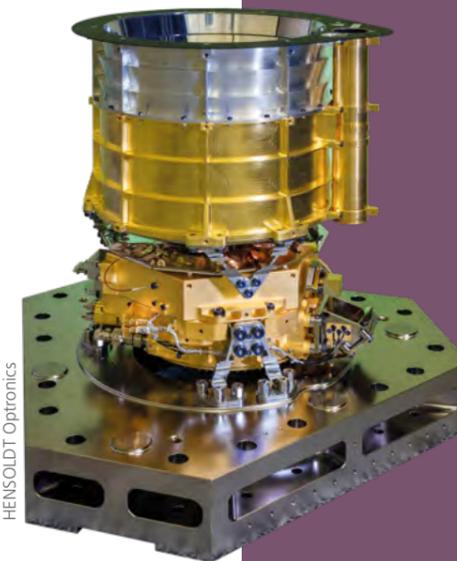
**Ulrich Köhler** ist Planetengeologe am DLR-Institut für Planetenforschung in Berlin-Adlershof und hat die Ankunft der NASA-Raumsonde Galileo 1995 am Jupiter noch in bester Erinnerung.



Zerbrochene, verschobene und rotierte Eisschollen, teilweise von farbigen Mineralsalzen bedeckt (Bild oben), sind klare Hinweise auf einen Ozean unter der Eiskruste von Europa (Bild rechts). Aus diesem wird salzhaltiges Wasser auf die Oberfläche gepresst, das dort gefriert und mit Schwefel von Vulkanausbrüchen auf Io reagiert.

**GALA**

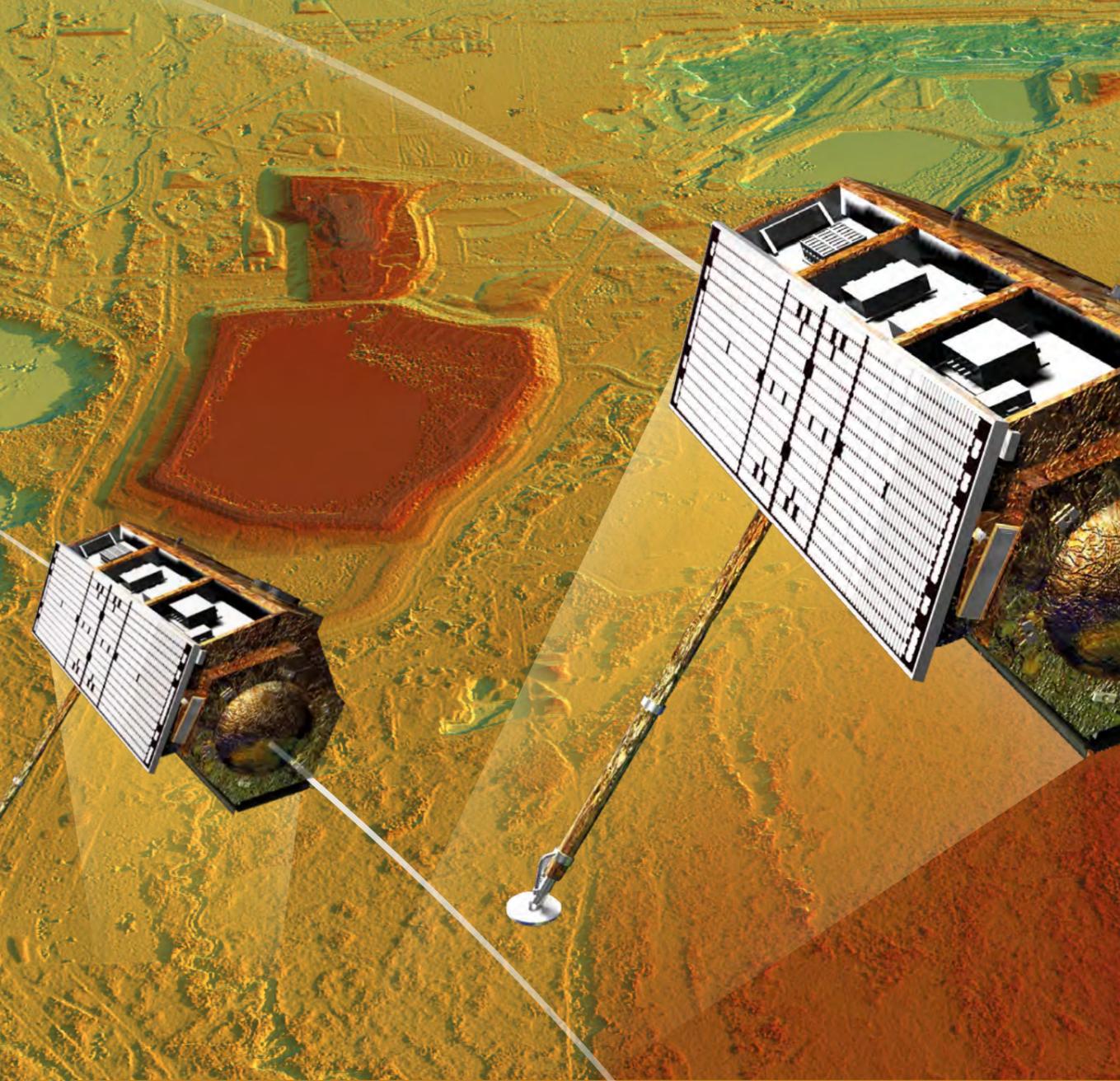
Das „Ganymed Laser-Altimeter“ (GALA) wurde in Verantwortung des DLR-Instituts für Planetenforschung entwickelt und in Zusammenarbeit mit Industriepartnern (HENSOLDT Optronics GmbH, Oberkochen) sowie Forschungseinrichtungen aus Deutschland, Japan, der Schweiz und Spanien gebaut. Es ist das erste Mal, dass ein solches Instrument im äußeren Sonnensystem zur Anwendung kommt. Wissenschaftlicher Leiter ist Dr. Hauke Hußmann vom DLR-Institut für Planetenforschung.



HENSOLDT Optronics

GALA wird die Deformation der Eiskruste Ganymeds und dadurch der Gestalt messen, um Hinweise auf einen globalen inneren Ozean zu erbringen. Außerdem entsteht eine umfangreiche Karte der gesamten regionalen und lokalen Topografie. Sie soll helfen, die Prozesse zu verstehen, die den Mond formten. Zusätzlich wird aus Messungen zu unterschiedlichen Zeiten des sieben-tägigen Umlaufs Ganymeds um Jupiter die Gezeitendeformation, das Heben und Senken der Kruste, analysiert. Aus deren Höhe können die Existenz eines inneren Ozeans nachgewiesen und mechanische Eigenschaften der darüber liegenden Eisschicht bestimmt werden. Das Experiment wird auch Messungen an Europa und Callisto aufzeichnen. Bei Europa erhofft man sich ebenfalls Hinweise auf flüssiges Wasser dicht unter der Oberfläche.

GALA besteht aus zwei Elektronikeinheiten und einem optischen Teil, der den Laser und das Teleskop für den Empfänger enthält. Bei den Messungen werden Laserpulse 30- bis 50-mal pro Sekunde aus 500 Kilometer Höhe im nahen Infrarot zur Oberfläche Ganymeds gesandt. Ein hochempfindlicher Detektor zeichnet die reflektierten Pulse auf. Weil GALA die Lichtlaufzeit auf weniger als eine Nanosekunde genau messen kann, lässt sich die Position und Ausrichtung der Raumsonde sehr genau bestimmen und so Ganymeds Oberfläche optisch präzise abtasten. Aus den Daten entsteht das globale Höhenmodell.

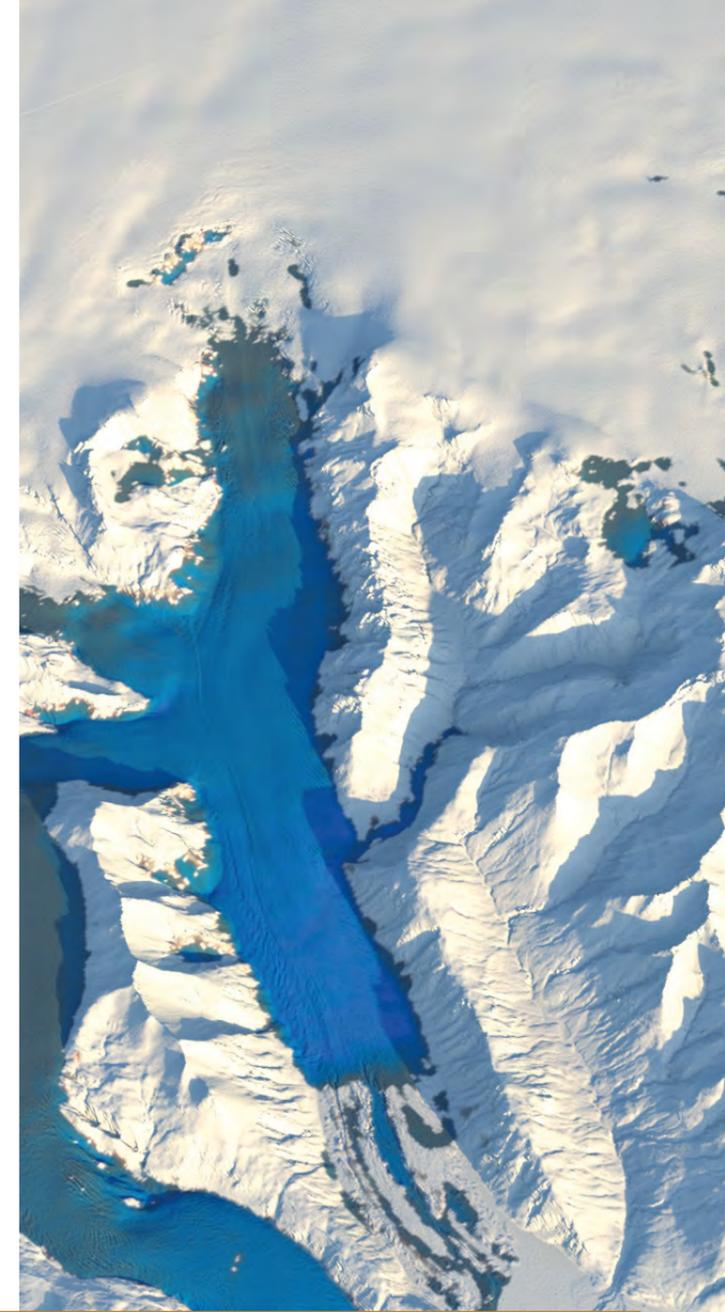


Seitdem das globale Höhenmodell DEM 2016 fertiggestellt wurde, nutzten mehr als 4.000 Forschende aus 97 Ländern seine Höhen­daten. Der Schwerpunkt liegt naturgemäß bei den Geowissenschaften wie der Geologie, Glaziologie, Ozeanografie oder Hydrologie. Aber auch Anwenderinnen und Anwender, die sich mit der Beobachtung von Vegetation, Umweltschutz, Landnutzung, Städte- und Infrastrukturplanung, Kartografie oder mit Krisenmanagement befassen, greifen auf die umfangreichen Datensätze zu und werten sie nach ihren Bedürfnissen aus. Das Besondere an TanDEM-X ist, dass es als sogenanntes Interferometer im All unterwegs ist. Durch den Formationsflug – der Abstand zwischen den Zwillingssatelliten variiert je nach Missionsphase zwischen mehreren Kilometern und zeitweise nur 120 Metern – haben die Sensoren eine dreidimensionale Sicht auf die Erde. So kann die Struktur des Geländes mit nur einem Überflug erfasst werden. Dies ist bislang weltweit einzigartig.

#### Menschliches Wirken und globale Veränderungen

Während das DLR-Team an dem ersten Modell arbeitete, wurde deutlich, dass die Höhengenaugigkeit von TanDEM-X so gut ist, dass sogar Veränderungen innerhalb eines Jahres gemessen werden können. Die Analysen zeigten, dass die Erdoberfläche sehr dynamisch ist. Nicht nur Höhenveränderungen in Gletschern, Permafrostgebieten und Wäldern, sondern auch landwirtschaftliche Aktivitäten und Veränderungen in der Infrastruktur hinterlassen deutliche Spuren. Diese Prozesse zu beobachten und quantitativ zu bestimmen, ist nicht nur für die Wissenschaft hoch interessant, sondern im Hinblick auf den Klimawandel auch von gesellschaftspolitischer Relevanz. So wurde 2017 entschieden, die Mission mit Fokus auf topografische Veränderungen fortzuführen.

