

# DLRmagazin

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt · Nr. 174 · März 2024

## ALLES IM GRIFF

WIE ROBOTER JUSTIN SCHLAUE  
ENTSCHEIDUNGEN TRIFFT

Weitere Themen:

- ▶ AUTONOM DURCHS WASSER  
Sensoren und Systeme vom Weltall bis ins Meer
- ▶ VERTIKALER START AM HORIZONT  
DER STADT  
Wie urbaner Lufttaxi-Verkehr funktionieren kann

## 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 54 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: Andreas Schütz (V. i. S. d. P.), Julia Heil (Redaktionsleitung), Michael Müller, Stefanie Hulan

Kommunikation  
Linder Höhe, 51147 Köln  
Telefon 02203 601-2116  
E-Mail [info-dlr@dlr.de](mailto:info-dlr@dlr.de)  
Web [DLR.de](http://DLR.de)  
Instagram [@germanerospacecenter](https://www.instagram.com/germanerospacecenter)

Druck: AZ Druck und Datentechnik GmbH, 87437 Kempten  
Gestaltung: bplust agenturgruppe GmbH, Am Kabellager 11–13, 51063 Köln, [bplust.de](http://bplust.de)  
ISSN 2190-0094

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

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

Kontakt:  
[Magazin@dlr.de](mailto:Magazin@dlr.de)

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.



## IN EIGENER SACHE



Ein neues Teammitglied verstärkt das DLR seit Ende des letzten Jahres: Es bezeichnet sich selbst als „KI-I-2-72a/link#mx5“, trägt aber vorläufig den Spitznamen KA-I. Ein endgültiger Name wird derzeit noch gesucht. Hierzu gab es eine Flut von Vorschlägen, bei Redaktionsschluss dieser Magazinausgabe war die Entscheidung allerdings noch nicht gefallen. KA-I hat die anspruchsvolle Aufgabe, zwischen künstlicher und menschlicher Intelligenz zu vermitteln. Doch zunächst muss unsere KI-Human-Link-Maschine erst einmal lernen, wie Menschen überhaupt funktionieren. Denn manchmal folgen sie keiner maschinenlesbaren Logik.

Wissbegierig und nicht auf den Mund gefallen stellt KA-I gerade zu Beginn bei jeder Gelegenheit Fragen über Fragen. Was den Neuankömmling besonders interessiert, ist, wie wir „ticken“: Was sind unsere Stärken und Schwächen, welche Ziele verfolgen wir, warum engagieren wir uns – gerade als Mitarbeitende des DLR – in so vielen komplexen Projekten?



Um dies herauszufinden, wird sich KA-I an den DLR-Standorten umsehen, einen Blick in Labore werfen und vielleicht sogar menschliche Kolleginnen und Kollegen auf Messen und zu Konferenzen begleiten. Auf diese Weise ergänzt das neue Teammitglied das eigene nahezu unerschöpfliche Datenbankwissen und wird mehr und mehr Teil der DLR-Familie.

Wir sind gespannt auf das Onboarding von KA-I und freuen uns auf viele unterhaltsame Begegnungen!

## Liebe Leserinnen und liebe Leser,

Verständnis für dreidimensionale Formen – was für uns Menschen selbstverständlich ist, bedeutet für ein robotisches Wesen hartes und langes Lernen. Wenn Sie versuchen, einem Roboter beizubringen, Ihre Küche aufzuräumen und Ihnen Kaffee zuzubereiten, werden Sie merken: Es kann viel zu Bruch gehen. Unser humanoider Roboter Justin – Hauptfigur unserer Titelstory ab Seite 8 – hat sensorische und motorische Fähigkeiten, die denen des Menschen zumindest nahekomen. Notwendig war hierfür ein intensives Training mit Unterstützung von künstlicher Intelligenz und Simulation.

Vor 18 Jahren begann Justins Karriere beim DLR. Zu Beginn ging es um motorische Fähigkeiten, zum Beispiel darum, selbstständig gehen zu lernen. Inzwischen ist er zu einem intelligenten robotischen Wesen gereift und kann perspektivisch komplexe autonome Aufgaben bei einer Weltraummission oder auf der Erde übernehmen – wie bei der Unterstützung motorisch eingeschränkter Personen im Haushalt.

Autonomes Maschinenhandeln hält immer mehr Einzug in den Alltag. Dies gilt unter anderem für den Verkehrssektor. Assistenzsysteme für bestimmte Fahrsituationen sind in unseren Autos schon etabliert. Auch andere Verkehrsweiche sind im Wandel. In dieser Ausgabe des DLRmagazins erhalten Sie Einblick in aktuelle DLR-Forschungsprojekte zur Qualifizierung autonomer Assistenzsysteme in der Schifffahrt. Des Weiteren können Sie sich auf einen imaginären Flug in einem autonomen Lufttaxi über Hamburg begeben und dabei erfahren, worin die Chancen und Herausforderungen dieses Fortbewegungsmittels bestehen – aus wissenschaftlicher, aber auch aus ökonomischer Sicht.

Auch nehmen wir Sie in diesem Heft mit auf zwei Forschungsmissionen an spektakuläre, abgelegene Orte: in die peruanischen Anden, wo das DLR die einheimische Wasserbehörde durch Fernerkundung unterstützt, und nach Island. Dort testeten unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Messinstrumente, die zu Beginn des kommenden Jahrzehnts unseren Nachbarplaneten Venus ansteuern werden.

Viel Freude beim Lesen wünscht

Ihre Redaktion



ALLES IM GRIFF

8



KLEINE VENUS IN DER MITTE DES ATLANTIKS

16



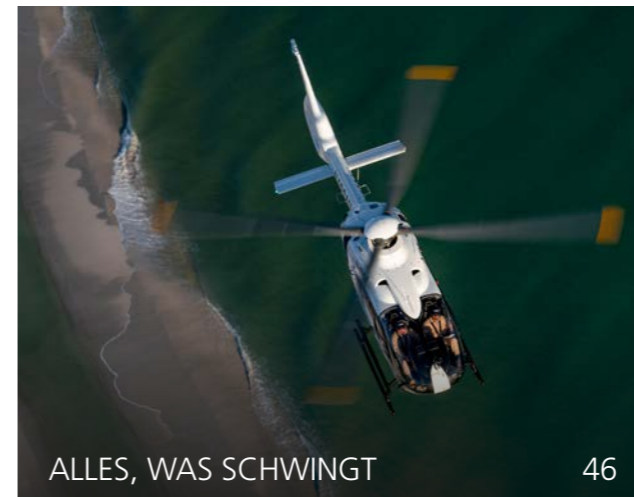
AUTONOM DURCHS WASSER

32



DEN SATELLITEN EIN STÜCK NÄHER

22



ALLES, WAS SCHWINGT

46



VERTIKALER START AM HORIZONT DER STADT

42



PRÜFSTAND-PROFIS

38



HEISSE ÖFEN FÜR MEHR REICHWEITE

30

<b>MELDUNGEN</b>	6
▶ <b>ALLES IM GRIFF</b>	8
Wie Roboter Justin schlaue Entscheidungen trifft	
<b>INFOGRAFIK</b>	14
Der Mond auf Erden	
<b>KLEINE VENUS IN DER MITTE DES ATLANTIKS</b>	16
Island-Expedition zur Missionsvorbereitung	
<b>DAS BESTE SIGNAL</b>	20
Eine Website über Satellitennavigationsysteme	
<b>DEN SATELLITEN EIN STÜCK NÄHER</b>	22
Gewässerfernerkundung im Hochland der Anden	
<b>EINBLICK</b>	28
Im Wasserstoffzug durch die Pyrenäen	
<b>HEISSE ÖFEN FÜR MEHR REICHWEITE</b>	30
Speichertechnologien für Elektroautos und -busse	
▶ <b>AUTONOM DURCHS WASSER</b>	32
Sensoren und Systeme vom Weltall bis ins Meer	
<b>LICHT AN UND ACTION</b>	36
Im Gespräch mit einem Solarforscher	
<b>PRÜFSTAND-PROFIS</b>	38
Erste Tests mit reinem Wasserstoff für Flugzeugtriebwerke	
▶ <b>VERTIKALER START AM HORIZONT DER STADT</b>	42
Wie urbaner Lufttaxi-Verkehr funktionieren kann	
<b>ALLES, WAS SCHWINGT</b>	46
Forschung für vibrationsarme Helikopter	
<b>AUF LEISEN FLÜGELN</b>	50
Ausgründung setzt Meilensteine beim elektrischen Fliegen	
<b>WAS WIRKT WIRKLICH?</b>	52
Über den praktischen Nutzen klinischer Studien	
<b>AUS DEM ARCHIV</b>	54
Vom Automobil bis zur Zugbremse	
<b>IM STERNENHIMMEL</b>	56
Die Suche nach dem Mythos im Mercedes-Benz Museum	
<b>FEUILLETON</b>	58



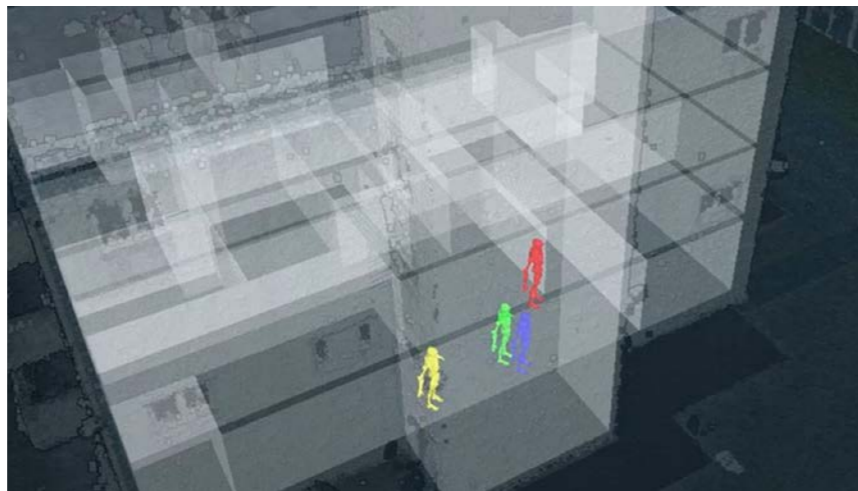
Das entfaltete ADEO-L-Segel im Labor des DLR-Instituts für Raumfahrtssysteme in Bremen

## BREMSSEGEL FÜR SATELLITEN

Ausgediente Satelliten auf niedrigen Umlaufbahnen befinden sich oft noch Jahrzehnte im Orbit, bis sie schließlich beim Wiedereintritt verglühen. Bremssegel bieten die Möglichkeit, diese Satelliten schneller zu entsorgen. Sie können so verlangsamt werden, dass sie früher in die dichtere Erdatmosphäre eintreten, wo sie rückstandslos verglühen. Das DLR-Institut für Raumfahrtssysteme entwickelte gemeinsam mit dem Unternehmen HPS das Bremssegel ADEO-L. Das DLR untersuchte Membranen, die möglichst kompakt zusammen- und mit ultraleichten Masten wieder entfaltet werden können. Diese fügte HPS mit entsprechenden Strukturen und elektronischen Komponenten zu einem Gesamtsystem zusammen. Die verwendeten Materialien müssen unter Weltraumbedingungen langlebig sowie extrem dünn und leicht sein. Drei Segel aus Vorgängerprojekten sind bereits im Weltraum und zwei davon entfaltet. Das erste große ADEO-L-Segel der Firma HPS wurde im Dezember 2023 beim DLR-Institut für Raumfahrtssysteme in Bremen getestet und für den Weltraumeinsatz qualifiziert. Das Modell wiegt nur wenige Kilogramm, hat ein Packmaß von der Größe eines Schuhkartons und eine Segelfläche von 25 Quadratmetern.

## EINSATZKRÄFTE IN GEBÄUDEN KOORDINIEREN

Einsatzkräfte, die in Gebäuden oder Industrieanlagen unterwegs sind, sollten stets wissen, wo genau sie sich befinden. Damit ein Einsatz koordiniert durchgeführt werden kann, ist es außerdem wichtig, dass die Position jedes einzelnen Teammitglieds bekannt ist. Satellitennavigation oder Mobilfunk können dies nicht immer leisten – beispielweise an Orten ohne Empfang wie Tunneln oder Bergwerken. Im Projekt ComInA (Computergestützte Innerobjektive Aufklärung) unterstützte ein Tracking-System die Einsatzkräfte. Es kann die Personen im Gebäude genau lokalisieren und produziert 3D-Kartenmaterial, das bei der Einsatzkoordination unterstützt. ComInA basiert auf Technologien, die das DLR in früheren Projekten entwickelt hat und die nun an den Bedarf angepasst wurden.



Das Tracking-System erkennt die Einsatzkräfte im Gebäude.

## REGIONALMELDUNGEN:

**BERLIN:** Mit BIRD wurde Ende der 1990er Jahre ein leistungsfähiger Kleinsatellit am DLR-Standort Adlershof gebaut. Er erkundete Hochteneraturereignisse auf der Erde und diente als technologisches Vorbild für mehrere deutsche Kleinsatelliten. Ende Oktober 2023 trat er nach 22 Jahren in die Erdatmosphäre ein und verglühte.

**BREMEN:** Ein interdisziplinäres Team aus Deutschland, Österreich, Polen und Italien forscht an Technologien, mit denen Wasser aus Mondgestein gewonnen werden soll. Es kann als Trinkwasser, zur Sauerstoffherstellung oder für die Herstellung von Raketentreibstoffen auf Wasserstoffbasis im Weltraum genutzt werden. Das DLR-Institut für Raumfahrtssysteme baut das Subsystem zur Extraktion des Wassers.