Bis 2020 kartierten die beiden TanDEM-Satelliten die vollständige Landmasse der Erde ein weiteres Mal als Grundlage für ein aktualisiertes Höhenmodell, das TanDEM-X DEM 2020. Diesen zweiten Datensatz vergleichen die DLR-Forscherinnen und -Forscher mit der ersten DEM-



# AUF DEN SPUREN DER ZEIT

## Ein neues Höhenmodell des Satellitenduos TanDEM-X zeigt auf, wie sich unsere Erdoberfläche verändert

von Dr. Manfred Zink

**M**it dem Start des Radarsatelliten TanDEM-X begann im Jahr 2010 eine neue Ära in der Radarfernerkundung. Seitdem umkreist er im engen Formationsflug mit seinem drei Jahre älteren „Zwilling“ TerraSAR-X die Erde. Zusammen liefern die beiden Satelliten Daten für Höhenmodelle der ganzen Welt. Diese stellen eine unentbehrliche Grundlage für kommerzielle Anwendungen und wissenschaftliche Fragestellungen dar, denn bis dahin existierten für weite Teile der Erde nur grobe, uneinheitliche oder lückenhafte Höhenmodelle unterschiedlicher Datenquellen und Erhebungsmethoden. Die Mission TanDEM-X änderte dies mit ihrem Digital Elevation Model (DEM), einem digitalen Höhenmodell der gesamten Landoberfläche der Erde in einheitlicher Qualität und bislang unerreichter Genauigkeit. Das ist den DLR-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftlern aber noch nicht genug.

Version und bewerten die zeitlichen Änderungen. Die ersten Ergebnisse zeigen neben menschengemachten Änderungen in Tagebaumrinnen oder größeren Infrastrukturprojekten vor allem dramatische Entwicklungen wie beispielsweise das Abschmelzen der Gletscher und Eisschilde oder die ungehemmte Abholzung der tropischen Wälder.

Gletscherzungen am südöstlichen Rand des Vatnajökull, des größten Gletschers in Island. Über den blau gefärbten Flächen wurden zwischen 2012 und 2017 bis zu 40 Meter Höhenänderung durch Abschmelzen gemessen.



### Von Schnappschüssen und Zeitreihen

Indem bestimmte Gebiete von den Satelliten wiederholt beobachtet werden, entsteht eine zeitliche Abfolge von Daten. Nach und nach wächst ein Datensatz heran, der neben den drei räumlichen Dimensionen eine vierte Dimension – die Zeit – als neue Informationskomponente enthält und damit neue, bislang verborgene Erkenntnisse hervorbringt. Während das TanDEM-X DEM 2020 einen einmaligen Vergleich zweier Zeiträume zulässt, gewissermaßen einen Schnappschuss der Ereignisse auf globaler Ebene, geben Aufnahmen über solchen Fokusgebieten ein detailliertes Bild. So lässt sich zum Beispiel das Wachstum und die Degradation von Wäldern messen. Wiederholte Höhenmessungen erlauben auch die Beobachtung und Quantifizierung des durch die globale Erderwärmung verursachten Abschmelzens von Gletschern und Eisschilden. Nie zuvor wurden Grönland und die Antarktis so umfassend und mit solcher Genauigkeit in 3D vermessen.

Mittlerweile haben beide Satelliten ihre Lebensdauer von fünfeneinhalb Jahren deutlich überschritten. Dennoch sind ihre Radarsysteme noch in ausgezeichnetem Zustand und arbeiten auch nach elf, beziehungsweise vierzehn Betriebsjahren noch absolut stabil. Immer noch liefern sie zuverlässig hochqualitative Radarbildprodukte. Auch ihre Treibstoffvorräte und ihre Batteriekapazitäten erlauben aus heutiger Sicht einen Satellitenbetrieb ohne drastische Einschränkungen für mehrere zusätzliche Jahre.

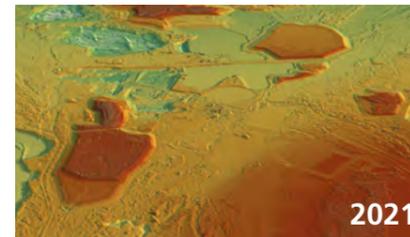
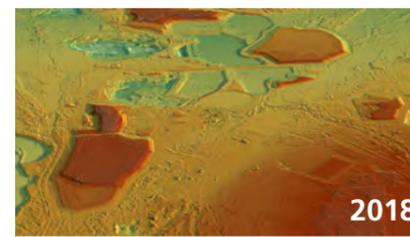
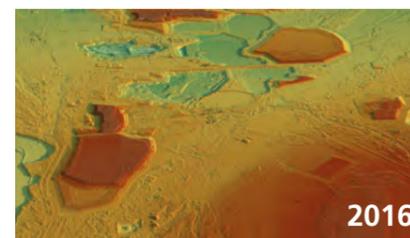
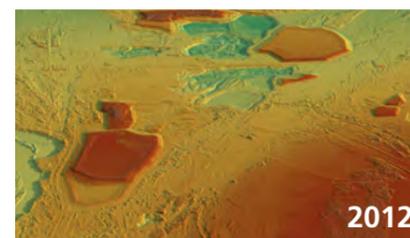
### Aus zwei mach vier

Ursprünglich hatte das TanDEM-X-Team nicht geplant, diese dynamischen Prozesse zu erfassen. Mit zunehmender Dauer steigert es jedoch den Wert der Mission. Insbesondere durch die interferometrischen Aufnahmen im Formationsflug entsteht ein Informationsgewinn, der die Mission TanDEM-X von anderen Erdbeobachtungsmissionen abhebt. Die zeitliche Komponente der Fokusgebiete erzeugt weltweit einmalige Datensätze und wertvolle Beiträge zu gesellschaftspolitisch relevanten Themen und Fragen des Klimawandels, die immer aussagekräftiger werden, je länger das Projekt andauert.

### DIE TECHNIK HINTER TanDEM-X

Im Gegensatz zu optischen Verfahren bieten Radare mit synthetischer Apertur (engl. Synthetic Aperture Radar, SAR) den Vorteil, dass sie unabhängig von der Wolkenbedeckung und Sonneneinstrahlung großflächige und hochaufgelöste Aufnahmen erzeugen können. Zusätzlich steigert die bistatische Interferometrie, bei der zwei Satelliten im Formationsflug unterwegs sind, im Vergleich zu konventionellen Stereo-Verfahren die Höhengenaugkeit. Dazu sendet während einer Aufnahme immer nur einer der beiden Satelliten, wohingegen beide die von der Erdoberfläche reflektierten Echosignale empfangen. Aufgrund leicht abweichender Orbitpositionen ergeben sich bei den Satelliten Entfernungsunterschiede zu einem Punkt auf der Erdoberfläche, die mittels Interferometrie – also die Auswertung der Radarwellen-Phase – millimetergenau bestimmt werden können. Aus diesen ermitteln die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des DLR-Bodensegments mit einem aufwändigen Rechenverfahren die Höhe der Erdoberfläche. Hierbei ist äußerste Präzision gefragt: Der Abstand der Satelliten muss mit GPS-Empfängern millimetergenau erfasst und die Radarsysteme auf Bruchteile von Picosekunden (das entspricht bei zwei Uhren einem Gangunterschied von etwa einer Sekunde in 100.000 Jahren) synchronisiert werden. Sie müssen sogar relativistische Effekte berücksichtigen. Das Ergebnis ist ein digitales Höhenmodell (engl. Digital Elevation Model, DEM). Es beinhaltet die Höheninformation der Geländepunkte in einem regelmäßigen Raster von 12 Metern x 12 Metern. In Bezug auf die erreichte Genauigkeit hat die Mission TanDEM-X alle Erwartungen deutlich übertroffen: Der absolute Höhenfehler beträgt etwa einen Meter und liegt damit um eine Größenordnung unterhalb der ursprünglichen Spezifikation von zehn Metern. Die Zahl der Lücken im Datensatz liegt auch weit unter der Spezifikation und der Abdeckungsgrad beträgt mehr als 99,89 Prozent.

Diese Szene östlich vom Lake Taupo auf der Nordinsel Neuseelands zeigt die Höhenänderung zum globalen TanDEM-X DEM für 2019. In dem intensiv bewirtschafteten Waldgebiet hat die Höhe durch Abholzung in den blau markierten Flächen um bis zu 35 Meter abgenommen, man erkennt aber auch deutlichen Zuwachs in der Größenordnung von mehreren Metern in Rot. Aus solchen Höhenänderungen können mit Kenntnis der Baumart Biomasseänderungen bestimmt und damit Informationen über die CO<sub>2</sub>-Bilanz geliefert werden.



Zeitreihe von Höhenmodellen im Bereich der Athabasca-Ölsande im Nordosten der Provinz Alberta in Kanada. Die Aufnahmen aus 2012, 2016, 2018 und 2021 zeigen das dramatische Fortschreiten der Ölgewinnung aus einer der größten Ölsandlagerstätten weltweit.

### DIE DATEN IM WEB

Die Höhenmodelle von TanDEM-X gibt es neben dem vollaufgelösten 12-Meter-Raster auch im reduzierten Rastermaß von 30 und 90 Metern. Für Forschende sind die 12- und 30-Meter-Varianten im Rahmen eines Antragsverfahrens über das DLR zugänglich (im Web unter: tandemx-science.DLR.de). Die 90-Meter-Variante ist für wissenschaftliche Zwecke nach einfacher Registrierung ohne aufwändiges Antragsverfahren frei verfügbar.

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

Zusätzlich möchte das Team mit dem Missionsvorschlag „High Resolution Wide Swath“, kurz HRWS, auf dem Erfolg von TanDEM-X aufbauen. HRWS soll auf vier Satelliten basieren – einem Hauptsatelliten, der Radarsignale im X-Band sendet, sowie drei kleinen Begleitsatelliten, den sogenannten MirrorSAR-Satelliten, die nur die von der Erde reflektierten Signale empfangen. Die Kombination dieser drei Messungen ermöglicht die Erzeugung von deutlich genaueren oder feiner abgetasteten Höhenmodellen. Außerdem können digitale Geländemodelle von jeder Region der Erde auf Anforderung nach kurzer Wartezeit geliefert werden. Parallel erweitert das Team beständig das Bild, das uns TanDEM-X von der Erde liefert. Dabei entsteht nach und nach das TanDEM-X DEM 2020 und eine globale Änderungskarte. In den kommenden Jahren möchten sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf die globale 3D-Beobachtung der Kryosphäre, der Wälder sowie von Großstädten fokussieren und so den stetigen Wandel dokumentieren.

**Dr. Manfred Zink** leitet die Abteilung Satelliten-SAR-Systeme im DLR-Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme in Oberpfaffenhofen. Die Mission TanDEM-X begleitet er schon seit 2005.



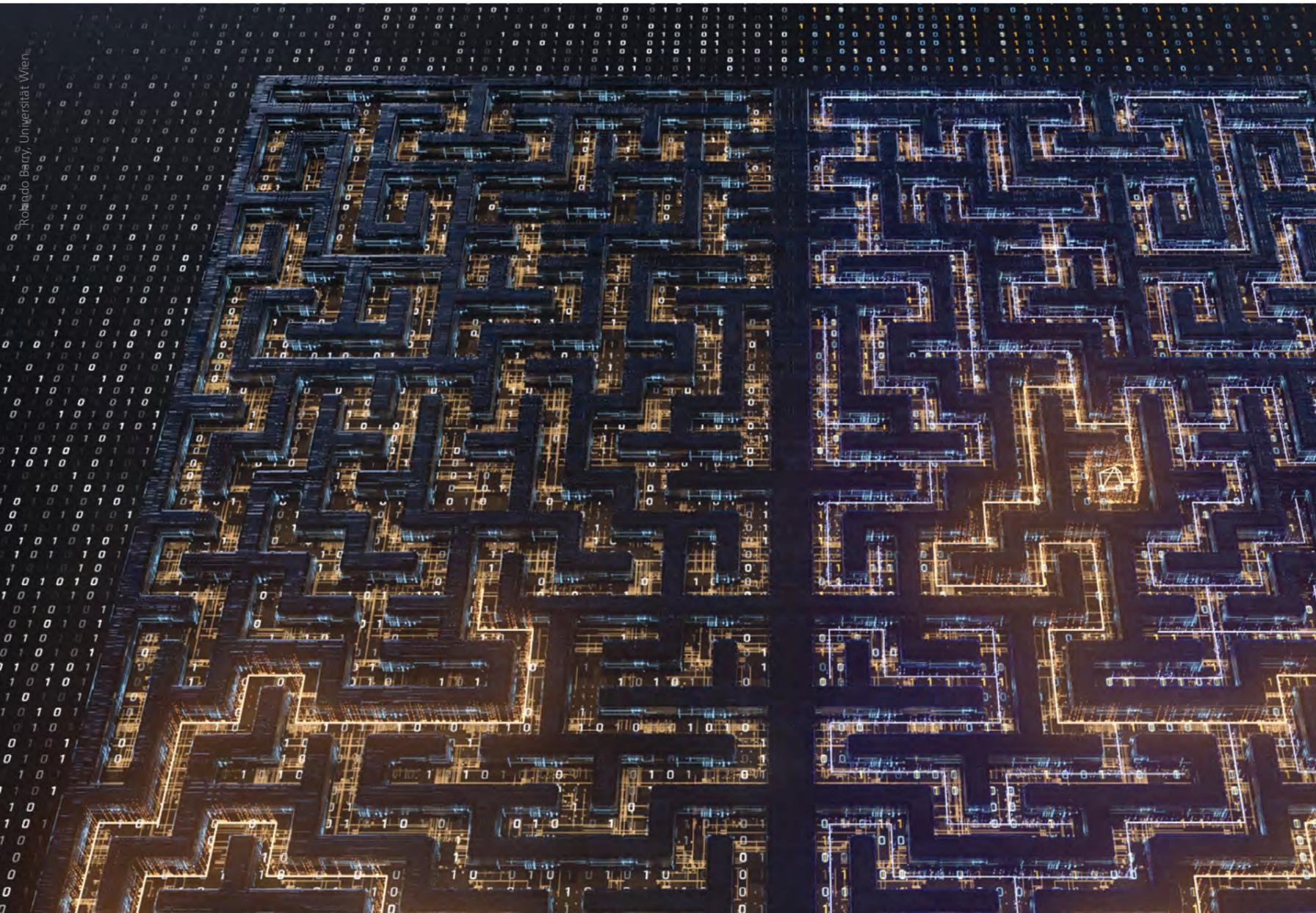
Höhenänderungskarte (Zeitraum 2011/12 und 2018/19) für ein Gebiet im sogenannten Deforestation Arch im brasilianischen Bundesstaat Rondônia. Die blau markierten Flächen zeigen die fortschreitende Rodung des Regenwaldes.

# VOLL VERSPIEGELT



Solarthermische Turmkraftwerke reflektieren mit tausenden von Spiegeln Sonnenlicht zu einem Strahlungsempfänger an der Spitze eines Turms. Dieser wandelt die Solarstrahlung in Wärme um. Damit treibt das Solarkraftwerk eine Dampfturbine an, die über einen Generator Strom erzeugt. Ein Speicher kann Wärme, die gerade nicht benötigt wird, aufnehmen und sie bei steigendem Bedarf wieder abgeben. Als Strahlungsempfänger nutzen die Turmkraftwerke sogenannte Rohr-Strahlungsempfänger mit Flüssigsalz als Wärmeträgermedium. Das Salz lässt sich bis auf 565 Grad Celsius erhitzen. Bei höheren Temperaturen zersetzt es sich zunehmend. Das Spiegelfeld eines Solarturms kann jedoch noch deutlich höhere Temperaturen erzeugen.

Am Multifokusturm (links) in Jülich testen Forscherinnen und Forscher des DLR-Instituts für Solarforschung mit Industriepartnern ab komendem Frühjahr einen neuen Rohr-Strahlungsempfänger mit Flüssigsalz. Er kann Temperaturen bis zu 600 Grad Celsius aufnehmen und soll die Leistungsfähigkeit von Solarkraftwerken steigern. Rechts neben dem Multifokusturm ist das solarthermische Versuchskraftwerk des Instituts zu sehen.



Maschinelles Lernen gleicht dem Ausprobieren und Merken von Wegen durch ein Labyrinth. Herausfordernd ist, dieses Lernen zu beschleunigen. Dabei kann die Quantenphysik helfen.

**A**us Erfahrungen lernen – für uns Menschen ist das alltäglich, nicht jedoch für Maschinen! Heutige Computer können Muster, Bilder oder Sprache erkennen. Mithilfe künstlicher Intelligenz lösen sie Aufgaben selbstständig. Sind diese zu komplex, stoßen sie jedoch an ihre Grenzen. Quantenalgorithmen sind die Basis für eine neue Form des maschinellen Lernens. Diese ermöglichen bisher unerreichte Rechenleistungen und Effizienzen. Die DLR-Forscherinnen und -Forscher haben dabei völlig neue Anwendungen im Blick, wie etwa die Daten- und Informationsverarbeitung, die Bereiche Industrie 4.0, Robotik, Finanzdienstleistung, Logistik sowie die Medizin und das Gesundheitswesen. Eine von ihnen ist Dr. Sabine Wölk. Sie arbeitet am DLR-Institut für Quantentechnologien. Jüngst hat sie als Teil eines internationalen Forschungsteams bewiesen, dass ein Quanten-Lernalgorithmus schneller ist als sein klassisches Pendant.

**Mittlerweile können Computer, Maschinen oder Roboter lernen und Aufgaben selbst lösen, die zuvor nur mit menschlicher Intelligenz zu meistern waren. Funktioniert diese künstliche Intelligenz genauso wie das Lernen bei uns Menschen?**

■ Da gibt es Ähnlichkeiten. Wir lernen, indem sich unser Gehirn durch Reize und Erfahrungen immer wieder neu strukturiert. Abstraktes Denken sowie das Erinnern an Dinge und Ereignisse ermöglicht es uns beispielsweise, Muster oder Situationen zu erkennen und zuzuordnen. Wir erweitern unser Wissen durch selbstständiges Denken und können so auch neue, unbekannte Aufgaben lösen.

Hinter maschinellem Lernen stecken Computeralgorithmen. Das sind mathematische Rechenvorschriften, die zunächst ganz strikt Eingabewerte auf Ausgabewerte abbilden. Beim bestärkenden Lernen, dem sogenannten Reinforcement Learning, entwickelt ein Algorithmus selbstständig Strategien, um Aufgaben zu lösen. Dazu probiert er verschiedene Lösungswege oder Aktionen aus. Waren diese erfolgreich, merkt sich das der Computer. Mit diesem Wissen kann er dann auch neue, unbekannte Aufgaben lösen – vorausgesetzt, sie ähneln früheren, erfolgreich gelösten Aufgaben.

**Wie lässt sich einem Computer dieses Wissen beibringen?**

■ Das funktioniert wie bei uns Menschen: durch Üben, Üben, Üben. Dazu müssen die Lernalgorithmen zunächst viele ähnliche Aufgaben bearbeiten und erfolgreich lösen. Nehmen wir ein einfaches Beispiel: Kartoffeln schälen. Wir erkennen eine Kartoffel als solche. Dabei kommt es nicht auf Form und Größe an. Dadurch ist das Schälen der Kartoffel für uns einfach – für eine Maschine jedoch nicht. Wären alle Kartoffeln exakt gleich groß, könnte eine Maschine Kartoffeln viel präziser schälen als wir, denn sie führt

## DIE PFADFINDERIN

Dr. Sabine Wölk bringt Algorithmen  
das Lernen bei – mit Quanten  
von Dr. Jens Mende



**DR. SABINE WÖLK ...**

... ist theoretische Physikerin am DLR-Institut für Quantentechnologien in Ulm. Sie forscht an Quantenalgorithmen zum beschleunigten maschinellen Lernen. 2011 promovierte sie über die Faktorisierung von Zahlen mithilfe von Quantenalgorithmen. Anschließend ging Sabine Wölk für einen einjährigen Forschungsaufenthalt an die Texas A&M University. Danach forschte sie an den Universitäten Siegen und Innsbruck über theoretische Aspekte zur Entwicklung von Quantencomputern auf Basis von Ionenfallen sowie Quantenalgorithmen zum beschleunigten maschinellen Lernen. Seit 2019 ist Dr. Wölk beim DLR.

## WAS IST MASCHINELLES LERNEN?

Hierbei handelt es sich um ein Teilgebiet der künstlichen Intelligenz. Maschinelles Lernen ermöglicht es Maschinen, Aufgaben selbstständig zu lösen und intelligent auszuführen. Dafür imitieren sie das menschliche Lernen. Computeralgorithmen erzeugen eigenes Wissen, indem sie in gespeicherten Datensätzen Strukturen, Muster und Ähnlichkeiten identifizieren. Mithilfe dieses Erfahrungsschatzes können die Algorithmen dann eigenständig Vorhersagen und zielführende Entscheidungen treffen, ohne zuvor explizit dafür programmiert worden zu sein. Erfolg und Misserfolg beim Lösen neuer Aufgaben verfeinern und verbessern dieses Wissen ständig. Typische Anwendungen des maschinellen Lernens sind die Sprach- und Bilderkennung, das Data-Mining, Empfehlungs-Engines ebenso wie autonomes Fahren und Robotik.

immer wieder exakt denselben Vorgang aus. Mit echten Kartoffeln funktioniert das allerdings nicht so einfach. Aufgrund der schieren Vielfalt ist es auch nicht möglich, die Maschine vorab auf alle möglichen Kartoffelformen und -größen zu programmieren. Dennoch ließe sich ein Computer dazu anlernen. Ist die abgeschnittene Kartoffelschale zu dick, würde der Lernalgorithmus einen schlechten Wert abspeichern. Für dünne Schalen gäbe es einen guten Wert.

### Was ist die größte Herausforderung beim maschinellen Lernen?

Je schwieriger und komplexer eine Aufgabe ist, umso länger dauert es, bis der Lernalgorithmus eine Lösung gefunden hat. Selbst um einfache Muster wiederzuerkennen, brauchen Computer meist viele hundert Lernversuche. Herausfordernd ist, dieses Training zu beschleunigen.

Auch hier ein einfaches Beispiel: Angenommen, Sie suchen in einer fremden Stadt einen Weg an Ihr Ziel. Sie haben allerdings weder einen Stadtplan noch ein Navigationsgerät. Anfangs entscheiden Sie sich an jeder Kreuzung zufällig für einen Weg. Irgendwann kommen Sie so zum Ziel. Jedoch war dies wahrscheinlich nicht der kürzeste Weg. Beim nächsten Mal kennen Sie sich schon ein wenig besser aus. Sie gehen dann vorzugsweise Straßen, von denen Sie inzwischen wissen, dass

sie in die richtige Richtung führen. Ab und zu nehmen Sie dennoch eine neue, noch unbekannte Abzweigung. So können Sie andere, noch kürzere Wege zum Ziel finden. Je größer die Stadt ist, umso länger dauert die Suche. Sind es zu viele Wege, schaffen Sie es nicht mehr, alle zu gehen. Das entspricht einer klassischen Rechenmethode, bei der klassische Computer an ihre Grenzen stoßen.

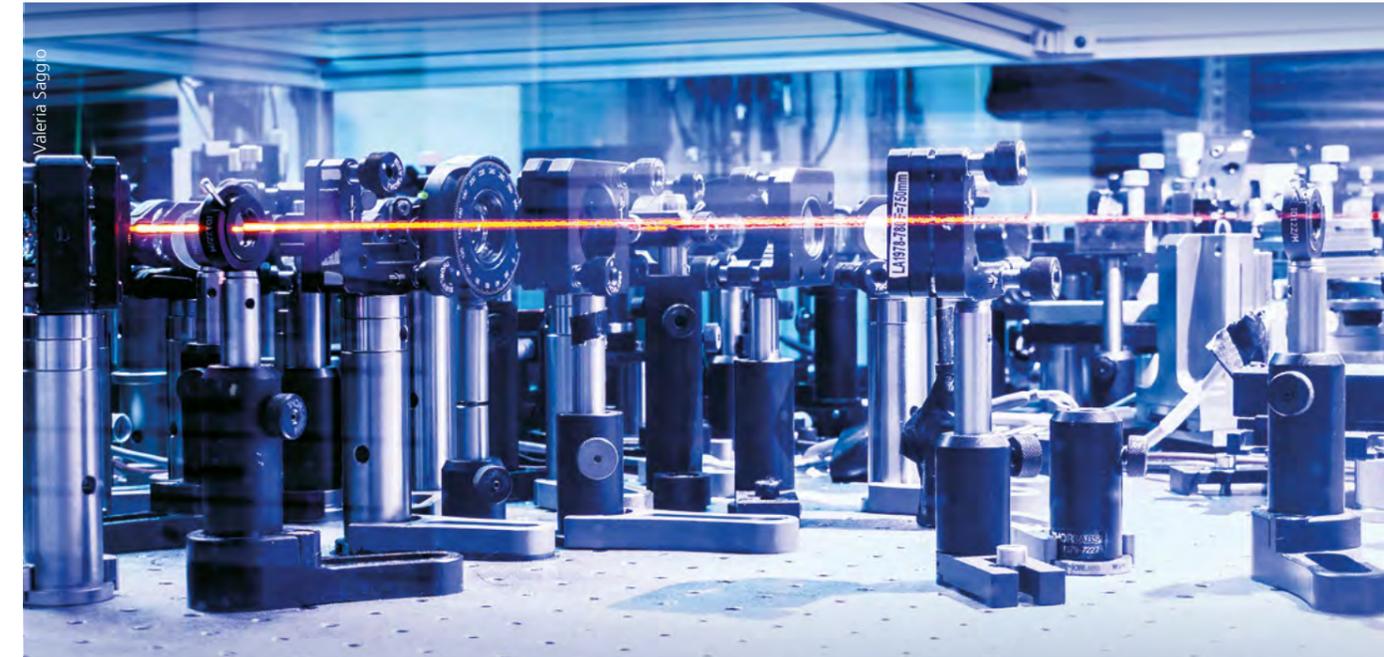
Hier kann die Quantenphysik helfen. Wären Sie ein quantenphysikalisches Teilchen, könnten Sie an jeder Kreuzung gleichzeitig nach links und rechts gehen. Dadurch würden Sie viele Wege gleichzeitig ausprobieren. Diese Eigenschaft ist der entscheidende Vorteil von Quantenalgorithmen.