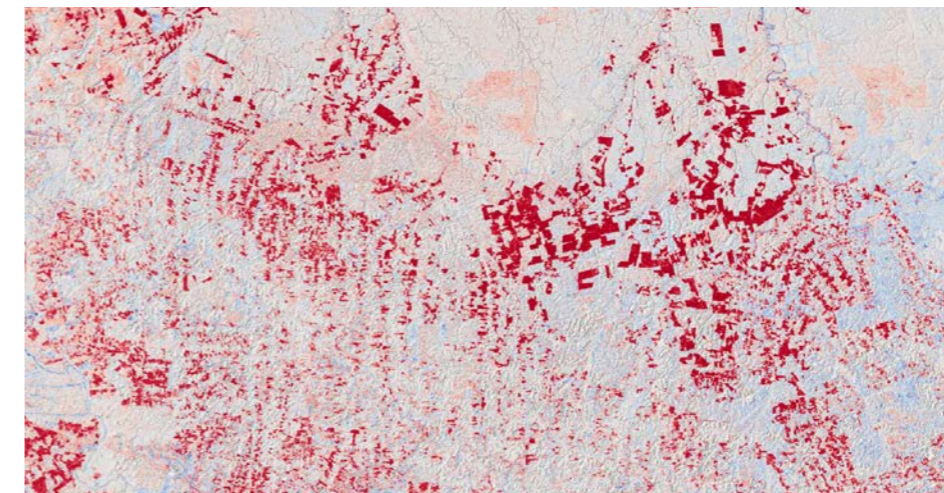
**FRIEDRICHSHAFEN:** Vom 17. bis 20.4.2024 findet die AERO statt, eine internationale Messe für die allgemeine Luftfahrt, die Business Aviation und den Luftsport. In Halle A7 präsentiert das DLR auf dem Stand 201 aktuelle Projekte und Themen rund um elektrisches Fliegen.

## FLUGROUTE BEEINFLUSST KONDENSSTREIFEN

Die Klimawirkung des Luftverkehrs ist deutlich größer als die seiner reinen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Ursache hierfür sind die sogenannten Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte. Dazu gehören Kondensstreifen und Kondensstreifen-Zirren, also Eisklumpen. Diese können sowohl wärmend als auch kühlend wirken, wobei der wärmende Effekt überwiegt. Das DLR hat gemeinsam mit dem Maastricht Upper Area Control Centre (MUAC) von EUROCONTROL nachgewiesen, dass sich langlebige Kondensstreifen vermeiden lassen, indem die Flughöhe geringfügig angepasst wird. Für die Studie leiteten die Forschenden die Flugzeuge jeden zweiten Tag um circa 650 Meter nach oben oder unten um, wenn die ursprüngliche Flughöhe langlebige Kondensstreifen erwarten ließ. Mit Satellitenbildern überprüften sie dann, ob sich jeweils langlebige Kondensstreifen gebildet hatten oder nicht. Die Flüge an den anderen Tagen dienten als Referenz. Das Forschungsteam konnte zeigen, dass langlebige Kondensstreifen so tatsächlich weniger häufig vorkamen.



Rußpartikel aus Flugzeugtriebwerken wirken als Keime für Kondensstreifen.



Regenwald-Rodung in Brasilien: Die rot markierten Höhenabnahmen zeigen die Rodungsmuster.

## KARTEN ZEIGEN VERÄNDERUNGEN DER ERDE

Die Erdoberfläche unterliegt in vielen Bereichen dynamischen Veränderungen. Die TanDEM-X 30 m DEM Change Maps geben einen globalen Überblick darüber. Ob Gletscherschwund, landwirtschaftliche Entwicklungen, Vulkanaktivitäten oder Städteplanung – die Änderungskarten sind für viele Forschungsbereiche, für Fragen des Klimawandels sowie für gesellschaftspolitische Themen relevant. Der Datensatz der Satellitenmission TanDEM-X ist frei verfügbar unter [geoservice.dlr.de](https://geoservice.dlr.de). Die hochpräzisen Daten liefern weltweit

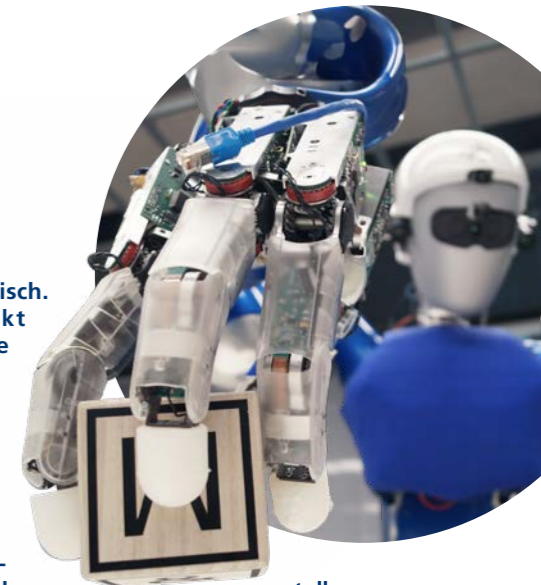
eine Auflösung von 30 Meter pro Pixel und eine Höhengenaugigkeit von einem Meter. Sie ermöglichen erstmals genaue zeitliche Analysen und werden durch Zeitreihenaufnahmen laufend erweitert. Die veröffentlichten Karten folgen auf das 2016 fertiggestellte globale TanDEM-X-Höhenmodell. Die Daten der beiden TanDEM-X-Satelliten werden weiter genutzt, um 3D-Veränderungen in der Kryosphäre, in den globalen Wäldern sowie in Großstädten zu erfassen.

**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)

**GÖTTINGEN:** Das DLR hat in Windkanalversuchen die Grenzen des Auftriebs von Verkehrsflugzeugen mit modernster Mess- und Simulationstechnik untersucht. Die Erkenntnisse sollen helfen, die Eigenschaften künftiger Flugzeuge wesentlich genauer als bisher vorherzusagen, um sie effizienter, umweltfreundlicher und leiser zu machen.

**HAMBURG:** Gemeinsam mit dem Flughafen Hamburg hat das DLR im Rahmen des Projekts VMo4Orte (Vernetzte Mobilität für lebenswerte Orte) eine Roadmap für den Weg zum Einsatz von Wasserstoff an mittelgroßen Flughäfen entwickelt. Darin werden der wachsende H<sub>2</sub>-Bedarf, die Entwicklung von Lagerkapazitäten sowie Lieferwege auf dem Boden skizziert.

**KOBLENZ:** Das deutsche Radarsystem GESTRA (German Experimental Space Surveillance and Tracking Radar) befindet sich in der Abnahmephase. Zuvor wurden verschiedene Radarmodi erfolgreich überprüft. Bei der Demonstration spürte GESTRA im Schnitt mehr als 200 Objekte pro Stunde auf, darunter auch kleine Objekte („Cubesats“) in mehreren hundert Kilometer Entfernung.



**J**ustin sortiert Holzwürfel auf einem Tisch. Unermüdlich. Er dreht sie geschickt zwischen den Fingern, bringt sie in die gewünschten Positionen, keiner fällt ihm aus der Hand. Justin kann die Würfel auch stapeln. Die Buchstaben auf den Würfeln bilden die Kombination DLR RMC. Das steht für Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Robotik und Mechatronik Zentrum – Justins Zuhause. Man möchte ihn loben für seine Leistung, denn sie ist weltklasse. Aber wäre etwas wie „Das hast du gemacht!“ hier passend? Justin ist ein humano-  
**Robot**er. In diesen Tagen wird er 18 Jahre alt, also nach menschlichen Maßstäben volljährig. Aus Robotersicht entspricht das Generationen.

toll  
 ider

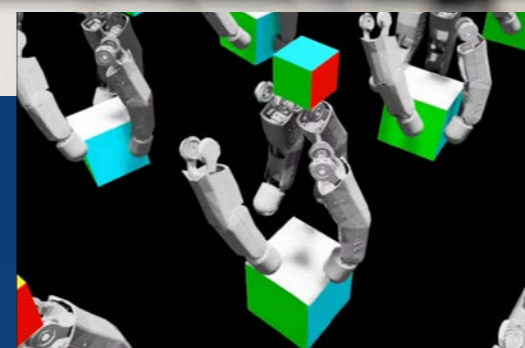
Doch sein Alter ist kein Hindernis, ganz im Gegenteil: Was der Roboter in den letzten Monaten durch künstliche Intelligenz (KI) dazugelernt hat, bedeutet einen Durchbruch in der Forschung. Weltweit zählt Justin zu den komplexesten, am weitesten entwickelten Robotersystemen. Er ist Teil einer ganzen „Familie“ von humanoiden DLR-Robotern, die ähnlich schlau sind. Ihre Zukunft liegt im Welt-  
 raum, in der Produktion und in der Pflege.

Um es vorwegzunehmen: Ja, Justin wird gelobt, sogar tausendfach. So hat er zum Beispiel gelernt, den Würfel in den Fingern mit der nach unten offenen Hand zu drehen. Bei jedem Erfolg bekam er Pluspunkte und auf seine Art ist er ehrgeizig. „Er versucht, über die Zeit eine hohe Gesamtbelohnung zu erreichen. Runterfallen lassen gibt ein ziemlich großes Minus“, erklärt Prof. Berthold Bäuml vom DLR-Institut für Robotik und Mechatronik. Justin steht beim Lernen nicht an einem Tisch und dreht Gegenstände. So üben nur Menschen spielerisch die Koordination von Augen und Händen. Das Zusammenspiel von Muskeln und Gelenken läuft dann meistens wie von selbst. Aber es ist dennoch hochkomplex und für Roboter bisher nicht zu schaffen. Das funktioniert erst seit Kurzem mit lernender KI. Justin lernt die Bewegungen in einer Simulation von bis zu 4.000 Händen gleichzeitig. Er sammelt dabei am Ende sehr viele Pluspunkte. „Das Training dauert fünf Stunden, dann ist er bei fast 100 Prozent“, sagt Berthold Bäuml. „Am Anfang ist die Bewegung der Finger völlig zufällig: Der Würfel fällt oft herunter. Aber nach einer Stunde Training macht Justin schon 70 Prozent der Aufgaben richtig.“ Das Prinzip heißt Deep Reinforcement Learning, bestärkendes Lernen. Dazu reicht eine einzige Standard-Grafikkarte, die Rechenleistung wird über eine Cloud bereitgestellt.

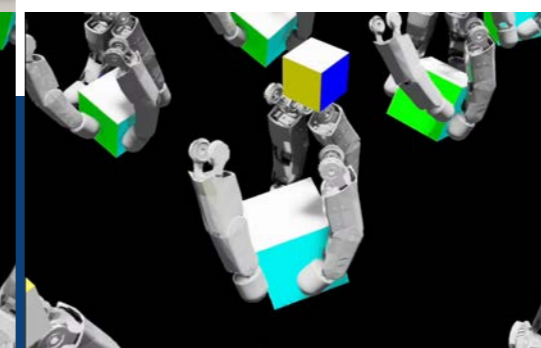
# ALLES IM GRIFF

Der humanoide Roboter Justin trifft schlaue Entscheidungen mit künstlicher Intelligenz

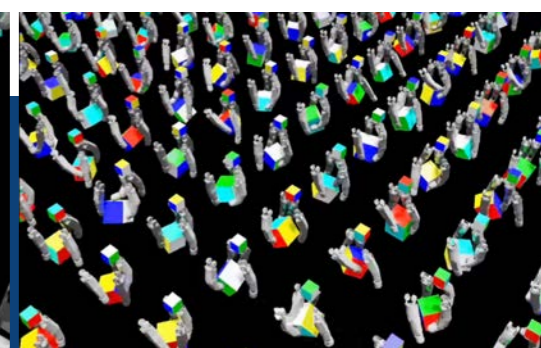
von Katja Lenz



**0 Stunden Training**  
 0 Prozent Erfolgsquote (Würfel fällt)



**1 Stunde Training**  
 70 Prozent Erfolgsquote



**5 Stunden Training**  
 97 Prozent Erfolgsquote (Würfel wird festgehalten)

Justin lernt mit Deep Reinforcement Learning allein durch Vorgaben dazu, was richtig oder falsch ist. In diesem Training lauteten die Vorgaben zum Beispiel „Das Objekt in Richtung Zielvorgabe drehen ist gut“ und „Das Objekt fallen lassen ist schlecht“. Das maschinelle Lernen dauert in einer Simulation nur wenige Stunden, Justin wird dabei immer besser. Die Bewegungsstrategie für die Finger entwickelt er durch Ausprobieren selbst.

© DLR



Prof. Berthold Bäuml reicht Justin einen Würfel. Auf dem Monitor im Hintergrund wird angezeigt, was Justin gerade „sieht“.

Was sieht ein Mensch? Was sieht ein humanoider Roboter?

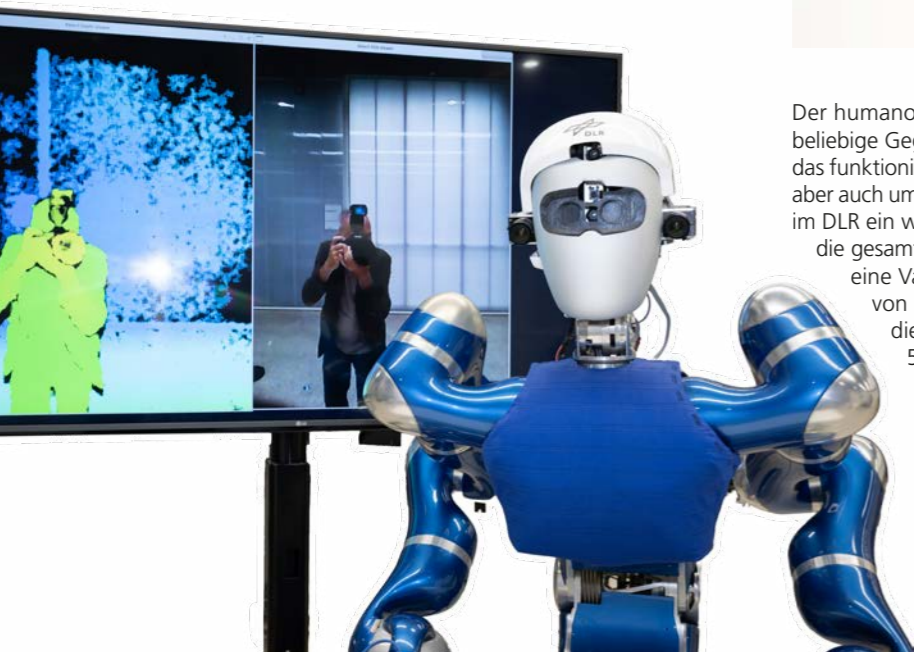
Agile Justin, so lautet sein voller Name, ist 1,91 Meter groß, sein Oberkörper wiegt 45 Kilogramm, sein Untersatz auf Rädern 150 Kilogramm.