### Die Quantenphysik kann maschinelles Lernen beschleunigen – wie lässt sich dies in einem Laborversuch beweisen?

Es ist möglich, Algorithmen mit optischen Bauelementen nachzubilden. Das sind Aufbauten aus Spiegeln, Linsen, Strahlteilern oder Lichtleitern. Diese verändern Licht in der gleichen Weise, wie in einem Algorithmus Rechenschritte ablaufen. Dabei tragen die Lichtteilchen, die Photonen, die zu verarbeitende Information. Je nachdem, wie die optischen Elemente angeordnet und eingestellt sind, können damit unterschiedliche Rechenoperationen abgebildet werden.

In unserem Experiment steckte das Rechenergebnis in der Information, welchen Weg ein Photon durch unsere Apparatur genommen hat. Dabei ist es tatsächlich mehrere Wege gleichzeitig gegangen. Man kann es sich so vorstellen, als würde sich das Photon wie eine Wolke über die Apparatur ausdehnen. Wir konnten dies anhand sogenannter Interferenzen nachweisen. Das sind charakteristische Helligkeitsmuster. Deren Struktur ähnelt Mustern von sich überlagernden Wasserwellen. Beim Modellieren eines klassischen Algorithmus kann das Photon immer nur einen einzelnen Weg nehmen. Dabei treten dann keine Interferenzen auf.

Mit unseren Projektpartnern an den Universitäten Innsbruck, Leiden und Wien haben wir auf diese Weise mithilfe eines Wellenleiterchips des Massachusetts Institute of Technology gezeigt, dass ein Quantenalgorithmus weniger Rechenschritte benötigt als sein klassisches Äquivalent. Dessen Rechenzeit war quadratisch langsamer als die unseres Quantenalgorithmus. Das heißt, der Quantenalgorithmus benötigt nur 2 statt 4 Rechenschritte, 10 statt 100 oder 1.000 statt einer Million. Das macht ihn so unglaublich effektiv.



Quantenalgorithmen sind effektiver als klassische Algorithmen: Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben dies in einem Laborversuch mit Lichtteilchen (Photonen) erfolgreich bewiesen.

### Wo lässt sich diese enorme Effizienz nutzen? Wie weit liegen die Quantenwelt, maschinelles Lernen und unser Alltag auseinander?

Noch ist maschinelles Lernen mit Quantenalgorithmen vor allem Grundlagenforschung. Wir arbeiten an der prinzipiellen Durchführbarkeit. So schaffen wir Fähigkeiten, die für spätere Anwendungen hilfreich sind. Ein Fernziel ist beispielsweise die selbstständige Robotik. Da gibt es unzählige Anwendungen in Industrie, Wirtschaft, Mobilität oder Umwelt, bis hin zur Medizin und im Gesundheitswesen.

### Was sind die nächsten Schritte in diese visionäre Zukunft?

Bisher hat maschinelles Lernen auf Quantenbasis das Laborstadium noch nicht verlassen. Unser Team arbeitet zusammen mit anderen

DLR-Instituten daran, Quantenalgorithmen und Quantenhardware zu entwickeln und zu optimieren. Das Ziel ist, mit Quantentechnologien hochkomplexe, anwendungsnahe Aufgaben zu lösen. Ein Beispiel sind elektrochemische Vorgänge auf atomarer Ebene in Batterien und Brennstoffzellen. Mithilfe von Quantencomputern wollen wir diese mikroskopischen Abläufe ganz exakt simulieren. Indem wir die atomare Ebene verstehen, wollen wir Materialien gezielt verändern, um makroskopische Eigenschaften zu verbessern. Mit dem DLR-Institut für Technische Thermodynamik beispielsweise arbeiten wir daran, dadurch die elektrische Leistung und die Energiedichte von Batterien zu steigern. Auch hier sind Quantenalgorithmen unschlagbar.

Dr. Jens Mende verantwortet am DLR-Standort Stuttgart die Kommunikation.

Ein Roboter versucht, herauszufinden, welche Aktion am günstigsten ist: nach oben oder unten gehen. Hierzu benutzt er einen kleinen Quantenprozessor, basierend auf Lichtleitern und Photonen (dargestellt als Lichtwelle). Jeder Lichtleiter steht hierbei für eine Aktion. Der Roboter präpariert ein Lichtphoton so, dass es mit gleicher Wahrscheinlichkeit in allen Lichtleitern anzutreffen ist. Dies nennt man Superposition.

Das Photon fliegt durch den Quantenprozessor und ändert seinen Zustand abhängig davon, welche Aktionen günstig sind. Dabei kommt es zu Interferenz.



Ähnlich wie bei Wasserwellen, löschen sich Wellen aus, falls Täler auf Berge stoßen oder verstärken sich, falls Täler auf Täler und Berge auf Berge stoßen.

Am Ende wird das Photon mit hoher Wahrscheinlichkeit in dem Lichtleiter detektiert, der die günstigere Aktion anzeigt. In diesem Beispiel „nach oben gehen“.



# WENN JEDE MINUTE ZÄHLT

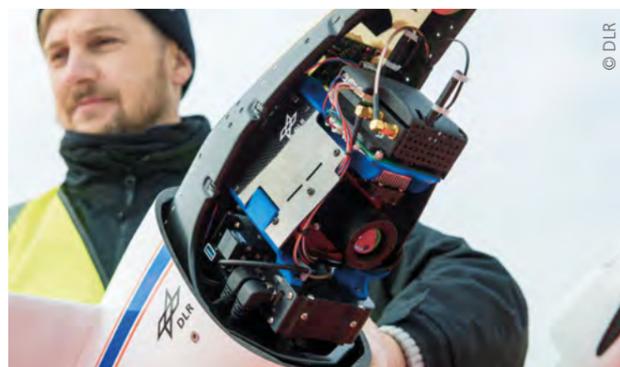
Bei humanitären Hilfeinsätzen unterstützt das DLR die Hilfsorganisation I.S.A.R. Germany

von Melanie-Konstanze Wiese

**B**ei Katastrophenszenarien wie der Flut im Sommer 2021 in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen, dem Erdbeben 2017 in Mexiko oder der verheerenden Explosion in Beirut 2020 müssen Einsatzkräfte schnell handlungsfähig sein. Das DLR kooperiert seit 2016 mit der Hilfsorganisation International Search-and-Rescue Germany, kurz I.S.A.R. Dabei erproben die Partner neue Technologien zur raschen Aufklärung von Schadenslagen im internationalen Katastropheneinsatz. Mit seinem technischen Know-how und eigens dafür geschulten Personal unterstützt das DLR-Institut für Optische Sensorsysteme I.S.A.R. bei der Forschungs- und Entwicklungszusammenarbeit im Krisen- und Katastrophenmanagement. Aber nicht nur das: Die vielfältigen Hilfeinsätze stellen spezielle Anforderungen an die Technik, die bereits in der Entwicklung berücksichtigt werden müssen. Für die DLR-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler bedeutet dies, dass ihre Technologien aus dem Labor direkt in der Praxis zum Einsatz kommen müssen.

## Maßgeschneiderte Technik

Oft muss binnen weniger Stunden entschieden werden, wer sich an einem Einsatz beteiligt. Gleichzeitig muss die Technik schnell einsatzfähig und leicht transportabel sein. Daher entwickelte das Team aus dem DLR-Institut für Optische Sensorsysteme in Berlin sein Kamerasystem MACS (Modular Aerial Camera System) so weiter, dass es auch auf kleinen unbemannten Flugsystemen (UAV) betrieben werden kann. Speziell für Hilfeinsätze entstand „MACS-Micro“ – so der Name dieses Mitglieds aus der MACS-Familie. Die handliche Kameravariante integrierten die Wissenschaftler in eine VTOL-Drohne (Vertical Take-Off and Landing), ein unbemanntes Flächenflugzeug, welches mit 80 Kilometern pro Stunde 90 Minuten lang betrieben werden sowie vertikal starten und landen kann. Das ist ein klarer Vorteil für den Hilfeinsatz, denn die Start- und Landebahn wird in die Luft verlegt.



DLR-Wissenschaftler Matthias Geßner mit der VTOL-Drohne. In der Mitte ist das Objektiv der MACS-Kamera zu sehen, die in die Drohne eingebaut ist.

„Das gesamte Missionsequipment, also Drohne, Kamera und Bodenstation, passt in eine 1,8 Meter lange Kiste, die etwa 25 Kilogramm wiegt, ist also absolut reisetauglich“, sagt Ralf Berger. Er leitet die Abteilung Sicherheitsforschung und Anwendungen im DLR-Institut. „Zusätzlich können wir die Einsätze je nach Situation mit weiterer Ausrüstung wie Kleindrohnen zur lokalen Erkundung unterstützen.“

Mit dem Kamerasystem werden in Echtzeit oder direkt nach der Landung hochauflösende Karten der überflogenen Gebiete erstellt. „Innerhalb weniger Minuten können wir so Großschadenslagen aus der Luft kartieren und den Hilfskräften diese Informationen sofort vor Ort zur Verfügung stellen“, erklärt Ralf Berger. Unbekannte Einsatzlagen können diese damit viel schneller und sicherer erkunden.



## 24/7 im Standby

Nach dem Einsatz ist vor dem Einsatz: So muss das Team um Ralf Berger das gesamte Equipment stets in einem einsatzfähigen Zustand halten. Denn wenn eine Anfrage zu einem Hilfeinsatz kommt, bleibt nicht viel Zeit. Zugleich ist gut geschultes Personal ein wesentlicher Bestandteil der I.S.A.R.-Kooperation. Zum Team gehören drei erfahrene Wissenschaftler aus dem DLR-Institut, die als Drohnenpiloten Hilfeinsätze begleiten können. „Sie bringen nicht nur die technische Expertise aus ihren jeweiligen Fachgebieten wie Maschinenbau, Vermessung, Geoinformation oder Informatik mit, sondern engagieren sich auch im besonderen Maße für humanitäre Zwecke“, berichtet Ralf Berger. Alle Teamkollegen sind ausgebildete und zertifizierte UAV-Piloten und seit einigen Jahren ehrenamtliche I.S.A.R.-Mitglieder.

## I.S.A.R. Germany

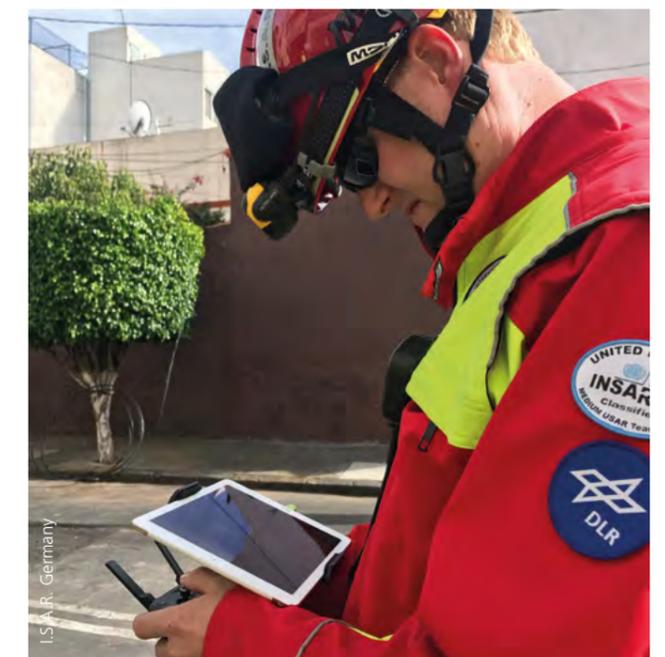
Die gemeinnützige Hilfsorganisation wurde 2003 in Duisburg gegründet. Sie führt weltweit Rettungseinsätze durch. Hierbei haben sich Spezialistinnen und Spezialisten verschiedener Hilfsorganisationen und aus dem Bundesverband Rettungshunde e.V. zusammengeschlossen. Rund 170 Helferinnen und Helfer sind für I.S.A.R. tätig. Die meisten von ihnen arbeiten ehrenamtlich. Lediglich ein kleiner Stab kümmert sich um Organisation, Mitgliederbetreuung und Spenden. Seit 2007 arbeitet I.S.A.R. Germany unter dem Dach der Vereinten Nationen.

Ein nicht zu unterschätzender Wert ist die Erfahrung. „Dank vieler vorangegangener Messkampagnen mit unseren MACS-Kamerasystemen, auch in entlegenen Gebieten der Welt wie Nepal, Grönland oder Alaska, wissen wir, worauf es bei solchen Unternehmungen ankommt. Gerade wenn sich Situationen unplanmäßig ändern, heißt es Ruhe bewahren und improvisieren.“ Denn jeder Hilfeinsatz ist anders, aber bei allen geht es darum, schnellstmöglich vor Ort zu sein und dort ohne externe Infrastruktur wie Strom, Wasser, Nahrung oder Unterkunft zurechtzukommen. Schon die Anreise kann durch zerstörte Straßen erschwert sein. Der DLR-Pilot ist dafür verantwortlich, das Missionsequipment sicher und unbeschadet ins Einsatzgebiet hinein- und wieder herauszubringen. Vor Ort muss er unter den Katastrophenbedingungen autark arbeiten und dabei effizient mit eigenen und örtlichen Ressourcen umgehen. Auch die Kommunikation mit den Teams anderer Organisationen und die Koordination der gemeinsamen Arbeit gehören zu seinen Aufgabenbereichen. Sprachliche und bürokratische Barrieren können ebenfalls herausfordernd sein.

## Geschult und begleitet

Einsatz Erfahrung, technisches Know-how sowie persönliches Engagement sind die Voraussetzungen für jede helfende Hand – und immens wichtig für die Arbeit nichtstaatlicher Hilfsorganisationen. Darüber hinaus gilt es, für Extremsituationen gewappnet zu sein, denn für die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ist dies nicht Teil ihrer täglichen Arbeit. Deshalb sind regelmäßige Weiterbildungen und Medizinchecks das A und O. Zudem trainiert das Team immer wieder verschiedene Szenarien. Aber auch im Katastrophenfall unterstützen sich die I.S.A.R.-Mitglieder gegenseitig, um das Erlebte verarbeiten zu können. Erfahrene Kolleginnen und Kollegen aus Feuerwehr, Polizei, Militär und Rettungsdiensten sowie aus den Bereichen Medizin, Psychologie und Geburtshilfe sind daher stets Teil des Einsatzteams.

Melanie-Konstanze Wiese ist Standortkommunikatorin für die Standorte Berlin, Neustrelitz, Jena, Dresden, Cottbus und Zittau.



Vor Ort steuert der Pilot die Drohne mithilfe eines Tablets. Dabei werden die Bilddaten der MACS-Kamera in Echtzeit verarbeitet und sofort visualisiert.



# STADT, MENSCH, ZUKUNFT

Die Modellprojekte Smart Cities entwickeln und erproben deutschlandweit Strategien für das Stadtleben von morgen

von Dorothee Fricke

**Wie können Städte und Kommunen mithilfe von Digitalisierung nachhaltiger und lebenswerter werden? Dieser Frage stellen sich die „Modellprojekte Smart Cities“, 73 Städte, Gemeinden und kommunale Verbände. Die Projekte werden vom Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat gefördert. Seit September 2021 berät und begleitet sie eine Koordinierungs- und Transferstelle (KTS) unter Federführung des DLR Projektträgers. Matthias Woiwode von Gilardi leitet die KTS. Der diplomierte Stadtplaner ist seit vielen Jahren im Bereich Europäische und internationale Zusammenarbeit beim DLR Projektträger tätig. Prof. Dr. Michael Ortgiese vom DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik in Berlin, das auch an der KTS beteiligt ist, befasst sich in seiner Forschung mit der Einbindung neuer digitaler Lösungen in das Verkehrs- und Mobilitätsmanagement. Im Interview sprechen die beiden darüber, was eine Smart City ausmacht und worauf es jetzt ankommt.**

## Was macht für Sie eine Smart City aus?



Prof. Dr. Michael Ortgiese

**Ortgiese:** Ich wünsche mir als Bürger vor allem eine smarte Kommunikation mit der Verwaltung. Smart ist aber nicht immer gleichbedeutend mit digital. Smart Cities nutzen die Potenziale, die Digitalisierung und der Austausch von Daten bieten, um Prozesse neu zu denken.

**Woiwode von Gilardi:** Für mich gibt es nicht „die“ Smart City. Jede Stadt oder Region hat ihre Eigenarten, so sind auch die Smart-City-Konzepte unterschiedlich und individuell. Dabei geht es nicht nur um technologische, sondern auch um soziale Innovationen. Als Bürger einer Smart City kann ich niederschwellig äußern, in welchem Bereich ich mir Verbesserungen wünsche. Ich bin eingebunden in Planungsprozesse für Stadtquartiere oder in Entscheidungen über Investitionen in die öffentliche Infrastruktur.

## Was sind die größten Herausforderungen für Städte und Kommunen auf dem Weg zur Smart City?

**Woiwode von Gilardi:** Zunächst benötigen sie Leitbilder und Zielvorstellungen, die zusammen mit den Bürgerinnen und Bürgern sowie allen Akteuren einer Kommune entwickelt werden müssen. Für deren Verwirklichung brauchen wir bessere Prozesse, um öffentliche Verwaltung, Bauen und Wohnen, Energie und Verkehr ganzheitlich zu organisieren. Auf dieser Grundlage sollten wir dann digitale Technologien einsetzen, die den städtischen Betriebssystemen zu einem „Upgrade“ verhelfen.



Matthias Woiwode von Gilardi

**Ortgiese:** Die Herausforderung ist nicht, etwas zu digitalisieren, sondern dass wir uns grundlegend Gedanken machen, wie wir zukünftig zusammenarbeiten möchten. Wenn die Einbindung einer Smart-City-Strategie in eine stadtplanerische Gesamtstrategie fehlt, nutzt das beste Förderprojekt nichts, denn seine Wirkung wird schnell verpuffen. Ich stelle fest, dass es vor Ort IT-Fachleute gibt. Ihnen fehlt jedoch oft das wichtige Methodenwissen aus Stadt- und Verkehrsplanung, das bringen andere mit. Gleiches gilt für die umgekehrte Richtung. Es gibt kaum jemanden, der umfassende Erfahrungen hat. Daher braucht es ein integratives, neues Planungsverständnis.

## Was ist dabei die Rolle der KTS?

**Woiwode von Gilardi:** Wir entlasten die Modellprojekte vor Ort, wir befähigen und stärken sie. Wir wollen ihnen Werkzeuge an die Hand geben. Dabei setzen wir auf Wissenstransfer, Forschung und Evaluation – aber vor allem auch auf die sehr enge und individuelle Begleitung der Projekte. Unsere Vision ist es, gemeinsam ein lernendes und offenes Innovationssystem zu entwickeln – etwa, indem wir digitale und analoge Räume für die Zusammenarbeit bereitstellen, in denen Kommunen in Deutschland beispielsweise gemeinsam urbane Datenplattformen und Open-Source-Lösungen entwickeln. Besonders wichtig: Die Wirkung soll und wird über die geförderten Kommunen hinaus ausstrahlen – national und international.

**Ortgiese:** Oft sind sektoral schon gute Lösungen vorhanden, aber sie sind nicht miteinander verknüpft. Ein Beispiel sind die unterschiedlichen Verkehrssysteme in einer Stadt, die nicht miteinander kompatibel sind. Wir wollen die Kommunen ermutigen, hier neu und experimentell zu denken. So kann die Stadt mit ihrem Umland zusammenwachsen.

## AUSGEWÄHLTE MODELLPROJEKTE



### BEISPIEL ULM: MEHR LEBENSQUALITÄT DURCH DIGITALISIERUNG

*Die Münsterstadt Ulm hat sich zum Ziel gesetzt, mithilfe intelligenter Vernetzung digitaler Technologien den Alltag der Menschen in der Stadt zu erleichtern und die Lebensqualität zu steigern – beispielsweise im Bereich Sicherheit. Wie können einzelne Angsträume, zum Beispiel schlecht beleuchtete Unterführungen, sicherer gemacht werden? Diese Räume werden in 3D-Modellen dargestellt, in denen alternative Maßnahmen wie smarte Beleuchtung mitgedacht sind. Anhand der Modelle wird auch mit Bürgerinnen und Bürgern diskutiert, welche Alternativen umgesetzt werden können.*



### BEISPIEL COTTBUS: SELF-CHECK-IN IM KRANKENHAUS

*Die Daseinsvorsorge Gesundheit ist eines von sieben Handlungsfeldern der „Digitalen Stadt Cottbus“. Bürgerinnen und Bürger sollen sowohl beim Thema Vernetzung im Gesundheitswesen als auch beim medizinischen Fortschritt durch die Digitalisierung profitieren. Klinische Daten und Dokumente werden gebündelt, so gewinnen sowohl Patientinnen und Patienten als auch das Fachpersonal an Überblick, Orientierung, Transparenz und Komfort. Ein konkretes Beispiel ist der „Self-Check-In“, der im August 2020 im Cottbuser Carl-Thiem-Klinikum startete. Patientinnen und Patienten können sich per Tablet eigenständig im Klinikum aufnehmen. Das spart Wartezeiten, das Klinikum gewinnt Personalkapazitäten und Abläufe werden optimiert.*

An der KTS sind neben dem DLR Projektträger und dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik weitere Partner aus Forschung, Weiterbildung und Beratung beteiligt. Was macht dieses Konsortium aus?

**Ortgiese:** Die KTS steht für die Breite der Smart Cities. Eine Einzelinstitution könnte die Smart Cities niemals als Ganzes abbilden.

**Woiwode von Gilardi:** Das Konsortium vereint unterschiedliche Denkschulen, Kompetenzen und Erfahrungshintergründe, so arbeitet es interdisziplinär. Es sind große und kleine Einrichtungen dabei, solche, die forschen, und solche, die vor Ort unterwegs sind und neue Methoden zum Beispiel der Bürgerbeteiligung beisteuern. Für uns als DLR Projektträger ist es wahnsinnig spannend, ein solches Vorhaben zu koordinieren und unsere Kompetenzen und Erfahrungen wie das Management von Geschäftsstellen, die Politik- und Wissenschaftskommunikation sowie die Begleitung von Projekten und Programmen einzubringen.

**Dorothee Fricke** arbeitet beim DLR Projektträger und ist für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit der KTS zuständig.



## BEISPIEL BERLIN: INTELLIGENT VERNETZT IM KRISENFALL

Unter dem Motto „Berlin lebenswert smart“ erarbeitet Berlin eine neue Strategie. Darin sollen Digitalisierung und Technologie gesellschaftlichen Nutzen erzeugen und das demokratische Gemeinwesen stärken. Fünf konkrete Pilotprojekte beginnen ab 2022. So soll an ausgewählten Orten in der Stadt die „Kiezbox 2.0“ installiert werden. In Krisensituationen, etwa bei einem Stromausfall, wird mithilfe der Kiezboxen über solar- beziehungsweise batteriebetriebene Hotspots ein Notfall-WLAN gebildet, das die Bevölkerung lokal informiert. Auch wenn kein Notfall ist, sind die Kiezboxen im Einsatz und sammeln Daten beispielsweise zum Klima oder zur Luftqualität.



## BEISPIEL HAMBURG: DIGITALE ZWILLINGE

Im Projekt „Connected Urban Twins“ entwickeln Hamburg, Leipzig und München gemeinsam sogenannte Digitale Zwillinge. Digitale Zwillinge sind mehr als 3D-Stadtmodelle: Ihre urbanen Datenplattformen werden laufend mit Fachinformationen zu Gebäuden, Straßen und Gewässern oder mit Echtzeitdaten zum Beispiel zum Klima gefüttert. So werden Simulationen und Analysen möglich, die neue Perspektiven für die integrierte Stadtplanung und Partizipation bieten. Unter der Federführung Hamburgs verbessert das Team bestehende Technologien und setzt auf gemeinsame Standards sowie Open-Source-Lösungen, die andere Städte anwenden können.

## STARKE PARTNER FÜR ZUKUNFTSTHEMEN

Der DLR Projektträger (DLR-PT) unterstützt als zentrale Säule des DLR-Geschäftsfelds Wissenschafts-, Innovations- und Bildungsmanagement seit mehr als 40 Jahren Akteure aus Politik, Wissenschaft und Wirtschaft sowie Bildungsträger mit vielfältigen Dienstleistungen. Er arbeitet über Smart Cities hinaus künftig verstärkt zu weiteren Zukunftsthemen mit den DLR-Instituten zusammen. „Es geht darum, Kompetenzen aus Management und Beratung sowie Forschung zu bündeln“, sagt Roman Noetzel, der im DLR-PT die Abteilung Grundsatzfragen im Bereich Europäische und Internationale Zusammenarbeit leitet: „So entsteht eine Win-Win-Situation für das ganze DLR, seine Kunden und die Gesellschaft.“ Austauschformate wie der geplante „Smart City Club“ oder Themenzirkel zu Zukunftstechnologien wie Wasserstoff oder Quantentechnologien sollen dazu beitragen, die gemeinsamen Potenziale zu heben.