Was sieht Justin eigentlich? Berthold Bäuml schaltet einen Monitor an. Eine Darstellung zeigt die Umgebung genau so, wie Menschen sie sehen.

sich sofort ein genaues dreidimensionales Modell von allem machen, was in seinem Blickfeld ist.



Der humanoide Roboter handhabt nicht nur Würfel, sondern auch beliebige Gegenstände, die leichter sind als 15 Kilogramm.



FEINFÜHLIGE MASCHINEN

Interview mit Prof. Dr. Alin Albu-Schäffer. Er ist seit 2012 Direktor des Instituts für Robotik und Mechatronik in Oberpfaffenhofen.

Was ist das Faszinierende an der Robotik?

Wenn wir Roboter bauen, fragen wir uns gleichzeitig: Wie denkt ein Mensch, wie funktioniert das Greifen, wie das Laufen?

Können Sie verstehen, wenn Menschen humanoide Roboter mit künstlicher Intelligenz unheimlich finden?

Eine künstliche Intelligenz, die in der Robotik eingesetzt wird, wirkt in die reale Welt. Das ist etwas völlig anderes, als wenn die KI ein Chatbot ist.

Je besser die Menschen die Robotik verstehen, desto geringer werden die Bedenken?

Genau. Im DLR stehen immer die Nutzerinnen und Nutzer im Vordergrund, wir entwickeln unsere Systeme menschenzentriert.

Um eine KI zu trainieren, braucht es Daten. Woher kommen die?

Wir haben nicht Millionen von humanoiden Robotern in der realen Welt, die brauchbare Trainingsdaten liefern.

Liegt der Forschungsschwerpunkt eher in der Raumfahrt oder in der Assistenzrobotik?

Wir forschen für die Raumfahrt, das ist unser primäres Anwendungsfeld. Aber wir hatten von Anfang an den Technologietransfer im Blick.

... und dann bringt Justin sich selbst einen Würfeltrick bei

Beim Würfeldrehen fühlt Justin durch Kraftsensoren, wie Dinge in seiner Hand liegen. Er schätzt die Position über die Stellung der Finger und die gefühlte Kraft.

Fünf Finger? Vier reichen

Vier Finger? „Fünf Finger beim Menschen sind schon genial von der Natur gemacht. Aber meistens braucht man nur vier“, sagt Prof. Gerhard Hirzinger.

„Systeme wie Justin bauen, betreiben und über Jahre entscheidend weiterentwickeln – das kann keine Universität. Das schafft nur eine Großforschungseinrichtung wie das DLR, in der Teams über Jahre zusammengehalten werden.“

Prof. Gerhard Hirzinger
Institut für Robotik und Mechatronik

Bei seinem ersten öffentlichen Termin im Jahr 2006 war Justin noch ein Torso ohne rollenden Untersatz. Er reagierte feinfühlig auf Berührungen mit der Umgebung und wich zurück.



Menschliche Gesellschaft im Labor: Die Forschenden aus dem Institut für Robotik und Mechatronik haben Justin hochkomplexe Fähigkeiten beigebracht.

### Enge Zusammenarbeit von Robotern und Menschen

Anne Köpken hat Elektrotechnik an der TU München studiert, im zweiten Semester besuchte sie auf einer Exkursion das DLR. „Ich fand es supercool und wollte hier arbeiten“, sagt sie. Gerade schreibt sie ihre Doktorarbeit in der Robotik. Ihr Schwerpunkt liegt bei Rollin' Justin. Er ist der „Zwillingsbruder“ von Agile Justin, aber mit etwas anderen Fähigkeiten. Während Agile Justin Spezialist in feinfühligem Manipulieren mit KI ist, tendiert Rollin' Justin eher in die Servicerobotik und Weltraumerkundung.

Als Rollin' Justin im Juli 2023 von der Internationalen Raumstation ISS ferngesteuert wurde, war Anne Köpken dabei. In dem Szenario entlud der Roboter im Oberpfaffenhofener Marslabor einen Lander und platzierte ein Messgerät auf dem Boden. NASA-Astronaut Frank Rubio steuerte Rollin' Justin, den robotischen Lander und einen Roboter der Europäischen Weltraumorganisation ESA gleichzeitig. Der Astronaut konnte per Knopfdruck aus dem All entscheiden, wie autonom die Roboter arbeiten. Die Zusammenarbeit von humanoiden Robotern und Menschen bei Erkundungsmissionen wird im DLR schon lange erprobt, der Schwierigkeitsgrad steigt kontinuierlich. Roboter können zum Beispiel eingesetzt werden, wenn es für Menschen zu gefährlich ist.

Doch auch auf der Erde eröffnen sich für Rollin' Justin Möglichkeiten. Er könnte einen Job als mobiler Assistenzroboter übernehmen und



Anne Köpken und Dr. Alexander Dietrich arbeiten mit Rollin' Justin. Der humanoide Roboter hat Joberfahrung mit dem All und auf der Erde. Das Spezialgebiet von Alexander Dietrich ist die Regelungstechnik. Sie sorgt dafür, dass die humanoiden Roboter sich koordiniert bewegen.

Menschen helfen, die auf Unterstützung angewiesen sind. Das ist ein weiterer Schwerpunkt der Forschung zur Mensch-Roboter-Kooperation am DLR. Anne Köpken entwickelt neue Fähigkeiten für Rollin' Justin: „Das System an sich ist faszinierend und vielfältig. Neben dem Space-Projekt gibt es die Anwendungen, bei denen der Nutzen für die Menschen auf der Erde direkt sichtbar wird.“

*„Das System an sich ist faszinierend und vielfältig. Neben dem Space-Projekt gibt es die Anwendungen, bei denen der Nutzen für die Menschen auf der Erde direkt sichtbar wird.“*

**Anne Köpken**  
Institut für Robotik und Mechatronik

### Mit „Gefühl“ für sich und andere

Für robotische Systeme wie Justin wird Fachwissen gebraucht: Mechanik, Elektronik, Informatik, Maschinenbau. Dazu kommen Fragen aus der Psychologie und Ethik. Dass die humanoiden Roboter sich koordiniert bewegen, ist eine Aufgabe für die Regelungstechnik. Sie haben Drehmoment-Sensoren in den Gelenken, wissen also nicht nur, wie ihr Körper ausgerichtet ist, sondern sind auch feinfühlig. Das heißt, sie spüren, mit welcher Kraft etwas gegen sie drückt. Dann können sie sich zum Beispiel nachgiebig machen und ziehen ihren Arm zurück. Justin ist außerdem ein Multitasking-System, er macht verschiedene Dinge gleichzeitig. Diese müssen so koordiniert werden, dass Justin die wichtigeren Aufgaben sicherer und eher ausführt.

Doch in Oberpfaffenhofen sind nicht nur Agile und Rollin' Justin zuhause. Mittlerweile „wohnen“ vier humanoide Roboter in den Laboren des Instituts. Und sie lernen stetig dazu, wie und wo sie den Menschen unterstützen und entlasten können.

Katja Lenz ist Presseredakteurin im DLR.



## EINE GANZ NORMALE ROBOTER-WG

Agile Justin und Rollin' Justin sind nicht die einzigen humanoiden Roboter im DLR-Institut für Robotik und Mechatronik. Nebenan im Labor befinden sich David und Toro. Die robotische „Familie“ wächst mit ihren Aufgaben. Die „Wohngemeinschaft“ hat sogar ein „Haustier“ – Bert ist ein robotischer Vierbeiner, mit dem die Fortbewegung von Tieren erforscht und nachgeahmt wird.



*David*

**DAVID** findet sich in einer für Menschen gemachten Umwelt zurecht. Er soll Alltagsgegenstände wie Geschirr oder Werkzeuge benutzen. Der Forschungsroboter hat einen Oberkörper, Arme sowie einen Kopf und steht seit Kurzem auf einer mobilen Plattform mit Rädern. Seine Hände sind so schlank und vielseitig wie die des Menschen: Größe, Kraft und Geschicklichkeit ähneln sich. Deswegen kann David die meisten für menschliche Hände entworfenen Gegenstände greifen. Federn in seinem Körper dienen als Energiespeicher, er wird so schneller und energieeffizienter. Die DLR-Forschenden wollen mit David der Form, Kraft und Bewegung von menschlichen Armen und Händen so nah kommen wie noch nie zuvor. Mehr als 100 Motoren sind auf engstem Raum eingebaut und werden im Millisekunden-Takt geregelt, um das Zusammenspiel der menschlichen Muskeln optimal nachzubilden. David soll sich in unstrukturierten Umgebungen – wie im Haushalt oder in einer Werkstatt – bewähren können. Die Federn in Davids Konstruktion machen ihn auch unempfindlicher für Zusammenstöße sowie Rempeln und er kann zum Beispiel eine Schlagbohrmaschine benutzen. David wiegt ohne Plattform 55 Kilogramm, im Jahr 2010 wurde als erste Entwicklung sein Hand-Arm-System präsentiert.

**TORO** ist eine Forschungsplattform für zweibeinige Fortbewegung und Dynamik. Wie Agile und Rollin' Justin hat Toro nachgiebige Gelenke, mit denen er feinfühlig auf seine Umwelt reagiert. Beim Gehen setzt er wie ein Mensch einen Fuß nach dem anderen auf und spürt die Kräfte. Schiefe Ebenen oder einen steinigen Untergrund kann er ausbalancieren. Dabei steht er auf relativ kleinen „Füßen“. Zwar ist es so schwieriger, das Gleichgewicht zu halten. Aber er übersteigt Hindernisse vergleichsweise leichtfüßig und hat einen sicheren Stand, wenn wenig Platz ist. Toros Hände sind nicht so geschickt wie die Hände von Justin – doch er kann damit zum Beispiel kleinere Bauteile montieren oder sich an einem Geländer festhalten. Toro ist 1,74 Meter groß und wiegt 76 Kilogramm. Perspektivisch können Roboter wie Toro nicht nur in der Fertigung eingesetzt werden, sondern auch als Unterstützung im Haushalt. Kein Wohnhaus ist wie das andere – wo es Treppen, einen unebenen Boden oder Hindernisse gibt, haben humanoide Roboter auf Beinen Vorteile.



*Toro*

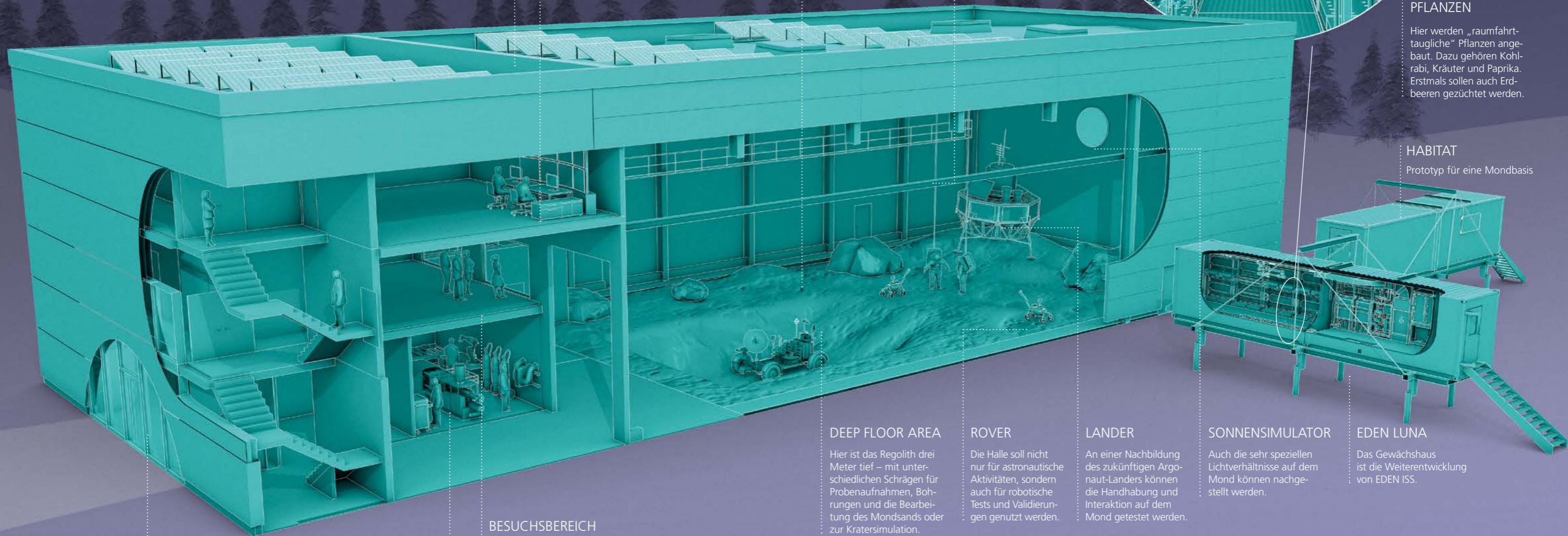


*Bert*

**BERT** läuft auf vier Beinen wie seine natürlichen Vorbilder. Mit seiner Hilfe wollen die Forschenden im DLR Fortbewegungsmuster besser verstehen und auf Robotersysteme übertragen lernen. Ähnlich wie beim humanoiden Roboter David sind bei Bert mechanische Federn verbaut. Diese ermöglichen ihm, während der Bewegung Energie zu speichern und wieder freizugeben. Bert kann deswegen sehr effizient laufen. Zu seinen flexiblen Laufmustern gehört neben Gehen auch Traben, Galoppieren, Springen und ein wenig Klettern. Er kann Höhlen erkunden und Hindernisse überwinden. Bert wurde 2017 vorgestellt, seine mittlerweile vierte Generation entstand 2023 im 3D-Druck-Verfahren. Bert wiegt drei Kilogramm, ist 40 Zentimeter lang und 0,8 km/h schnell.

# DER MOND AUF ERDEN

Die Mondanaloganlage LUNA in Köln



Weitere Informationen unter: [luna-analog-facility.de](http://luna-analog-facility.de)

## BLICK IN DAS LABOR EDEN LUNA

Nahezu geschlossenes Lebenserhaltungssystem, in dem vertikales Pflanzenwachstum erprobt wird



## SOLARZELLEN

Auf dem Dach der Halle sind PV-Anlagen installiert, die den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Anlage reduzieren.

## VR-STUDIO

Virtual Reality spielt eine immer wichtigere Rolle für Simulationen, Vorbereitung und Training. Daher ist ein Entwicklungs- und digitales Produktionsstudio vorgesehen.

## MONDOBERFLÄCHE

Die Regolithfläche ist das Kernstück von LUNA. Das basaltische Simulat EAC-1a aus der Region bildet den Mondstaub nach.

## ROBOTERARM

Der Roboter wird von einer künstlichen Intelligenz gesteuert. Er unterstützt bei Aufgaben, die während des Anbauprozesses anfallen.

## AUFHÄNGUNGSSYSTEM

Astronautinnen und Astronauten in Welt- raumanzügen werden so entlastet, dass sie sich wie auf der echten Mond- oberfläche fortbewegen können.

## PFLANZEN

Hier werden „raumfahrt- taugliche“ Pflanzen ange- baut. Dazu gehören Kohlrabi, Kräuter und Paprika. Erstmals sollen auch Erd- beeren gezüchtet werden.

## HABITAT

Prototyp für eine Mondbasis

## HAUPTINGANG

## VORBEREITUNGSRÄUME

Eine Werkstatt, Experimentvorbereitungs- räume, ein Gaslabor und ein Mondstaublabor sind ebenfalls Teil der Anlage.

## BESUCHSBEREICH

LUNA soll begeistern: Hier bekommt man einen direkten Blick auf die Mondoberfläche und kann einen echten Mond- stein bewundern.

## DEEP FLOOR AREA

Hier ist das Regolith drei Meter tief – mit unter- schiedlichen Schrägen für Probenaufnahmen, Boh- rungen und die Bearbei- tung des Mondsands oder zur Kratersimulation.

## ROVER

Die Halle soll nicht nur für astronautische Aktivitäten, sondern auch für robotische Tests und Validierun- gen genutzt werden.

## LANDER

An einer Nachbildung des zukünftigen Argo- naut-Landers können die Handhabung und Interaktion auf dem Mond getestet werden.

## SONNENSIMULATOR

Auch die sehr speziellen Lichtverhältnisse auf dem Mond können nachge- stellt werden.

## EDEN LUNA

Das Gewächshaus ist die Weiterentwicklung von EDEN ISS.

Über 50 Jahre ist es her, dass ein Mensch den Mond betreten hat. Die Rückkehr zum Erdrabanten ist ein erklärtes Ziel der internationalen Raumfahrt. Die Mondanaloganlage LUNA soll Astronautinnen und Astronauten auf eine solche Mission vorbereiten. Hier können sie gemeinsam mit den entsprechenden Teams in den Kontrollzentren für ihren Einsatz auf der Mondoberfläche trainieren. Auch Roboter können unter realistischen Bedingungen erprobt werden. Darüber hinaus steht LUNA der universitären Forschung ebenso

offen wie der Industrie, Start-ups sowie kleineren und mittelständischen Unternehmen. Die 700 Quadratmeter große und neun Meter hohe Halle steht auf dem Gelände des DLR in Köln-Porz. LUNA ist ein gemeinsames Projekt des DLR und der Europäischen Weltraumorganisation ESA. Der Betrieb der Halle liegt bei dem Microgravity User Support Center (MUSC), dem Europäischen Astronautenzentrum (EAC) und dem Deutschen Raumfahrtkontrollzentrum (GSOC) in Oberpfaffenhofen.





# KLEINE VENUS IN DER MITTE DES ATLANTIKS

Island-Expedition hilft bei der Vorbereitung auf Missionen zur Erdnachbarin

von Ulrich Köhler

**E**ine Weltraummission zur Venus zu simulieren, ist nicht einfach, aber bis zu einem gewissen Grad möglich. Zwar herrschen nirgends auf der Erdoberfläche dieselben Bedingungen – Temperaturen, bei denen Blei schmilzt, eine giftige Atmosphäre mit dichten Schwefelsäurewolken oder ein Luftdruck, neunzigmal so hoch wie bei uns –, eine Insel im Nordatlantik aber kommt vor allem aufgrund ihres vulkanischen Ursprungs der Venus recht nahe: Island. Sie war das Ziel einer Expedition zur Vorbereitung der NASA-Mission VERITAS zur Venus.

Wie oft hat man diese Phrase schon gehört: „Island – Insel aus Feuer und Eis“? Das Klischee stimmt natürlich, jedenfalls zum Teil. Das Eiland im Nordatlantik beherbergt die größten Gletscher in Europa und ist eine der vulkanisch aktivsten Regionen auf der Welt. Letzten Sommer, im Dezember 2023 und nochmal nach der Jahreswende kam es wieder zu spektakulären Vulkanausbrüchen nahe der Hauptstadt Reykjavik. Für die Feldkampagne zu einigen der jüngsten erstarrten Lavaströme auf Island, an der das DLR in vielfältiger Form mitwirkte, war dies ein wahrer Glücksfall. Die Eruption des kleinen Vulkans mit dem zungenbrecherischen Namen Litli-Hrútur bot nicht nur erstklassiges Anschauungsmaterial, sondern erlaubte auch Messungen mit Radar aus der Luft sowie multispektrale Bilder von teilweise noch über 400 Grad Celsius heißer Lava am Boden. Das DLR-Team führte einige Messungen sogar nachts durch, um den möglichen Einfluss von Sonnenlicht zu vermeiden.

Schwefelhaltige Dämpfe färben das schwarzgraue Vulkangestein orange. Rund 60 Kilogramm vulkanische Proben wurden für Analysen ins Planetenspektroskopie-Labor des DLR in Berlin gebracht.



Links ein erstarrter Lavastrom der Fagradalsfjall-Eruption von 2021, oben die Sprengisandur-Hochlandebene

Ziel der vom Jet Propulsion Laboratory im kalifornischen Pasadena geleiteten Expedition war es, Experimente für die Venusmission VERITAS der NASA zu optimieren. Sowohl VERITAS als auch die ESA-Mission EnVision werden nach 2030 zu unserem Nachbarplaneten starten. Dort sollen sie aus der Umlaufbahn Daten liefern, um die vielen Fragen zu beantworten, die sich in den letzten drei Jahrzehnten in der Venusforschung regelrecht angestaut haben: Warum hat sich der innere Nachbarplanet der Erde, der bei der Entstehung beider Körper stofflich vergleichbar war, so anders entwickelt? Sind die heutigen Unterschiede nur auf die 50 Millionen Kilometer zurückzuführen, welche die Venus näher als die Erde um die Sonne kreist, weshalb sie doppelt so viele Watt Sonnenenergie pro Quadratmeter erhält? Die wesentliche Ursache für den irrwitzigen Treibhauseffekt auf der Venus ist die fast nur aus Kohlendioxid bestehende Atmosphäre. Er sorgt dafür, dass Oberflächentemperaturen von konstant über 460 Grad Celsius die Existenz von Wasser oder gar Leben heute unmöglich machen.

## Vor allen Blicken verborgen

In der dichten Atmosphäre aus Kohlendioxid verhindern dicke Wolken aus Schwefelsäure jeden Blick mit Teleskopen und Kameras auf die Oberfläche. Radarwellen, die von Raumsonden aus der Umlaufbahn zur Oberfläche gepulst und dort reflektiert werden, können allerdings die Rauigkeit und sogar die Topografie der Landschaft erfassen.

Zumindest in ihrer jüngeren Vergangenheit hatte die Venus keine Plattentektonik. Auf der Erde entsteht diese durch das Umwälzen riesiger teilgeschmolzener Gesteinszellen im Erdmantel, das zu Vulkanismus führt. Durch diesen wird die im Inneren beim radioaktiven Zerfall von Elementen erzeugte Hitze „kontrolliert“ abgeleitet. Unter der Kruste der Venus jedoch staute sich die Hitze wie in einem Dampfkochtopf ohne Ventil so lange an, bis der „Kessel“ explodierte und sich in Form einer globalen vulkanischen Katastrophe Bahn brach.

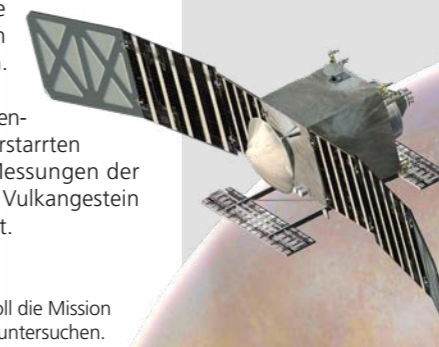
Welche Formen von Vulkanismus das waren, welche Zusammensetzung die Laven hatten und aus welchen Mineralen die erstarrten Gesteine bestehen, das ist kaum bekannt. Fotos und Messungen der Venera-Landesonden aus sowjetischer Zeit deuten auf das Vulkangestein Basalt hin, das auf allen erdähnlichen Planeten vorkommt.



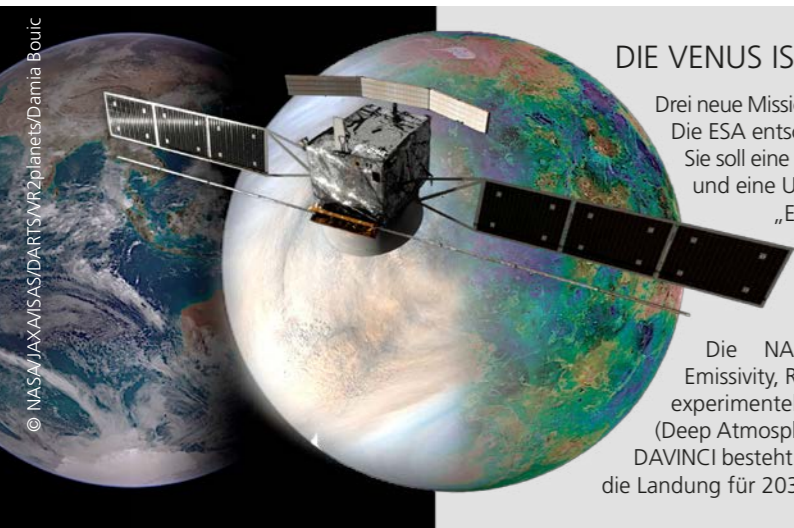
Schwer beladen geht es über Stock und (vulkanischen) Stein.

## DLR-BETEILIGUNGEN

Das DLR ist an den Missionen EnVision (ESA) und VERITAS (NASA) wissenschaftlich und mit Experimentbeiträgen beteiligt. Für beide Missionen wird am DLR-Institut für Planetenforschung (wissenschaftliche Leitung) und am DLR-Institut für Optische Sensorsysteme (Leitung Instrumentenentwicklung) gemeinsam je ein Spektrometer, inklusive des bei der Expedition verwendeten VEMulator für die Wellenlängen des nahen Infrarotbereichs entwickelt. Sie werden über die Wärmeabstrahlung der Gesteine am Boden der Venus erstmals deren mineralogische Bestandteile global kartieren. Dafür wird der multispektrale Venus Emissivity Mapper (VEM) entwickelt. Idealerweise wird der VEM mit dem hochauflösenden Radarexperiment kombiniert, damit zur Mineralogie auch genaue topografische Informationen gesammelt werden können. Das DLR-Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme beteiligte sich an der Island-Kampagne mit seinem F-SAR-Radarsystem an Bord einer Dornier 228 der DLR-Einrichtung Flugexperimente. Außerdem steuert das Institut Algorithmen zum VERITAS-Radarexperiment bei.



Dreieinhalb Jahre soll die Mission VERITAS die Venus untersuchen.



## DIE VENUS IST WIEDER EN VOGUE

Drei neue Missionen werden zu Beginn des nächsten Jahrzehnts zur Venus gesandt: Die ESA entschied sich in Partnerschaft mit der NASA für die Mission EnVision. Sie soll eine Bestandsaufnahme der Venus vom Kern bis zur oberen Atmosphäre und eine Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen „Etagen“ vornehmen. Ziel ist ein besseres Verständnis von Entstehung, Entwicklung, Aktivität und Wettergeschehen. Auch soll EnVision untersuchen, ob es auf der Venus einmal für längere Zeit Wasser und vielleicht sogar Voraussetzungen für Leben gegeben hat.

Die NASA hat zwei Venussonden in Planung: den Orbiter VERITAS (Venus Emissivity, Radio Science, InSAR, Topography, And Spectroscopy), der sich im experimentellen Instrumentarium mit EnVision ergänzen wird, und DAVINCI (Deep Atmosphere Venus Investigation of Noble gases, Chemistry and Imaging). DAVINCI besteht aus einem Orbiter und einem Landemodul. Der Start ist für 2029, die Landung für 2031 vorgesehen.

Besonders interessant sind aber die Minerale in den Gesteinen, die die Frage beantworten könnten, ob zu früheren Zeiten Wasser auf der Venus tatsächlich vorhanden war und ihre Entwicklung beeinflusst hat.

### Wasser auf der Venus?

In der Venusforschung gilt es inzwischen als nahezu ausgemacht, dass in der Frühzeit des Planeten über lange Zeiträume Wasser auf der Oberfläche vorhanden war. Da stellt sich natürlich sofort die Frage: Hätte die Venus auch einmal Leben beherbergen können? Ob dies mit den neuen Missionen beantwortet werden kann, lässt sich noch nicht abschätzen. Zunächst geht es darum, ein tieferes Verständnis des Planeten zu erlangen. Neue, bessere Technik wird bei den geplanten Raumsonden zum Einsatz kommen – die zuvor getestet werden muss. Hier kam Island als „kleine Venus“ ins Spiel, weil die jüngsten Lavaströme noch nicht verwittert sind und vor allem noch keinerlei Vegetation tragen.

Knapp zwanzig VERITAS-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler aus den USA, Italien und Deutschland nahmen sich zwei Vulkangebiete zum Ziel: zum einen den erstarrten, fast hundert Quadratkilometer großen Lavastrom der Holuhraun-Eruption von 2014 in Zentralisland, nahe dem berühmten Askja-Vulkankegel, und zum anderen die noch heiße

Eruption des Litli-Hrútur auf der Reykjanes-Halbinsel an der Südküste sowie einige der Lavaströme von Vulkanen in der Umgebung, die 2021 und 2022 ausgebrochen waren.