Weitere Informationen zu den Modellprojekten und der KTS finden sich unter

[smart-city-dialog.de](http://smart-city-dialog.de)

# NACHGEFRAGT

Hier beantworten unsere Forscherinnen und Forscher Fragen aus der Community

**Wer Fragen stellt, versteht, warum etwas geschieht und warum Dinge in einer bestimmten Weise funktionieren. Besonders in der Wissenschaft ist eine solch neugierige Herangehensweise unverzichtbar, denn nur so lassen sich komplexe Themen durchdringen und können verstanden werden. Regelmäßig erreichen uns Fragen zu den verschiedensten wissenschaftlichen Themen über unsere Social-Media-Kanäle, per Brief oder E-Mail. Wenn auch Ihnen eine Frage unter den Nägeln brennt, schreiben Sie uns unter [magazin@dlr.de](mailto:magazin@dlr.de).**

**Frage von Berta via Facebook:**

Ich möchte gerne wissen, warum Schwerelosigkeitsexperimente für die Medizin und Materialforschung so wichtig sind. Könnt ihr mir das an konkreten Beispielen erklären?



Physikalische, chemische und biologische Prozesse laufen auf der Erde unter dem Einfluss der Schwerkraft ab. Für viele Vorgänge ist dies ein störender Faktor. Beispielsweise behindert sie die Herstellung hochreiner Kristalle, Werkstoffe und biologischer Gewebe. Für Lebewesen ist die Schwerkraft allerdings ein wichtiger Umweltfaktor, an dem sie sich orientieren und den sie zur Optimierung ihrer Lebensbedingungen nutzen. In der Schwerelosigkeit können wir diesen Umweltfaktor ausschalten, Schwerkrafteinflüsse studieren und die fehlende Schwerkraft oft sogar gezielt nutzbar machen. So werden auf der Internationalen Raumstation ISS verschiedene Legierungen aufgeschmolzen und wieder erstarrt, um präzise Daten für Modellierungen zu erhalten. Dadurch können Gießprozesse verbessert werden, beispielsweise für eine extrem leichte Titanaluminid-Turbinenschaufel eines Flugzeugtriebwerks, oder auch neue Materialien entwickelt werden. Gravitationsbiologinnen und -biologen haben wichtige Erkenntnisse über die Schwerkraftwahrnehmung und das schwerkraftorientierte Wachstum von Pflanzen und Tieren gewonnen. Ganz wesentlich profitieren wir auf der Erde von Untersuchungen an Astronautinnen und Astronauten: Antworten auf die Fragen, wie sich der Körper an die Schwerelosigkeit anpasst und welche Gegenmaßnahmen wir entwickeln können, um in Schwerelosigkeit leistungsfähig und gesund zu bleiben, fließen in medizinische Anwendungen auf der Erde zur Diagnostik, Prävention und Behandlung ein. Das große Ziel ist es, die gesunde Lebensspanne einer alternden Gesellschaft immer weiter zu verbessern.

**Prof. Dr. Jens Jordan, Leiter des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin, und PD Dr. Markus Braun, Leiter des Biowissenschaftlichen Raumfahrtprogramms in der Deutschen Raumfahrtagentur im DLR**

**Frage von Ava B.:**

Was ist eine Sternschnuppe?



Jeden Tag treffen mehrere Milliarden „Brocken“ aus Eisen oder Gestein aus dem Weltall auf die Atmosphäre unserer Erde. Zusammen genommen wiegen sie etwa so viel wie ein großer und voll beladener Lkw, aber zum Glück sind die meisten Teile nur so groß wie ein Staubkorn. Dennoch können sie aufgrund ihrer sehr hohen Geschwindigkeit auf ihrem Weg durch die Atmosphäre die Luft durch Reibung ionisieren und zum Leuchten bringen. Nachts, wenn es dunkel und der Himmel klar ist, sieht man diese Leuchtspuren als Sternschnuppen.

**Dr. Christoph Pawek, Leiter DLR\_School\_Lab Berlin**

*\*In der Ausgabe Nummer 168 ist uns bei der Frage „Endet der Weltraum irgendwann?“ ein Fehler unterlaufen: Dort steht, dass Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie besagt, dass es zu einer Dehnung der Zeit kommt und dass sich dies als Verschiebung der Wellenlänge des sichtbaren Lichts bemerkbar macht. Lösungen der Feldgleichungen dieser Theorie resultieren aber in einer (beschleunigten) Expansion des Raums, also einer „Dehnung“ allein der Raumkoordinaten und nicht etwa der Zeit oder pauschal der „Raumzeit“. Eine Folge dieser Raumdehnung ist dann auch die beobachtete Rotverschiebung des Lichts weit entfernter kosmischer Objekte. Danke an Günter Volkant.*



Es ist geschafft: Frank Weist (vorne rechts) und die beiden anderen Probanden sind in der TITAN-Kammer auf 615 Metern angekommen. Das Foto wurde durch eines der kleinen Fenster von außen aufgenommen.

## TIEFTAUCHEN OHNE WASSER

Ein außergewöhnlicher Versuch in der TITAN-Druckkammer

von Katja Lenz

**615 Meter.** Die drei jungen Taucher, die diese Tiefe erreicht haben, halten am 1. Mai 1990 für den Fotografen ein Schild hoch. Jetzt dauert es noch vier Wochen, bis sie wieder Sonnenlicht sehen und frische Luft atmen. Dieser Rekord-Tauchgang wurde vor mehr als 30 Jahren in der DLR-Druckkammer TITAN durchgeführt. Wasser war dafür nicht notwendig, nur die Technik und die Stahlwände des baromedizinischen Labors.

In ihm können extreme Druck- und Atemgasbedingungen erzeugt werden, wie sie zum Beispiel in mehr als 600 Meter Tiefe in der Nordsee herrschen. Der Einsatz von Berufstauchern für die Erdgas- und Ölförderung im offenen Meer war ein wichtiges Thema für die Forschung. Könnten Menschen am Meeresboden arbeiten? Wie kommen sie mit den Druckverhältnissen zurecht? Die TITAN-Kammer sowie die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im damaligen DLR-Institut für Flugmedizin boten eine sichere, kontrollierte Umgebung für die Beantwortung dieser Fragen.

„Wir hatten rund um die Uhr alles im Blick. Es war jedem klar, welche Verantwortung wir tragen“, sagt Manfred Schulze (57), einer der Techniker. 40 Tage und Nächte saßen die „Kammerfahrer“ am meterlangen Fahr- und Messstand. Im heutigen DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin gibt es die großen Regler, Knöpfe und Bildschirme immer noch. Über eigene Sprechverbindungen konnte das Team die Tests oder Ergebnisse mit den drei Tauchern bereden und manchmal auch über Alltägliches plaudern.

Mit zunehmender Tiefe wurde das allerdings schwieriger. Die Atemluft bestand aus Heliox, einem Gemisch aus Sauerstoff und Helium. Das DLR-Team passte das Mischungsverhältnis laufend an die sich ändernden Druckverhältnisse an. Helium dient beim Tauchen als Ersatz für Stickstoff, der den gefährlichen Tiefenrausch auslöst. Aber Helium verändert auch die Stimme bis zu einem unverständlichen Fiepsen. „Ab einem Druck von etwa zehn Bar in 100 Meter Tiefe ist diese Verzerrung so stark, dass Taucher untereinander nicht mehr mit Worten kommunizieren können“, sagt Frank Weist (60). Er war der junge Taucher, der am zwölften Tag in der Kammer das Schild hielt. Der Austausch mit dem DLR-Team lief über einen elektronischen Entzerrer. Ein Blick in die Kammer oder heraus war zusätzlich durch die kleinen runden Fenster möglich. Also einfach einen Zettel mit Informationen hochhalten? „Jenseits von 500 Metern zitterten die Hände doch etwas“, erinnert sich Frank Weist an den Tauchgang. Papier und Stift zu holen, bedeutete eine enorme Anstrengung. Bei mehr als 600 Metern wollte Frank Weist vor allem „sitzen und atmen und nichts anderes machen.“

### „Anpassungsfähigkeit des Menschen ist beträchtlich“

Steigen Taucherinnen und Taucher zu schnell auf, bilden sich wegen des geringer werdenden Drucks Blasen in ihren Blutgefäßen und Geweben. Deswegen ist eine angepasste Dekompressionsgeschwindigkeit lebenswichtig. Für diesen TITAN-Tauchgang in 615 Meter Tiefe berechnete das DLR-Team 28 Tage. Die drei Probanden hatten jede Menge Aufgaben zu erledigen. Konzentrationstests, Leistungstests, Übungen zu Geschicklichkeit und Gleichgewicht standen auf dem Programm. Auch Putzen. Hygiene war extrem wichtig in dieser Umgebung mit Wärme, Druck und hoher Luftfeuchtigkeit. Jede Infektion oder Verletzung wäre eine Katastrophe gewesen. „Wir hätten die drei ja nicht einfach rausholen können“, sagt Tauchmeister Harry Hebborn (83), der zum DLR-Team gehörte. „Einen Arzt reinzubringen, hätte ebenfalls Tage gedauert.“

Die TITAN-Druckkammer hat einen Durchmesser von 2,20 Metern und eine Gesamtlänge von 6,60 Metern, inklusive Waschbecken, Dusche und WC. Von außen wirkt sie wie ein Raumschiff, das von Messgeräten, Rohren und Kabeln umgeben ist. Im Innern ist Platz für vier Personen. Harry Hebborn und Projektleiter Norbert Luks (69) wählten die Probanden mit aus. Wichtigste Voraussetzungen neben der Taucherfahrung: Sie mussten der psychischen Belastung standhalten können und gut miteinander auskommen. Die gemeinsamen Mahlzeiten wurden über eine Schleuse in die Kammer gereicht. Unter hohem Druck bildeten sich in Sekunden große Fettaggen auf Wurst oder Käse. Fleisch wurde hart und luftiger Nachtisch kam als Brei an. „Gleichzeitig ließ bei den Probanden der Geschmackssinn nach“, erklärt Norbert Luks.



Der Fahr- und Messstand neben der Druckkammer. Auf den Anzügen der Mitarbeiter ist noch der alte Name des DLR zu sehen: DFVLR steht für Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt.

Der Tauchgang brachte viele wissenschaftliche Erkenntnisse. „Es wurde nachgewiesen, dass die Anpassungsfähigkeit des Menschen an die extremen Umweltbedingungen beträchtlich ist“, hieß es in einer DLR-Mitteilung. Für Bohrinseln ist das eher kein Thema mehr: „Inzwischen arbeiten Roboter in diesen Tiefen. Die Möglichkeit gab es damals noch nicht so wie heute“, sagt Norbert Luks. Die TITAN-Druckkammer wurde seit 1991 mit dem Ende einer Forschungsförderung allerdings nicht mehr für Tieftauchgänge eingesetzt. Seitdem konzentrieren sich die Arbeiten auf die Auswirkungen von Druck- und Atmosphärenveränderungen zum Beispiel in der Luft- und Raumfahrt, beim Bergsteigen oder auf Zugfahrten.

Katja Lenz ist Presseredakteurin im DLR.



Von links: Tauchmeister Harry Hebborn, Projektleiter Norbert Luks und Kammerfahrer Manfred Schulze

### DIE BAROKAMMER

Die Tieftauchsimulationsanlage TITAN wurde 1984 in Betrieb genommen. Sie steht als Teil des Baromedizinischen Labors im heutigen DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin in Köln. Theoretisch waren mit der Kammer Tauchversuche bis in 1.000 Meter Tiefe möglich. Mittlerweile können in ihr Druckbereiche zwischen 5 Millibar und 70 Bar erzeugt werden. Das entspricht dem Bereich zwischen einem leichten Vakuum und 700 Metern Meerestiefe.

# RAUMFAHRT TRIFFT SPIRITUALITÄT

Ein Besuch der Tom-Sachs-Ausstellung  
in den Deichtorhallen

von Jana Hoidis

Die Deichtorhallen in Hamburg sind bekannt für Ausstellungen zeitgenössischer Kunst von internationaler Reputation. Derzeit beherbergen sie allerdings ein ganz anderes Abenteuer: Tom Sachs präsentiert mit seinem „Space Program: Rare Earths (Seltene Erden)“ die Möglichkeiten, wie Menschen ferne Himmelskörper erkunden können. In der Halle für aktuelle Kunst können Besucherinnen und Besucher auf einer fiktiven Mission zum Asteroiden Vesta reisen. Künstlerisch sind in der Ausstellung Geschichte, Visionen und Spiritualität verwoben.



Noch vor der Kasse empfängt der Künstler die Besucherinnen und Besucher in Lebensgröße auf einem LED-Display. Dahinter warten direkt die ersten Exponate: Ein Forschungsmobil der NASA sowie mehrere Astronautenanzüge machen direkt Lust auf eine Reise ins Weltall. Von hier aus geht der Weg weiter in die 300 Quadratmeter große Ausstellungshalle. Sofort sticht das größte Exponat, das Landemodul, ins Auge. Die Ähnlichkeiten zur Mondlandefähre LEM (Lunar Excursion Module, später LM, Lunar Module), die bei den Apollomissionen zum Einsatz kam, sind kaum zu übersehen. Im Ausstellungsführer ist zu lesen, dass es dieser sogar im Größenverhältnis 1:1 nachempfunden ist. Gebaut ist nahezu alles aus Sperrholz, Klebeband und Heißkleber. Dieses Mal ist das Modul allerdings nicht auf dem Mond, sondern auf dem Asteroiden Vesta gelandet. Aber dazu später mehr.