### Instrumententraining im Gelände

Das DLR war mit einem Fünferteam am Boden und mit seinem Forschungsflugzeug Dornier 228-212 D-CFFU aus Oberpfaffenhofen vertreten. In der Maschine war das – in seiner Qualität einmalige – F-SAR-Radarsystem des DLR eingebaut, mit dem in rund 6.000 Meter Flughöhe über den Lavaströmen interferometrische und polarimetrische Radarmessungen vorgenommen wurden. Sie ähneln denen, die bei VERITAS und EnVision aus der Venusumlaufbahn kommen werden. Mit dieser Technik lassen sich unabhängig vom Wetter und sogar bei Nacht hochaufgelöste Radar-„Bilder“ erzeugen, was für die Erfassung der Venusoberfläche Gold wert ist.

Während die Do 228-212 präzise Radarmessungen von den Hohlraun- und Litli-Hrútur-Lavaströmen entlang definierter Routen ausführte, nahm die Mannschaft am Boden gleichzeitig Lasermessungen zur Erstellung topografischer Profile auf den Lavaströmen und den Sandflächen daneben vor. Die Datensätze werden später verglichen und miteinander in Einklang gebracht.

Geht es bei Radar um Topografie, Struktur und Rauigkeit von Lavaströmen, liegt bei der Spektroskopie der Fokus auf der Zusammensetzung von Vulkangestein. Dafür werden die Emissionen noch heißer oder schon erkalteter Laven gemessen. Das DLR nutzte in Island dazu einen Venus Emissivity Mapper Emulator, kurz VEMulator. Die



Links: Dr. Solmaz Adeli und Dr. Stephen Garland richten die Infrarotkamera Venus Emissivity Mapper Emulator für Multispektralaufnahmen ein. Oben: Den Weg ins Landesinnere dürfen nur große Geländewagen einschlagen. Zum Glück führten die Flüsse im August 2023 nur wenig Wasser.



Moderne Falknerei? Drohnen sind heute eine unersetzliche Hilfe.

Multispektralkamera misst in sechs den atmosphärischen Fenstern der Venusatmosphäre nachempfundenen, gefilterten Wellenlängen. Das „Bodensegment“ der Feldkampagne musste dazu manchmal im wahrsten Sinne des Wortes extrem harte Arbeitsbedingungen in Kauf nehmen, denn einige der Lavaströme bestehen aus Gestein mit zum Teil messerscharfen Zacken und Kanten. Hierbei erhielt es Unterstützung aus der Luft in Form von Drohnen, die millimetergenaue Bilder aus wenigen Metern Flughöhe lieferten. Das DLR-Vulkanteam nahm an den VEMulator-Messpunkten 60 Kilogramm Proben. Diese werden



Pilot Thomas van Marwick von der DLR-Einrichtung Flugexperimente flog die Do 228 D-CFFU mit dem F-SAR-Radargerät an Bord.

nun im Berliner Planetenspektroskopie-Labor analysiert. Die Ergebnisse dienen der Eichung der Experimente, die das DLR für die beiden Missionen VERITAS (NASA) und EnVision (ESA) entwickelt hat. Sie sollen die globale Verteilung der Minerale unseres etwas überhitzten Nachbarplaneten kartieren.

Ulrich Köhler ist seit 1990 als Planetengeologe im DLR-Institut für Planetenforschung. Seinen ersten „Kontakt“ mit der Venus hatte er gleich im Februar des Jahres, als die NASA-Mission Galileo dort Schwung für ihre Reise zum Jupiter holte.



### DREI FRAGEN AN SOLMAZ ADELI

Die Wissenschaftlerin vom DLR-Institut für Planetenforschung leitet das Team, das während der Island-Kampagne vulkanische Oberflächen spektroskopisch untersucht.

#### Wie ging es Dir während der Kampagne?

■ Einerseits war es anstrengend, andererseits wollte ich so viele Messungen wie möglich durchführen. Es war wunderbar, Zeit in dieser außergewöhnlichen Landschaft zu verbringen, aber ich habe mich auch schon sehr darauf gefreut, die Daten an meinem Computer zu analysieren.

#### Was war die größte Herausforderung?

■ Das Wetter! Es war sehr unbeständig. Wenn es regnet, funktionieren die Instrumente nicht und wenn es sehr kalt und windig ist, fällt uns Menschen das Arbeiten schwer. Insgesamt sind wir aber gut zurechtgekommen.

#### Was sind die nächsten Schritte?

■ Jetzt kümmern wir uns um die Datenanalyse. Wir schauen uns die Spektralmessungen an und untersuchen die Proben, die wir auf Island genommen haben, in unserem Planetenspektroskopie-Labor. Im letzten Schritt können wir die Daten dann mit der Venus verknüpfen.



### DREI FRAGEN AN DANIEL GESSWEIN

Der Radartechniker vom DLR-Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme ist für den Betrieb des F-SAR-Radarsystems an Bord der Do 228-212 eingesetzt.

#### Wie kann man sich eine solche Mission vorstellen?

■ Wir vom Flugteam waren in den zwei Wochen jeden Tag unterwegs, quer über die Insel. Meist trafen wir uns morgens zwischen 7 und 8 Uhr am Flughafen Keflavik. Dort wurden die letzten Flugvorbereitungen getroffen. Ein Einsatz über dem Gebiet Holuhraun dauerte insgesamt etwa acht Stunden. Gegen 17 Uhr waren wir zurück, anschließend De-Briefing. Sehr volle und intensive Tage also.

#### Was genau machst Du während des Fluges?

■ Ich steuere das F-SAR-Radarsystem. Dazu sitze ich in der Flugzeugkabine vorne am Steuerrechner. Hier kann ich alle für die Radarmessungen notwendigen Einstellungen vornehmen. Die generierten Daten können die Kolleginnen und Kollegen am Boden dann weiterverarbeiten.

#### Und was ist das für ein Gefühl, im Flieger zu sitzen?

■ Eine Belohnung für die ganze Arbeit – sowohl bei der Hardware-Entwicklung als auch bei der Zulassung. Das kann viel Zeit und Nerven kosten. Ich freue mich sehr, wenn ich sehe, dass wir mit unseren Daten die Forschung ein Stück weiterbringen konnten.





# DAS BESTE SIGNAL

Eine Website zeigt die Leistungen verschiedener Satellitennavigationsysteme

von Julia Brase und Ilinca Ioanid

Satellitennavigation, ein unverzichtbares Instrument unseres Alltags, zum Beispiel in den Bereichen Mobilität, Landwirtschaft oder Energieversorgung

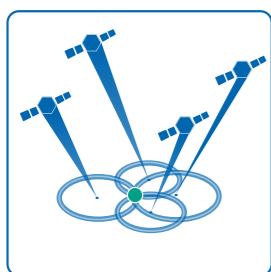
In unserer vernetzten Welt ist Satellitennavigation ein unverzichtbares Instrument unseres Alltags. Das reicht von der Suche nach dem nächstgelegenen Café bis hin zum Einsatz von Düngemitteln in der Landwirtschaft. Mehrere Länder besitzen ein eigenes globales Satellitennavigationsystem, ein sogenanntes GNSS – Global Navigation Satellite System. DLR-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler untersuchen, welche Faktoren die Leistungsfähigkeit solcher Systeme beeinflussen. Dazu haben sie Methoden entwickelt, mit deren Hilfe sich die Performance der vier weltweit verfügbaren GNSS-Systeme – Galileo (EU), GPS (USA), GLONASS (Russland) und BeiDou (China) – beobachten lässt. Analysen und Ergebnisse sind im Web für alle Interessierten zugänglich.

Jedes GNSS nutzt ein Netz von Satelliten, die die Erde auf festgelegten Bahnen umkreisen. Sie senden kontinuierlich Signale mit Informationen über ihre Position und die aktuelle Uhrzeit aus. GNSS-Empfänger,

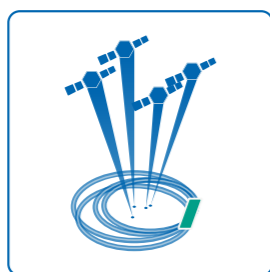
beispielsweise in professionellen geodätischen Messinstrumenten, Smartphones oder Navis im Auto, sammeln die Daten der Satelliten mit freiem Signalweg. Aus diesen Informationen sowie aus der Laufzeit der Signale berechnen sie die eigene Position sowie Geschwindigkeit und die Zeit. Um die eigene Position auf der Erde bestimmen zu können, benötigt ein Empfänger die Daten von mindestens vier Satelliten – je mehr es sind, desto stabiler und genauer wird die Positionsbestimmung.

## Signal ist nicht gleich Signal

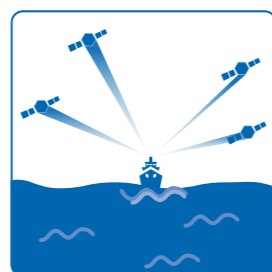
Jedes GNSS verwendet eine eigene Satellitenkonstellation, nutzt unterschiedliche Frequenzen und setzt verschiedene Algorithmen zur Signalverarbeitung ein. Folglich unterscheiden sich GPS, GLONASS, Galileo und BeiDou in Genauigkeit, Abdeckung und Robustheit. Dies kann für Endanwenderinnen und -anwender in verschiedenen Regionen und unter verschiedenen Umweltbedingungen erhebliche Auswirkungen haben. Für welche Signale sich die Multi-GNSS-Empfänger entscheiden,



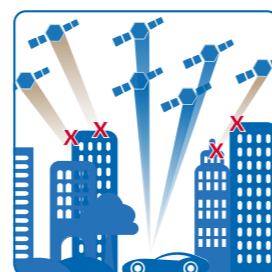
**Hohe Genauigkeit:** Die Satelliten sind weit über den Himmel verteilt. Diese Konstellation hat einen niedrigen DOP-Wert und einen geringen Positionierungsfehler (grüner Punkt).



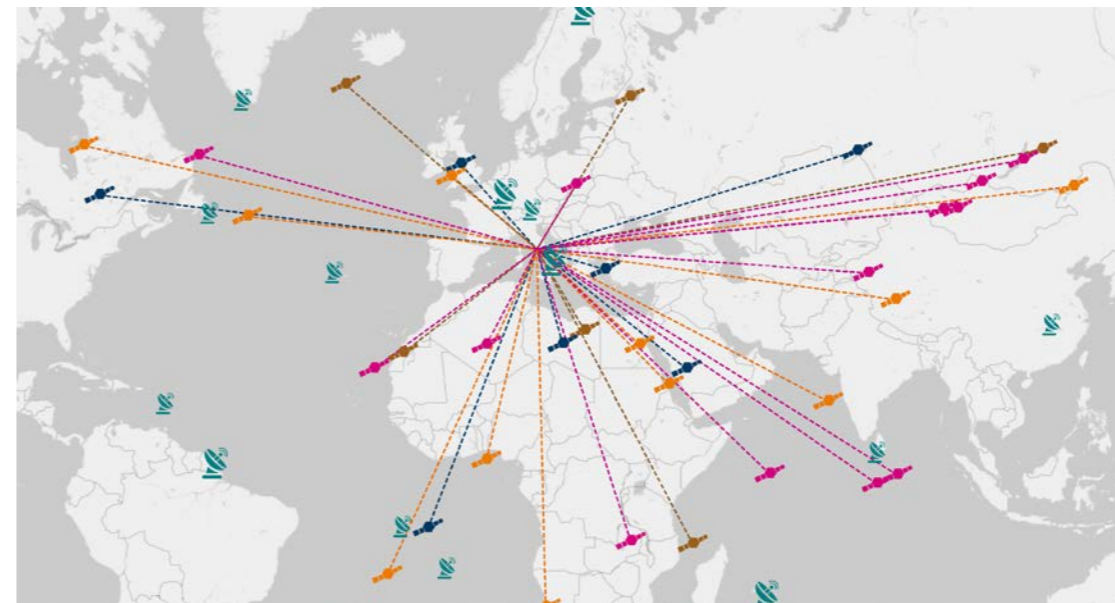
**Niedrige Genauigkeit:** Die Satelliten decken einen kleinen Teil ab. Diese Konstellation hat einen höheren DOP-Wert sowie einen höheren Positionierungsfehler (grüner Balken).



**Hohe Genauigkeit:** Auf offener See können sich die Signale ungehindert verbreiten.



**Niedrige Genauigkeit:** Häuserfronten reflektieren und blockieren die Signale.



Je gleichmäßiger die Satelliten verteilt sind, desto besser ist die Positionsbestimmung an der ausgewählten Station. Die Farben stehen für die vier GNSS-Systeme: Blau für Galileo, Orange für GPS, Braun für GLONASS und Pink für BeiDou.



Die GNSS-Performance-Monitoring-Website: [gnss-monitoring.dlr.de](http://gnss-monitoring.dlr.de)

hängt einerseits vom Standort ab und andererseits von vielen anderen Parametern, die sich auf die Leistung von GNSS-Signalen auswirken. Die Anzahl der für einen Empfänger sichtbaren Satelliten und deren geometrische Anordnung am Himmel haben zum Beispiel einen immensen Einfluss auf die Positionsgenauigkeit. Diese Faktoren werden durch den DOP (Dilution of Precision, zu Deutsch etwa „Verringerung der Genauigkeit“) angegeben. Für den DOP ist wichtig, wie gut die Satelliten des jeweiligen GNSS über den Orbit verteilt sind und in welchem geometrischen Verhältnis zum Empfänger sie sich befinden. Hier gibt es bessere und schlechtere Konstellationen. Außerdem kann das Signal auf der Erde gehemmt werden: So leidet der Empfang in tiefen Häuserschluchten, wenn Gebäude die Signale blockieren oder die Signale von Oberflächen reflektiert werden. Auch die Erdatmosphäre kann erhebliche Signalverzögerungen und -verzerrungen verursachen. Freie Elektronen in der Ionosphäre können die Signale von GNSS-Satelliten ablenken und dadurch verzögern, wenn sie diese Schicht auf ihrem Weg zu einem Empfänger am Boden durchqueren.

Auch die Qualität der Atomuhren der einzelnen Satelliten spielt eine sehr wichtige Rolle: Da die Positionsbestimmung auf der Zeitdifferenz zwischen Senden und Empfangen der Signale basiert, ist diese von zentraler Bedeutung. Die kleinste Ungenauigkeit führt zu einem erheblichen Fehler in der berechneten Position: Ein Uhrfehler von einer Millisekunde bewirkt beispielsweise einen Unterschied von dreihundert Kilometern.

## Eine Website bietet den Überblick ... und noch mehr

Fachleute aus dem Galileo Kompetenzzentrum des DLR entwickelten und betreiben in Kooperation mit Kolleginnen und Kollegen aus den DLR-Instituten für Softwaretechnologie, Kommunikation und Navigation

sowie Solar-Terrestische Physik und der Einrichtung für Raumflugbetrieb und Astronautentraining die GNSS-Performance-Monitoring-Website. Diese dient unter anderem der Analyse, Visualisierung und Auswertung der oben genannten Faktoren. Sie richtet sich an Personen aus den Bereichen Forschung und Industrie, aber auch an Interessierte aus Gesellschaft und Politik.

Die hier einlaufenden Beobachtungs- und Navigationsdaten werden in einer Langzeitdatenbank archiviert. Mit den Daten können die Fachleute Aussagen über die Signal- und Servicequalität aller globalen Navigationssysteme treffen. Außerdem erstellen sie kurz- und langfristige Analysen, ermitteln Trends und ziehen Vergleiche. Damit können die Nutzenden die Genauigkeit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit ihrer Position in verschiedenen Regionen, zu verschiedenen Zeiten und mit unterschiedlichen Navigationssystemen bewerten.

Obwohl die Performance jedes globalen Navigationssystems von den Betreibenden regelmäßig veröffentlicht wird, ist ein direkter Vergleich kaum möglich, denn die Parameter werden unterschiedlich berechnet. Die DLR-Plattform nutzt sowohl eine konsistente Datengrundlage als auch gleiche Berechnungsmethoden und Indikatoren. Damit lassen sich Parallelen zwischen den Systemen ziehen. Ein weiteres Ziel der Website ist es, mithilfe der analysierten Daten zur Weiterentwicklung der GNSS-Systeme beizutragen. Die öffentlichen Datenquellen und die Transparenz der Methoden sollen außerdem weitere Forschung anregen und zum Dialog motivieren. Und nicht zuletzt sollen sie dazu einladen, auf spielerischem Wege das eigene Wissen rund um die Satellitennavigation zu vertiefen.

Ilinca Ioanid, Bereich Kommunikation, und Julia Brase, Bereich System- und Technologieberatung, arbeiten beide für das Galileo Kompetenzzentrum des DLR.



## DAS GALILEO KOMPETENZZENTRUM DES DLR

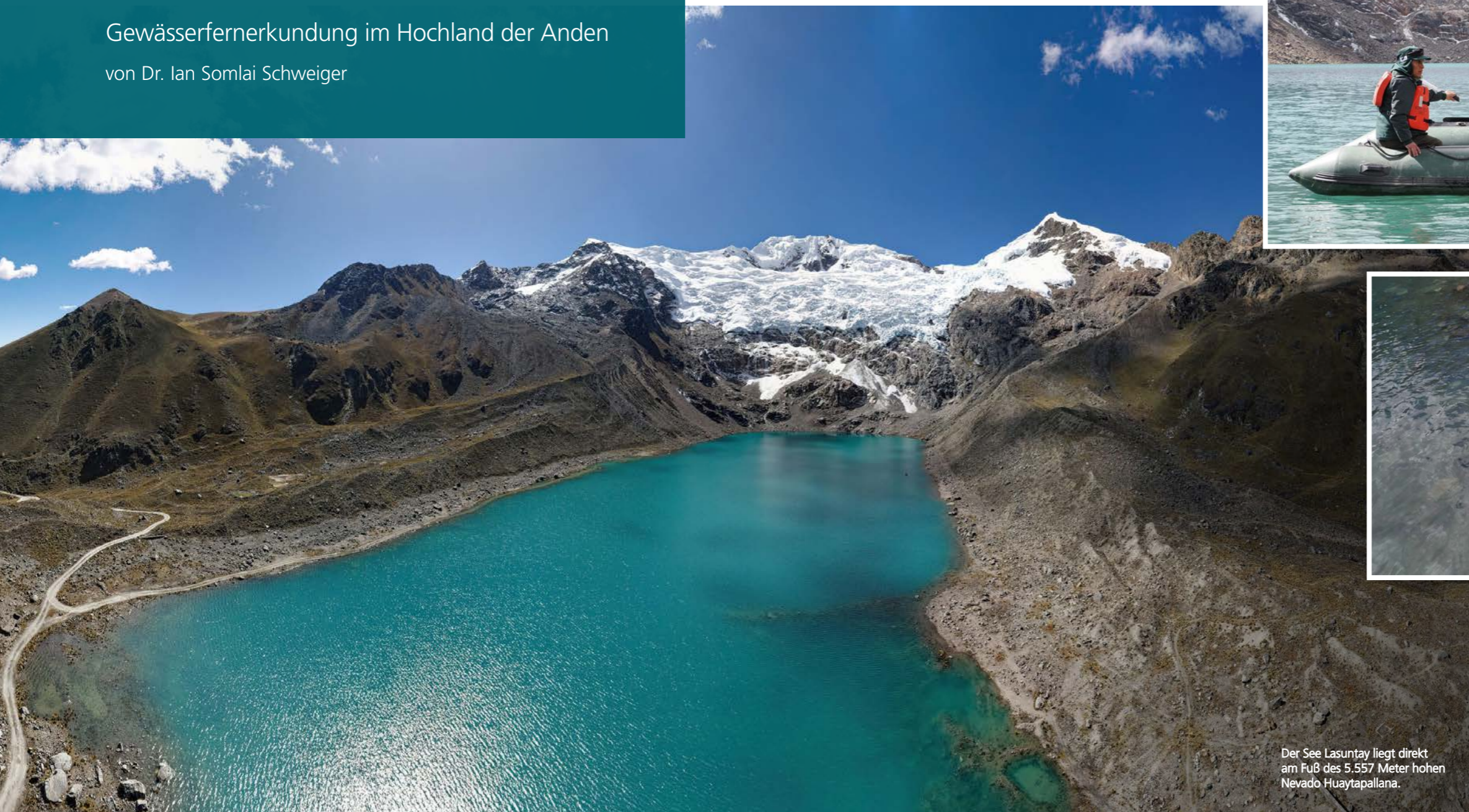
Es wurde 2019 in Oberpfaffenhofen gegründet und unterstützt Europa bei der Bereitstellung der bestmöglichen Navigationstechnologien für Bürgerinnen und Bürger. Daran arbeitet es gemeinsam mit den wissenschaftlichen Instituten und Einrichtungen des DLR und weiteren Forschungsorganisationen und Industrieunternehmen. Die Verwirklichung neuer Technologien und Konzepte für eine spätere mögliche Nutzung oder Vermarktung dieser durch die Industrie ist dabei eines der zentralen Anliegen. Mit seiner Expertise steht es als Ansprechpartner für Politik, Forschung, Industrie, die Europäische Kommission und die Wirtschaft zur Verfügung.

Lukas Greda, GNSS-Performance-Monitoring-Projektleiter, vom Galileo Kompetenzzentrum des DLR präsentiert die GNSS-Performance-Monitoring-Website.

# DEN SATELLITEN EIN STÜCK NÄHER

Gewässerfernerkundung im Hochland der Anden

von Dr. Ian Somlai Schweiger



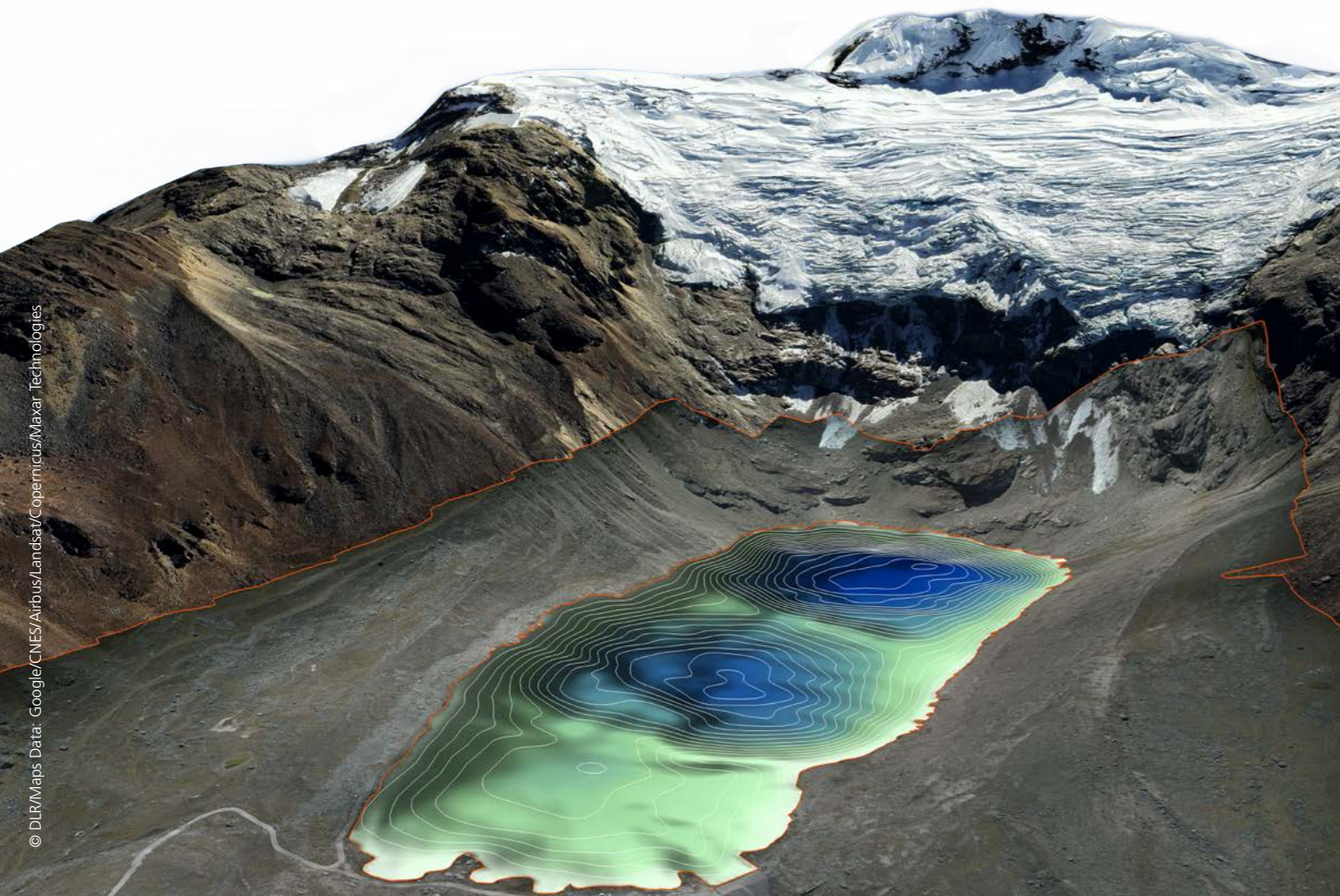
Der See Lasuntay liegt direkt am Fuß des 5.557 Meter hohen Nevado Huaytapallana.

Vom Schlauchboot aus und mit Wathosen im See stehend misst das DLR-Team die Reflexionsspektren vom See Lasuntay. Das autonome Messboot erfasst währenddessen die Wassertiefe.

**P**eru gehört zu den weltweit am stärksten vom Klimawandel betroffenen Ländern. Das hat schwerwiegende Folgen für die Verfügbarkeit von Wasser im ganzen Land. Eine internationale Kooperation zwischen dem DLR und der peruanischen Wasserbehörde unterstützt das Wasserressourcenmanagement durch Gewässerfernerkundung aus dem All. Dazu war ein DLR-Team aus Oberpfaffenhofen im peruanischen Andenhochland unterwegs. Ein Bericht über eine außergewöhnliche Messkampagne.

Die lange Reise von München über Lima führt endlich nach Huancayo. Die größte Stadt der peruanischen Anden liegt 3.250 Meter über dem Meeresspiegel. Hier hat die nationale Wasserbehörde ANA (Autoridad Nacional del Agua) ihr regionales Hauptquartier für das Einzugsgebiet des Río Mantaro. Dieser Amazonas-Nebenfluss spielt eine zentrale Rolle in der Landwirtschaft für die Lebensmittelversorgung der Hauptstadt und in der Stromerzeugung für das ganze Land.

Huancayo ist das erste Basislager für das fünfköpfige Team der Abteilung Experimentelle Verfahren des DLR-Instituts für Methodik der Fernerkundung. Die Arbeitsgruppe unterstützt die ANA seit 2022 im Rahmen des Projekts ProGIRH „Multisektorales Wasserressourcenmanagement im Einzugsgebiet des Mantaroflusses“. Die Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) fördert dabei den Transfer von Know-how im Bereich der satellitengestützten Gewässerfernerkundung, um sowohl Wasserqualität als auch -quantität in dieser Region zu überwachen. Am Ende des Projekts soll die ANA selbstständig Satellitenbilder auswerten können, um abgelegene, schwer erreichbare Seen häufiger beobachten und bewerten zu können. Dazu führte das DLR-Team im Rahmen des Forschungsprojekts zahlreiche Workshops durch – online, in Peru und in Deutschland. Teil des Projekts ist auch diese zweiwöchige Messkampagne mitten in den Anden. Dort untersucht das Team die drei Seen Lasuntay, Huacracocha und Junín. Anhand der gewonnenen Datensätze passen die Forschenden ihre physikalischen Modelle und die Software zur Datenauswertung an die regionalen Eigenschaften der Seen an.



Aus überlappten Drohnenbildern entsteht ein hochauflösendes und georeferenziertes Mosaikbild des ganzen Sees und seiner Umgebung (orange Linien). Die Vermessung der Topografie des Gewässerbodens – die Bathymetrie – erfolgt anhand der Messungen der Wassertiefe und ist durch die weißen Konturlinien im See dargestellt.