## Per Indoktrination Mitglied der Mission

Um tief in die Ausstellung einzutauchen, können sich die Besucherinnen und Besucher zu Beginn der „Indoktrination“ unterziehen. Dies geschieht in einem Extrabereich direkt am Eingang in die große Halle, kostet allerdings fünf Euro extra. Nach kurzem Anstehen geht es direkt los. Im Wartebereich ist Zeit, um einen Fragebogen zur eigenen Person und zu Details der Ausstellung auszufüllen. Im nächsten Schritt müssen Schrauben sortiert werden, dies erinnert an das Märchen Aschenputtel: „Die Guten ins Töpfchen, die Schlechten ins Kröpfchen“. Vielleicht soll diese monotone Tätigkeit kathartisch reinigen, damit die Teilnehmerinnen und Teilnehmer aufnahmefähig sind für das, was sie noch erwartet. Nach einem kurzen Gespräch über den eigenen Smartphone- und Social-Media-Konsum, erhalten alle ihren „Dienstausweis“ und sind „indoktriniert“. Im Verlauf der Ausstellung stellt sich heraus, dass sich manche Exponate nur mit diesem Ausweis aktivieren lassen.

## Warum Asteroid Vesta?

Mit seiner aktuellen Ausstellung möchte Tom Sachs den exzessiven Konsum von Handys und den damit verbundenen Rohstoffverbrauch ins Bewusstsein rücken. Auf Vesta sind die Rohstoffvorkommen noch völlig unangetastet. Seltene Erden, Gold, Kupfer, all das vermuten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in großen Mengen im Innern des Asteroiden. In der großen Halle sind neben dem Landemodul Bohrungen auf Vesta nachgezeichnet. Hier wurde augenscheinlich nach Rohstoffen und seltenen Erden gesucht.

Zusätzlich zu der großen Ausstellungsfläche haben die Besucherinnen und Besucher die Möglichkeit, sich in kleinen Räumen Exponate zu verschiedenen Themen anzuschauen. Das Museum of the Moon ist bizarren Skulpturen über die Mondlandung gewidmet. Im sogenannten Re-Education Center läuft im Kinoformat ein Film über die Arbeitsweise von Tom Sachs. Hier erklärt er auf unterhaltsame Weise, wie sein Hauptmaterial, Sperrholz, verarbeitet wird. Außerdem taucht auch hier wieder seine Passion für Schrauben auf.

## Heilige Dreifaltigkeit

Auf dem Weg durch die Ausstellung finden sich immer wieder Hinweise zu religiösen Ritualen. In der Haupthalle steht beispielsweise ein Exponat zur japanischen Teezeremonie. Inmitten der großen Halle ist das VAB aufgebaut. Die Abkürzung steht eigentlich für Vehicle Assembly Building (auf Deutsch: Raumfahrzeugmontagegebäude) und beherbergt in der Realität einen der größten umschlossenen Räume der Welt. In ihm wurden die bei der Mondlandung eingesetzten Saturn-Raketen senkrecht zusammengebaut. Das VAB in den Deichtorhallen ist allerdings das exakte Gegenteil: ein winziger Raum. Der Dienstausweis verschafft Zutritt zu diesem mysteriösen Zimmer. Darin wartet nichts als Dunkelheit und ein schwebender Mini-Yoda (bekannt aus den Star-Wars-Filmen), vor dem man sich auf eine Gebetsbank knien kann. Yoda sowie Elemente der Teezeremonie kommen als Details an vielen Exponaten vor. Sind sie Zeichen von Religion? Sollen sie auf eine Dreieinigkeits von Vergangenheit, Zukunft und Spiritualität hinweisen?

## DEICHTORHALLEN HALLE FÜR AKTUELLE KUNST HAMBURG-CITY

Deichtorstraße 1–2, Hamburg-City

Ausstellung SPACE PROGRAM: RARE EARTHS  
noch bis 10. April 2022

[deichtorhallen.de/ausstellung/tom-sachs](https://deichtorhallen.de/ausstellung/tom-sachs)

Preis:  
12 Euro, ermäßigt 7 Euro, Kinder und Jugendliche  
unter 18 Jahren frei

Öffnungszeiten:  
Dienstag bis Sonntag 11–18 Uhr



Am Ende des Rundgangs wartet auf die Indoktrinierten die sogenannte Transsubstantiation („Wesensverwandlung“). Grundsätzlich ist der Besuch dieses Bereichs auch für nicht Indoktrinierte möglich, aber nicht zu empfehlen. Der Dienstausweis aktiviert die Tür zur Transsubstantiation. Wie beim Eingang in einen wissenschaftlichen Reinraum, wird man hier von einem Luftstrom bestrahlt, um keine Schmutzpartikel hineinzutragen. Oder handelt es sich gar um eine spirituelle Reinigung? Am Ende kann sich jeder und jede in eine Computertomografie-Röhre legen, um den eigenen Platz im Universum zu finden.

Jana Hoidis ist am Standort Hamburg für die Öffentlichkeitsarbeit zuständig. Sie ist seit jeher Science-Fiction-Fan und gespannt, was in der Zukunft noch real wird.

## KÖRPER UND GEIST

Die renommierte Fotografin und Dokumentarfilmerin Herlinde Koelbl porträtiert in ihrem bemerkenswerten großformatigen Bildband **Faszination Wissenschaft (Knesebeck)** 60 der weltweit bedeutendsten Forschenden, Nobelpreisträgerinnen und Nobelpreisträger. Für die Interviews und beeindruckenden Bilder machte die deutsche Künstlerin in ihren Begegnungen nur eine einzige Vorgabe: den Kerngedanken der Forschungsarbeiten via Formel, Philosophie oder Zitat auf die Handinnenfläche zu skizzieren. So verbindet sie in ihrem Werk **Körper und Geist** der wegweisenden Forschenden unserer Zeit. Den Lesenden gibt diese Vorgehensweise erste Anhaltspunkte darauf, wie die Porträtierten selbst ihre wissenschaftliche Arbeit empfinden. Es ist schnell zu spüren, dass Koelbl den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus unterschiedlichsten Disziplinen wie Neurobiologie, Meerforschung oder Quantenphysik ungewöhnlich nahe gekommen ist. Dabei hinterlassen die gut gestalteten Zitate und Lebensweisheiten sowie die exzellenten Schwarz-Weiß-Fotografien beim Lesen und Betrachten einen nachhaltigen Eindruck und wirken gleichzeitig imponierend und berührend.

Mit gegebener Zurückhaltung und Kunstfertigkeit gelang es Herlinde Koelbl, den Forscherinnen und Forschern Themen und Inhalte ihrer Arbeit zu entlocken und diese dabei stets einfach, kurz und präzise zu formulieren. So fällt es nicht schwer, die komplexen Wirkungskreise der Protagonistinnen und Protagonisten zu durchdringen. In ungewöhnlicher Offenheit und sehr persönlich berichten die klugen Köpfe von kulturellen Einflüssen, politischen Entwicklungen oder Moden, an die sie in ihrem wissenschaftlichen Schaffen gebunden sind. Herlinde Koelbl weiß dies in dem beeindruckenden Werk harmonisch zu vereinen. Nicht nur optisch und haptisch, sondern auch im zeitgeistlichen Sinn. Dabei kamen ihr ihre Erfahrungen aus vergangenen Arbeiten, wie beispielsweise die Serie „Spuren der Macht“, für die sie etwa Angela Merkel sowie andere Politikerinnen und Politiker über Jahre hinweg porträtierte und für die sie große Bekanntheit erlangte, sichtlich zugute.

Die Fotografien von Herlinde Koelbl sind übrigens auch Teil einer Ausstellung, die 2022 in Halle, Münster und Heilbronn zu sehen ist. Weitere Informationen zu genauen Daten und Orten finden Sie unter [herlindekoelbl.de](http://herlindekoelbl.de).

Andrea Haag



## DIE GROßE BESCHLEUNIGUNG

Exponentielles Wachstum? Davon haben wir seit Corona alle schon einmal gehört. Aber können wir diese Beschleunigung tatsächlich verstehen? Wie oft muss man ein DIN-A4-Blatt falten, damit der Stapel von der Erde bis zur Sonne reicht? Nach 42 Faltungen reicht er bis zum Mond, nach etwa 50 erreicht er die Sonne.

Klimaerwärmung und die wachsende Weltbevölkerung sind bekannte Phänomene der „Großen Beschleunigung“. Christian Stöcker, Psychologe und Professor für digitale Kommunikation, deckt in seinem Buch **Das Experiment sind wir (Blessing Verlag)** eine überraschend große Anzahl weiterer Faktoren auf, deren Einfluss im Alltag oft kaum erkennbar ist. Dabei verändern sie unser Leben, unsere Gesellschaft und den Planeten in atemberaubendem Tempo. Einen Schwerpunkt bilden Themen der Digitalisierung, insbesondere künstliche Intelligenz, Biotechnologie und soziale Medien. Die große Stärke des Buchs liegt jedoch darin, aufzuzeigen, wie die in uns allen wirkenden psychologischen Mechanismen die Wahrnehmung dieser Beschleunigung dämpfen und verändern.

Das Buch überzeugt durch erstklassige Recherche und eine panikfreie Analyse unserer anthropozänen Welt. Zudem zeigt der Autor einleuchtende Lösungen, wie die mächtigen Technologien unserer Zeit eingesetzt werden können, damit der Weg eben nicht immer schneller in den „Abgrund“ führt. Eine klare Kaufempfehlung für alle, die sich von einem sachlichen Schreibstil nicht abschrecken lassen. Der eigene Blick auf die Welt von heute und morgen wird ein anderer sein.

Thorsten Haag



## EIN RAKETENJAHRHUNDERTLEBEN



Es war auch sein großer Tag, der 16. Juli 1969. Hermann Oberth stand als Ehrengast der NASA auf der Tribüne in Cape Canaveral. Gleich würde die von seinem 18 Jahre jüngeren und ebenso genialen Schüler Wernher von Braun konstruierte Saturn-V-Rakete mit der Mission Apollo 11 starten und zum Mond fliegen. Ein Foto zeigt einen heiteren, stolzen Oberth, der wusste, dass er viel zu diesem Tag beigetragen hatte. „Three-two-one-zero: all engines running!“ Die fast 3.000 Tonnen schwere Saturn V erhob sich in den stahlblauen Himmel. Vier Tage später standen Menschen erstmals auf einem anderen Himmelskörper.

Sachbücher wurden hierzu Hunderte geschrieben. Jetzt auch ein Roman, ein guter! Fiktion in diesem trockenen Genre, der Entwicklung der Rakete? Das geht, wie Daniel Mellem in seinem Debütroman **Die Erfindung des Countdowns (dtv)** mit subtilem Humor und präziser Nüchternheit beweist – der Autor ist schließlich Physiker. Ein ausgesprochen angenehm zu lesendes kleines Werk, jedes der von zehn an rückwärts gezählten Kapitel schildert eine Etappe im so bewegten Leben Oberths. Er war ein Genie. Eine Jahrhundertfigur. Aber Oberth, der von 1894 bis 1989 lebte, vereinte auch all die Widersprüche seiner Zeit in sich. Als Junge inspirierte ihn Jules Vernes „Von der Erde zum Mond“. Doch rechnete er damals gleich aus, dass der Schuss mit einer Kanonenkugel wegen der viel zu hohen Beschleunigung aus den Menschen darin Brei machen würde – Mathe hilft! Seine Dissertation war ihrer Zeit so weit voraus, dass die Professoren in Göttingen und Heidelberg sie nicht bearbeiten wollten. Der Bau einer Mondrakete war sein Lebenstraum. Wie viele große Wissenschaftler, war er der Typ Patriarch, der

seine Frau, Tilla, und die vier Kinder vernachlässigte; seine älteste Tochter starb an ihrem letzten Arbeitstag mit 27 anderen, beim Bau einer Rakete. Raketen, das hieß von 1933 bis 1945 eben vor allem Kriegsgerät. So war auch Oberth von 1941 bis 1943 in Peenemünde an der Entwicklung der berühmten V2 dabei. Von seinem ältesten Sohn wurde er als Handlanger der Nazis beschimpft, doch den Machthabern war vor allem wichtig, dass er in seiner Gutmütigkeit und Naivität sein Wissen nicht mit dem Feind teilte.

Der Countdown? Den hat Regisseur Fritz Lang 1929 für die „Frau im Mond“ erfunden, zu dem Oberth und von Braun als Berater beitrugen: „Wenn ich eins-zwei-drei... zähle, weiß keiner, wann's losgeht!“ Seither wird rückwärts gezählt.