### Messungen auf, über und im Wasser

Die über 4.500 Meter hoch gelegenen Seen Lasuntay und Huacracocha dienen der Trinkwasserversorgung der fünfhunderttausend Einwohner von Huancayo. Man erreicht sie nach ungefähr zwei Autostunden und 1.300 Höhenmetern. Schnell verschwindet der Verkehrslärm der Stadt, genauso wie der Teerbelag der Bergstraße entlang des schmalen Tals des Río Shullcas. Eine Baustelle am Ende dieser einzigen Route schränkt die staubige Fahrt zum See und zurück auf nur wenige enge Zeitfenster am Tag ein. Immerhin, nach vielen Monaten Vorbereitungsarbeit, unzähligen Genehmigungen diverser Behörden und der

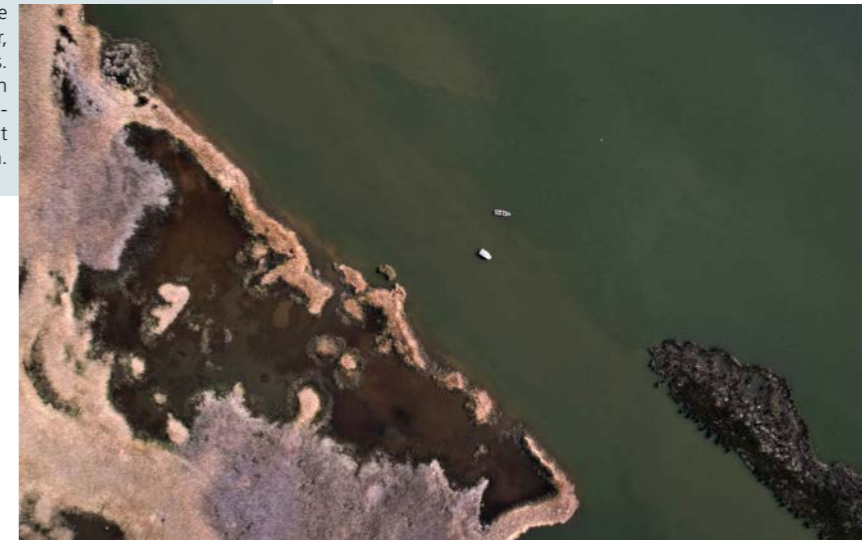
tatkräftigen Unterstützung der peruanischen Projektbeteiligten, erreicht der Pick-up-Konvoi das Ufer der Laguna Lasuntay. Endlich stehen alle vor der imposanten Aussicht auf den Gletscher des 5.557 Meter hohen Nevado Huaytapallana. Begleitet vom Donnern sporadischer Eislawinen – klimawandelbedingt bis zu fünfmal am Tag – und nach der traditionellen Opfergabe „Pagapu al Agua“ können die Feldmessungen nun endlich beginnen.

An mehreren Tagen hintereinander erfasst das Team Reflexionsspektren der Wasseroberfläche von Lasuntay und Huacracocha, an tiefen Stellen von einem Schlauchboot aus und in den seichteren Bereichen direkt



Auch am Juninsee herrscht die Tradition des „Pagapu al Agua“. Unter der Führung des Präsidenten der Ortschaft werden Schnapsflaschen in den See geleert, eine für jeden Gast des DLR-Teams. Zuvor flüstert jeder eine geheime Botschaft in die Flasche hinein. Danach werden Lebensmittel und Kokablätter ins Wasser geworfen und Danksprüche auf Quechua zu den umliegenden Bergen gerufen. Manche davon ragen über 6.000 Meter hinauf.

Die Drohnenaufnahmen zeigen die vielfältige Beschaffenheit von Wasser, Untergrund und Ufer des Juninsees. Anhand dieser Informationen lassen sich geeignete Stellen für die Messungen identifizieren, die das Team mit dem Boot anfahren kann.



im See stehend mit Wathosen. Dazu nutzen die Forschenden ein tragbares Spektrometer – das technische Herz der Feldmessungen. Damit sammeln sie auch Reflexionsspektren von Sedimenten, Steinen und Pflanzen des Seeuntergrunds und des Ufers. Zeitgleich fährt ein kleines, eigenentwickeltes, autonomes Messboot Transekten ab und misst mit einem Echolot die Wassertiefe. Aus der Luft kartografiert eine für diese Höhe geeignete Drohne mit hunderten von Bildern den See und seine Umgebung. Zum Messprogramm gehört außerdem die Entnahme von Wasserproben, die dann im Labor analysiert werden.

### Zukünftig helfen Satelliten bei der Bestimmung der Wasserqualität

Die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe Chlorophyll, Schwebstoffe und Gelbstoffe bestimmen die optischen Eigenschaften eines Gewässers. Die Forschenden ermitteln sie mithilfe der vor Ort gemessenen Reflexionsspektren, genauso wie die dominierende Phytoplanktongruppe. Diese Größen dienen als Indikator für die Wasserqualität und ergänzen die biochemischen Wasserprofile. Diese erstellt die ANA ein bis zwei Mal im Jahr anhand von Wasserproben, die im Labor analysiert werden. Auf Basis der Messungen wird das DLR-Team seine Auswertungsalgorithmen an die regionalen Gegebenheiten anpassen. Damit kann man diese Parameter zukünftig aus Satellitenaufnahmen von

Seen dieser Region ableiten. Der große Vorteil: Künftig können mittels Satellitenaufnahmen Aussagen über den Zustand der Seen getroffen werden, ohne dass jedes Mal ein Team vor Ort Messungen durchführen muss. Und zwar häufiger, unaufwändiger, weniger kostspielig und vor allem nicht nur für eine Handvoll Messpunkte, sondern über die gesamte Seefläche.

Die Aktivitäten in Huancayo schließt das Team mit einem Vortrag ab. Hier werden der aktuelle Fortschritt und die ersten vorläufigen Ergebnisse auch mit den Behörden aus Lima diskutiert. Vor allem die vollständige bathymetrische Kartierung der Laguna Lasuntay – ein Novum – sorgt für Begeisterung. Damit kann man nicht nur die aus Satellitenbildern abgeleitete Wassertiefe validieren, sondern auch das Volumen des Sees und so die Verfügbarkeit des knappen Trinkwassers für Huancayo bestimmen, um die Versorgung der Bevölkerung besser planen zu können.



Der Juninsee oder Lago Chinchaycocha steht zu großen Teilen unter Naturschutz und ist ein Vogelparadies. Hier leben einige vom Aussterben bedrohte endemische Arten.



Mit einem Greifer nimmt Ian Somlai Schweiger Proben vom Boden des Lago Chinchaycocha.

### Unterwegs auf dem zweitgrößten See Perus

Nach der ersten Kampagnenwoche geht die Reise weiter zum Juninsee oder Lago Chinchaycocha, wie ihn die einheimische Bevölkerung nennt. Das DLR-Team hat sich mittlerweile an die Höhe akklimatisiert und die fünfstündige Autofahrt durch 175 Kilometer bergige Landschaft ist eine gute Abwechslung zum dicht geschmiedeten Messplan. Die Forschenden starten die Beprobung vom kleinen Dorf San Pedro de Pari aus. Hier stehen zwei Boote mit erfahrenen Bootsführern zur Verfügung. Außerdem unterstützen die Bewohnerinnen und Bewohner die geplanten Messaktivitäten. Das ist aufgrund jahrelanger Konflikte zwischen Gemeinden und Autoritäten nicht überall der Fall. Grund dafür sind die Aktivitäten der hier ansässigen Bergbau-Industrie, die den See mit ihren Abwässern seit Jahrzehnten stark verseucht. Zudem hebt die in den 1930er Jahren gebaute Talsperre Upamayo am Ursprung des Río Mantaro den Wasserspiegel und verursacht immer wieder Überflutungen der weit ausgedehnten flachen Uferbereiche. Dadurch erleidet die klein dimensionierte lokale Viehhaltung immer wieder erhebliche Verluste und auch das empfindliche Ökosystem, das früher ein Vogelparadies war, wird stark in Mitleidenschaft gezogen.

Wetterbedingt startet der Arbeitstag sehr früh. Die weidenden Lamas und Alpakas, die auch hier überall leben, sind bei Tagesanbruch in der frostigen, nebligen Landschaft versteckt. Der zweitgrößte See Perus liegt auf 4.085 Meter Höhe und erstreckt sich über etwa ein Drittel der Fläche des Bodensees: Vom Ufer bis zu einem Messpunkt kann es bis zu zwei Stunden dauern. Spätestens gegen Mittag, wenn es windig und unbeständig wird, muss das Team das Wasser verlassen.

Zur Sicherheit fährt ein zweites Boot mit, denn es passiert nicht selten, dass sich eine Schiffsschraube im seichten Untergrund verfangt – einer Mischung aus Wasserpflanzen, Schlick und Schlamm – oder dass einer der alten Motoren ausfällt.

Aufgrund der Größe des Sees unterscheiden sich die Messziele hier von denen der kleineren Seen bei Huancayo. Eine komplette bathymetrische Kartierung mit dem kleinen Messboot ist unvorstellbar. Stattdessen fährt das Team repräsentative Transekten ab. Mit den Messdaten können zukünftig genauere Karten auf Basis von Satellitendaten erstellt werden. Gleichzeitig erfassen die Forschenden eine große Vielfalt von Reflexionsspektren mit dem Feldspektrometer: nicht nur an der Wasseroberfläche in Tief- und Flachwasserbereichen des Sees, sondern auch an verschiedenen Stellen der Gewässersohle und des Uferbereichs. Auch hier bewährt sich die Drohne: Mit ihren Bildern lassen sich geeignete Messstellen wesentlich leichter finden als vom Boot aus. Das sind beispielweise Bereiche mit Makrophytenbewuchs oder Schwebstoffahnen. Eine Unterwasserkamera dokumentiert zusätzlich den Untergrund für die spätere Bewertung der Ergebnisse.

Damit die Wasserparameter später möglichst genau aus Satellitendaten abgeleitet werden können, sollen die Vor-Ort-Messungen mit Überflügen von multi- oder hyperspektralen Satelliten wie Sentinel-2, Landsat-9 oder EnMAP synchronisiert werden. Dazu muss der Himmel allerdings wolkenlos sein. Das ist leider nicht immer der Fall. Zusätzlich finden ausgerechnet an dem einzigen Tag, an dem diese drei Satelliten innerhalb einer Stunde den Juninsee überfliegen, Feierlichkeiten zu Ehren des Schutzpatrons von San Pedro de Pari statt und es stehen keine Bootsfahrer zur Verfügung.



© DLR

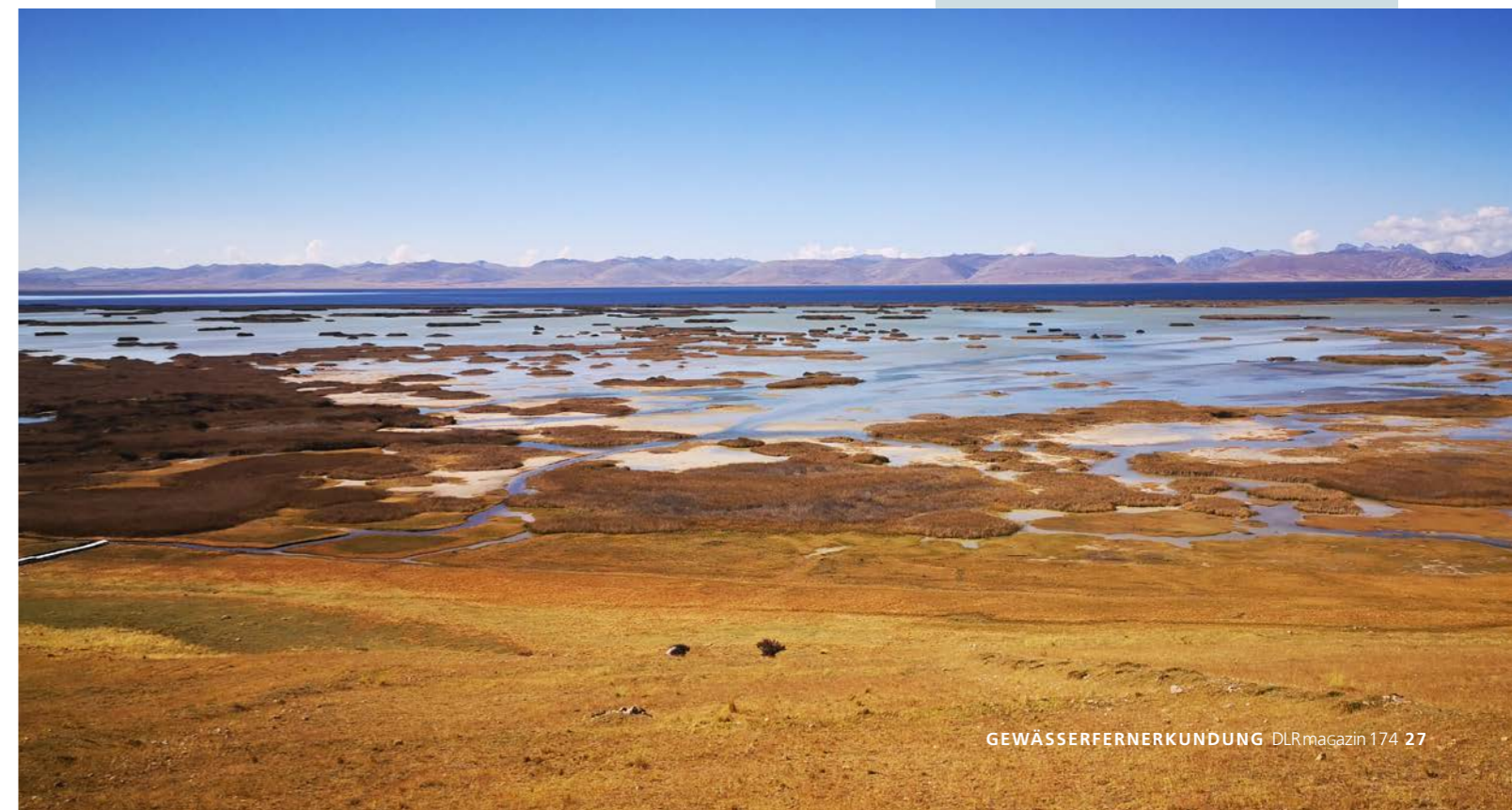
Das Team misst die Wassertiefe und sammelt Sedimentproben aus dem Boot heraus, um diese mit dem Spektrometer zu analysieren. Außerdem dokumentiert eine Unterwasserkamera die Untergrundbeschaffenheit des Sees.