Ulrich Köhler



## MAGIE DER SACHLICHKEIT

Diesem Buch dürfte sich kaum jemand entziehen, der oder die sich für Natur, Umwelt, den Menschen darin, für Fauna, Flora, für Geomorphologie, Bodenkunde, Archäologie und für weit mehr interessiert. Welches Sachbuch beginnt schon mit einem Auszug des Grundgesetzes zum Thema „Umwelt“ und endet mit dem bekanntesten Gedicht Hermann Hesses? Wo gibt es eine Leseempfehlung in einem Werk, in dem ein höchst renommierter Autor (unter anderem Mitglied der Leopoldina), gleich vier unterschiedliche Methoden auffächert, wie das Buch gelesen werden kann? Vor allem: Wie kann ein Titel, **Umweltgeschichte Deutschlands (Springer-Verlag)**, von Hans-Rudolf Bork, gleichzeitig so einfach gehalten und dabei so anspruchsvoll sein, mit Geschichten, die weit vor der Römerzeit beginnen und bis in eine Zukunft nach 2038 weisen? Wie also kann ein solcher Anspruch, schlicht die Umweltgeschichte Deutschlands zu erzählen, eingelöst werden? Es ist ein Buch, bei dem Bilder und Illustrationen nicht illustrieren, sondern informieren, und das sich vor praktischen Handlungsempfehlungen und „subjektiver Auswahl“ nicht scheut, selbst politischen Streitfragen nicht ausweicht. Mit Personen- und Sachregister, wissenschaftlichem Apparat und historischer Zeittafel, die alles Nötige für eigene, weiterführende Recherchen bieten. Zudem, im deutschen Wissenschaftsbetrieb nicht unbedingt die Regel: bravourös geschrieben, eingängig, leicht verständlich.

Professor Hans-Rudolf Bork klärt zunächst den schillernden Begriff „Umwelt“, grenzt ein, welches Gebiet mit „Deutschland“ gemeint ist und gibt einen Überblick über die Ausgangslage: Was wissen wir, was nicht, wie nehmen und nahmen wir „Umwelt“ wahr? Sodann lässt er 260 „Umweltgeschichten“ in Schlüsseldaten folgen, eine interessanter als die andere. Ob Luftbelastung durch die Bleiverhüttung der Römer, ob der Zusammenhang von Vulkanausbrüchen mit der „Spätantiken Kleinen Eiszeit“ und dem Aufkommen der Pest, ob Beethovens „Flucht vor der Eisflut“ 1784 oder Konrad Adenauers Sojowurst – bis hin zum „Dieselgate“ des 21. Jahrhunderts: ein großer Fundus, ein großer Wurf.

Aspekte der gelernten, „deutschen“ Geschichte werden um natur- und kulturwissenschaftliche Erkenntnisse ergänzt, die überkommene Geschichtsnarrative enorm weiten. Hans-Rudolf Bork hat 2015 bereits ein „Sachbuch des Jahres“ vorgelegt; dieses könnte einmal zu denen eines Jahrzehnts zählen: Sachlichkeit kann exotisch, verblüffend und phantasievoll sein.

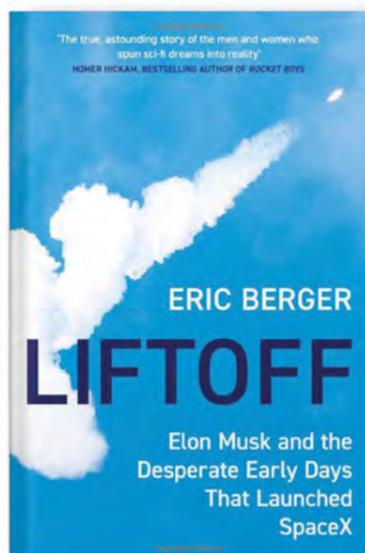
Peter Zarth

## START IN DEN NEWSPACE

Keine Frage: Elon Musk ist Kult. Nach zehn Jahren ohne Launcher für astronautische Missionen sind die USA dank SpaceX nun endlich wieder in der Lage, selbst Menschen ins All zu bringen. **Liftoff: Elon Musk and the Desperate Early Days That Launched SpaceX (Harper Collins Publ. USA)** blickt in die Anfänge des ambitionierten Unternehmens und beschreibt, wie es Elon Musk gelang, die Raketenswissenschaften wieder auf die Starttrampe zu holen. Musk lernt man als Überzeugungstäter kennen – akribisch in der Entwicklung und Vollblut-Entrepreneur – im Kontrast zum Medienstar von Grünheide.

Der Autor Eric Berger hat zahlreiche kleine Stories und Begebenheiten gesammelt, stellt aber auch grundlegende Einsichten vor, welche Prinzipien helfen, um neue technische Lösungen zu finden. So sind Fehler für Musk die Chance, zu lernen und sich zu verbessern. Und Technik steht nicht für sich allein. Liftoff erläutert schon fast gebetsmühlenhaft, wie überzeugend Musk ab der ersten Stunde seine Leute rekrutiert und immer wieder motiviert. Deutlich wird auch, wie fordernd die Kultur bei SpaceX ist. Der Autor beschreibt sehr plastisch, wie eine solch große Vision mit langfristigen Zielen umgesetzt wurde. Darüber hinaus hat SpaceX so auch den Markt für NewSpace geöffnet. Eine vitale Start-up-Szene, gerade in Deutschland und Europa, inklusive privater Investoren revolutioniert die Branche mit Micro-Launchern, SmallSats und Konstellationen für innovative Anwendungen. Mit „Deep Tech“, so Berger, sei viel mehr zu gewinnen, als man riskiere. Liftoff, das dieses Jahr erschienen und aktuell nur auf Englisch zu erhalten ist, bietet Space pur und lohnt sich besonders für Enthusiasten, die die Reise von SpaceX vom Start als reine Idee bis zu den Serien-Starts kennen, verstehen und miterleben wollen.

Robert Klärner



## DIE MACHT DER MATHEMATIK

Alles ist Mathe, aber Mathe ist nicht alles. Aus dieser schlichten These hat Kit Yates, Dozent an der Universität Oxford, ein Buch gemacht. Zu lesen ist von exponentiellem Verhalten am Beispiel des Embryo-Wachstums, von Risikoabschätzungen und Fehlalarmen in der Medizin. Auch aktuelle Stichworte wie Pandemie oder Herdenimmunität greift der Autor auf. Yates beleuchtet die Rolle der Mathematik vor Gericht, wie in der Affäre Dreyfuss, oder auch bei politischen Wahlen. Ein Exkurs in die Welt der unterschiedlichen Zahlensysteme zeigt, wie diese zum Handicap werden können: Mathematische Sorgfalt hat die Menschen 1969 auf den Mond gebracht, eine winzige Sorglosigkeit im Umgang mit mathematisch-physikalischen Einheiten aber 1999 den Mars Climate Orbiter zerstört. Schließlich landet Yates bei ungelösten Problemen der Mathematik und beim neuzeitlichen E-Commerce.

Dank historischer Exkurse und eingeflochtener Tatsachenberichte lassen sich die 326 Seiten auch von Leuten mit Mathephobie überwiegend gut weglesen. Fachleuten mag Manches zu trivial sein, Mathe-Laien schon zu speziell. Doch für alle unüberlesbar verfolgt der Dozent mit seinem Buch **Warum Mathematik (fast) alles ist (Piper)** ein Lehrziel: Mathematik kann selbst bei Anerkenntnis ihres ungeheuren Potenzials nur so gut sein, wie die Personen, die sie handhaben. So einfach.

Cordula Tegen

## ZEICHEN DES WANDELS

Flugzeuge, die majestätisch und scheinbar mühelos in den Himmel emporsteigen, versetzen in Staunen über den beeindruckenden Erfindergeist des Menschen. Doch trotz aller technischen Raffinesse setzen sie eines Tages ein letztes Mal zur Landung an. Nachdem ihnen die letzten brauchbaren Ersatzteile entnommen wurden, fressen sich durch viele Aluminiumhüllen Bagger und Rost. Einige warten geduldig in der trockenen Wüstenluft auf eine zweite Chance in der Luft, im Museum oder gar im Film, während woanders zahlreiche imposante, vierstrahlige Jumbojets Flügelspitze an Flügelspitze aufgereiht das Ende einer Ära erahnen lassen.

Was **Nach der letzten Landung (GeraMond)** passieren kann und warum Flugzeuge vorübergehend oder gar dauerhaft am Boden bleiben, hat Sebastian Thoma in etwa 200 Bildern und erläuternden Texten festgehalten. Der Hobbypilot und Fotograf hat alle Fotos in diesem Bildband über mehrere Jahre selbst aufgenommen und überzeugt mit abwechslungsreichen Bildschnitten und gleichbleibend hervorragender Qualität. Die großformatigen, ungeschönten Aufnahmen zeigen abgestellte Flugzeuge und erwecken Gedanken über die zahlreichen Reisen und Abenteuer dieser Maschinen.

Daniel Beckmann



### LINKTIPPS

#### AUF IN DIE UNTIEFEN

[deutschlandfunk.de/podcast-deep-science](https://deutschlandfunk.de/podcast-deep-science)

Bei diesem Wissenschaftspodcast begibt sich die Journalistin Sophie Stigler zusammen mit Reporterinnen und Reportern in die Tiefen des Un-erforschten. Es geht um datenwissenschaftliche Experimente, bei denen versucht wurde, die politische Gesinnung der Menschen an deren Gesicht abzulesen, um die Frage, ob man Affen und Menschen kreuzen könnte oder auch darum, ob wir einfach so die Sonne verdunkeln können. Wer sich für extreme Experimente interessiert, sollte hier einmal hineinhorchen.

#### EISIGE MISSION

[s.dlr.de/yjcsqb](https://s.dlr.de/yjcsqb)

Der Aletschgletscher ist ein Gletscher der Superlative. Mit einer Länge von über 22 Kilometern und einer Mächtigkeit von bis zu 900 Metern ist er der größte Gletscher der Alpen. Im September war ein DLR-Team für zwei Wochen auf dem Gletscher unterwegs und hat mit einer hochauflösenden Kamera bemerkenswerte Luftbilder der durch den Klimawandel schwindenden Schneemassen erstellt. In diesem Blog berichtet eine Wissenschaftlerin aus dem Team darüber, wie sich die Schneebedeckung in dieser Region in den letzten Jahrzehnten verändert hat.

#### HELMHOLTZ AM KLAVIER

<http://s.dlr.de/UBNgH>

Das Genie von der Spree mal von einer ganz anderen Seite: Eine Infografik über Hermann von Helmholtz in seiner Zeit, ein fiktives Interview mit Anna von Helmholtz, ein Gespräch mit einem Nachfahren des Universalgelehrten und vieles an Lesens- und Hörensvertem mehr, präsentiert die Website der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft anlässlich des 200. Geburtstags ihres Namensgebers – hervorragend aufbereitet und mit erstaunlichen Informationen über den Forscher privat sowie die Wirkung seiner Erkenntnisse bis ins Heute.

#### FRAG DEN ASTRONAUTEN

[s.dlr.de/alVh0](https://s.dlr.de/alVh0)

In dieser YouTube-Videoreihe beantwortet der ESA-Astronaut Matthias Maurer Fragen zum Leben und Arbeiten auf der Internationalen Raumstation ISS. Die Videos dauern meist etwa eine Minute und handeln von Zeitzonen auf der ISS, wie man in Schwerelosigkeit Nahrung schlucken kann, was im Krankheitsfall zu tun ist oder wie Astronautinnen und Astronauten eigentlich telefonieren.

#### DIE WELT DES VIDEOS

[trendsreport.withyoutube.com](https://trendsreport.withyoutube.com)

In diesem Video schlüsselt YouTube visuell ansprechend und gut verständlich auf, wie sich das Medium Video entwickelt hat. So stieg die Nutzung von Live- und Simultanübertragungen während der Pandemie stark an. Der Hintergrund sei, so erzählt Kevin Allocca, der die YouTube-Abteilung Culture&Trends leitet, dass Videos ein Gefühl der Zusammengehörigkeit schaffen. Das reicht vom gemeinsamen Tanzunterricht im Livestream bis zum „with me“-Video, das dazu einlädt, gemeinsam zu kochen, zu lernen oder sogar zu putzen. Spannender Einblick in die letzten Trends und welche Basis sie für die Zukunft schaffen. (Englisch)

#### ZWEIMAL PRO WOCHE ASTRONOMIE

[www.haus-der-astronomie.de/faszi-astro-online](https://www.haus-der-astronomie.de/faszi-astro-online)

Unter dem Titel „Faszination Astronomie Online“ bietet das Haus der Astronomie jeden Dienstag und Donnerstag um 19 Uhr einen kostenlosen halbstündigen Online-Vortrag an. Teilnehmen kann man einfach über die Facebook-Seite oder den YouTube-Kanal des Hauses. Wer einen Vortrag verpasst hat, kann ihn noch nachträglich über das Archiv des YouTube-Kanals abrufen, wo die gesamte Reihe gespeichert ist.