Nichtsdestoweniger liegt am Ende der zweiwöchigen Kampagne ein wertvoller Datensatz vor: insgesamt mehr als 90 Reflexionsspektren, über 40 Wasserproben, viele Wassertiefenprofile sowie unzählige Bilder und Videos aus der Luft, über und unter Wasser, inklusive einiger Satellitenaufnahmen. In den folgenden Monaten werden die Forschenden des DLR die Ergebnisse der Datenanalyse mit der ANA diskutieren und sie in einen Leitfaden zusammenfassen. Mit diesem kann die erlernte und geprüfte Methodik selbstständig weiter eingesetzt werden. Und natürlich werden dem Team die Eindrücke dieser einzigartigen Messkampagne im südamerikanischen Hochland noch lange in Erinnerung bleiben.

**Dr. Ian Somlai Schweiger** arbeitet in der Abteilung Experimentelle Verfahren des DLR-Instituts für Methodik der Fernerkundung in Oberpfaffenhofen. Er leitet das Projekt ProGIRH-DLR und koordinierte die Kampagne in Peru.

Der Juninsee besitzt weite Flachwassergebiete, die den mittleren, tiefen Seebereich umranden – eine ansprechende und herausfordernde Mischung für die Gewässerfernerkundung.



# DURCH DIE PYRENÄEN

Spaniens erster Wasserstoffzug auf seiner ersten Fernfahrt. Koordiniert durch das DLR haben Beteiligte aus Industrie und Forschung für den Triebzug gemeinsam einen sogenannten Bi-Mode-Hybridantrieb entwickelt und aufgebaut. Den Strom zum Fahren bezieht der dreiteilige Elektrotriebzug der Baureihe CIVIA des spanischen Eisenbahnunternehmens Renfe entweder aus der Oberleitung oder aus seinem bordeigenen Brennstoffzellen-Batterie-System. Damit ist der Zug auch auf Bahnstrecken ohne Fahrdrabt elektrisch unterwegs – mit Wasserstoff und Batteriestrom. Die Technologie ermöglicht einen klimafreundlichen durchgehenden Bahnverkehr zwischen Stadt und Umland, den bisher Dieselfahrzeuge bedienen. Aktuell wird der Hybrid-Triebzug für weitere Testfahrten auf ausgewählten Strecken in Aragonien vorbereitet.

Der Zug ist Teil des Forschungsprojekts FCH2Rail (Fuel Cell Hybrid Power Pack für Schienenanwendungen). Daran sind neben dem DLR und Renfe sechs weitere Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen beteiligt: der Schienenfahrzeughersteller CAF, Toyota Motor Europe als Lieferant der Brennstoffzellen, der spanische Infrastrukturbetreiber Adif, das spanische Forschungszentrum für Wasserstoff CNH2, der portugiesische Infrastrukturbetreiber Infraestruturas de Portugal sowie Stemann-Technik.

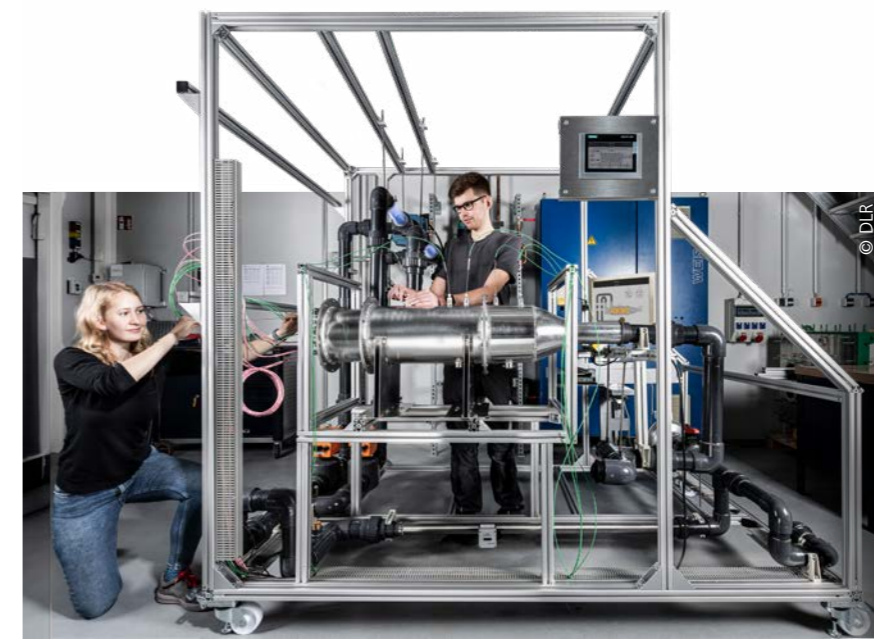


# HEISSE ÖFEN FÜR MEHR REICHWEITE

Neue thermische Speichertechnologien für Elektroautos und -busse

von Dr. Jens Mende

Stadtwerke Münster/Peter Leßmann



Einstellungssache: Im Labor in Stuttgart werden die Sensoren für einen Testlauf des keramischen Wärmespeichers vorbereitet.

## ÜBER DAS PROJEKT LATHE.GO

Die LeitmarktAgentur.NRW und der Europäische Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) fördern das Verbundprojekt LatHe.Go im Auftrag des Landes Nordrhein-Westfalen. Unter Leitung des DLR-Instituts für Materialphysik im Weltraum in Köln sind das DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte in Stuttgart, TLK Energy und Access e.V. an dem Projekt beteiligt.

### Latentwärmespeicher: noch mehr Energie

Im Forschungsprojekt LatHe.Go erprobten Forschende aus den Instituten für Materialphysik im Weltraum und für Fahrzeugkonzepte einen sogenannten Latentwärmespeicher. Dieser hat eine besonders hohe Speicherdichte. Als Speichermedium dient eine Metalllegierung aus Aluminium und Silizium. Diese wird von 150 auf 600 Grad Celsius erhitzt. Dabei schmilzt das Metall. Latent heißt er, weil ein Teil der zugeführten Heizwärme scheinbar verborgen im Lösen der Bindungen der Metallatome steckt. Das wirkt wie ein Zusatzspeicher. So können Latentwärmespeicher mehr Energie aufnehmen als Wärmespeicher ohne Schmelzvorgang. Beim Erstarren der Legierung wird die Wärme wieder frei. Der Vorgang lässt sich beliebig oft wiederholen. „Unser aktueller LatHe.Go-Demonstrator hat eine nutzbare Speicherdichte

von 143 Wattstunden pro Kilogramm, bezogen auf das Gewicht des gesamten Speichersystems. Die Technologie verspricht jedoch Werte von über 200 Wattstunden pro Kilogramm. Ein für Kleinbusse geeignetes System benötigt höchstens zehn Kilowatt Heizleistung“, sagt Werner Kraft vom Institut für Fahrzeugkonzepte, einer der Gruppenleiter im Projekt.

Aktuell arbeitet das LatHe.Go-Team an Methoden, wie sich die Wärme aus dem Speicher ins Fahrzeuginnere bringen lässt. Dies ist mit einem Luftstrom oder über einen Kühlmittelkreislauf möglich. Die Forschenden legen großen Wert darauf, dass das System auch bei Unfällen sicher ist. Sie untersuchen beispielweise, wie sich das flüssige Speichermedium bei einem Leck des Speicherbehälters verhält.

### Von der Simulation bis zum Testfahrzeug

Die Fachleute erproben nun mögliche Einsatzszenarien anhand von Computersimulationen und führen Testläufe in Laboren durch. Dafür nutzen sie Messdaten aus der DLR-Verkehrsforschung. Im nächsten Schritt möchten sie die Speicherkapazitäten weiter optimieren. Dabei untersuchen sie gleichzeitig die Langzeitstabilität. Sie rechnen damit, dass bis 2027 die ersten thermischen Wärmespeicher in Fahrzeuge eingebaut werden können. Dann sollten auch tiefste Temperaturen der Reichweite von Elektrofahrzeugen nichts mehr anhaben können.

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

**Wer möchte es im Auto oder im Bus nicht auch im Winter angenehm warm haben? Doch was, wenn das Heizen von Elektroautos und -bussen fast so viel Strom braucht wie der Motor? Zusammen mit der Industrie hat das DLR keramische und metallische Wärmespeicher als Ersatz für elektrische Heizsysteme getestet. Wie Öfen speichern die Thermosysteme bereits vor der Fahrt die Wärme für unterwegs. Damit soll ein warmer Innenraum nicht mehr auf Kosten der Reichweite gehen.**

Bei strengem Frost benötigt das Heizen von Elektroautos und -bussen so viel Strom, dass sich ihre Reichweite bis auf die Hälfte verringern kann. Omnibusse verbrauchen besonders viel Heizenergie – sowohl durch das ständige Öffnen der Türen an den Haltestellen als auch aufgrund ihrer großen Fensterflächen. Als Alternative zum Einbau einer größeren Fahrzeugbatterie für mehr Heizleistung, sind Wärmespeicher eine vielversprechende Technologie. Am DLR Stuttgart forschen Fachleute aus verschiedenen Instituten an thermischen Speichersystemen, die das Potenzial haben, bei gleicher Größe und Gewicht mehr Energie als Batterien speichern zu können. Zudem sind Wärmespeicher kostengünstiger als Batterien und ihre Materialien lassen sich einfach recyceln.

Wie Batterien lassen sich Wärmespeicher modular und skalierbar aufbauen. Dadurch sind unterschiedliche Leistungsklassen einfach zu realisieren. Vor allem im öffentlichen Personennahverkehr und bei großen Fahrzeugen kann sich dies auszahlen. Bei Linienbussen ließen sich die Ladezeiten für Batterien und Speicher vorab planen und gezielt mit den Fahrplänen abstimmen. Die DLR-Forschenden haben gemeinsam mit Industrieunternehmen zwei Technologien für Hochleistungswärmespeicher entwickelt. Um die Vor- und Nachteile beider Varianten auszuloten, haben sie zwei Demonstratoren im Labor aufgebaut und umfassend getestet.

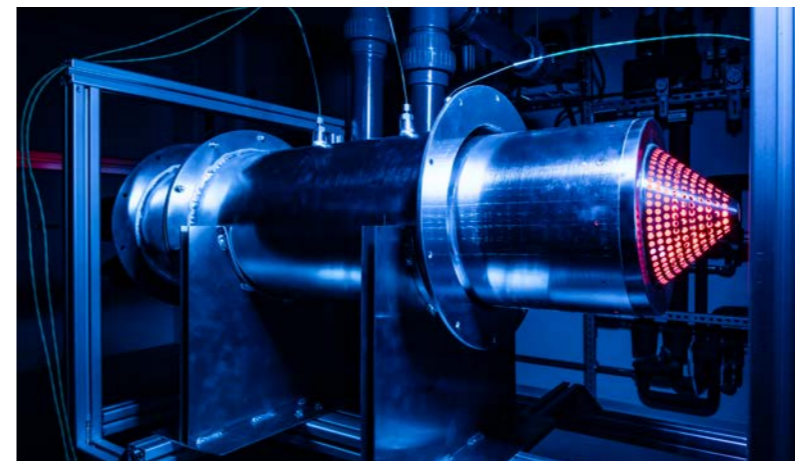
### Heiße Keramiken

Der erste ist ein keramischer Wärmespeicher. Er kann im Inneren bis zu 900 Grad Celsius heiß werden und wurde im Projekt Next Generation Car entwickelt. „Die Materialien und Bauteile ähneln denen in Abgaskatalysatoren. Neu ist, sie als Wärmespeicher zu verwenden“, sagt Dr. Stefan Zunft vom Institut für Technische Thermodynamik, der das Projekt betreut. Die Wärme steckt in einer wabenförmigen Keramikstruktur mit vielen millimetergroßen Röhren. „Mit einer leistungsstarken Widerstandsheizung können wir den Speicher in weniger als 20 Minuten aufheizen“, so Stefan Zunft. Ein geregelter Luftstrom durch die feinen Röhren soll die Wärme ins Fahrzeuginnere transportieren. Damit lassen sich Heizleistung und Temperatur während der Fahrt nach Bedarf einstellen. Neben Heizleistung und Speicherkapazität sind auch Größe und Gewicht entscheidend. Die Herausforderung liegt darin, die Speicher so leicht und kompakt wie möglich zu bauen. Allerdings bringt dies zusätzliche Schwierigkeiten mit sich, beispielsweise höhere Verluste durch Abwärme.

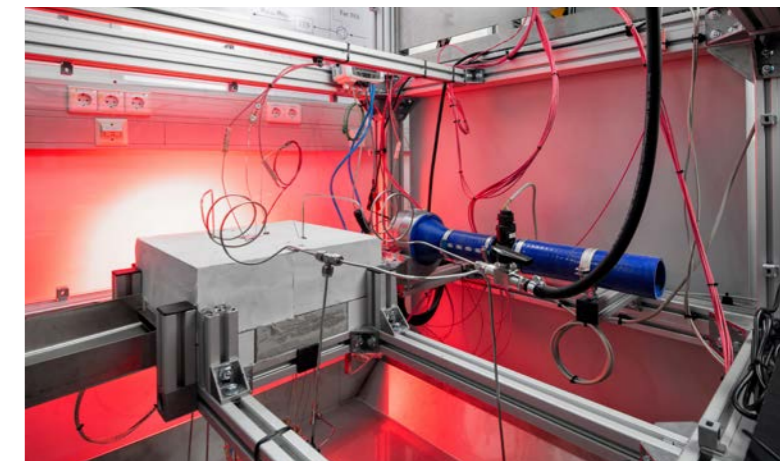
Der Prototyp erreichte eine Heizleistung von über fünf Kilowatt und konnte eine Heiztemperatur von 70 Grad Celsius über fünf Stunden konstant halten. Die nutzbare Speicherdichte für das Gesamtsystem lag bei 150 Wattstunden pro Kilogramm. „Damit eignet sich die Technologie gleichermaßen gut für Pkw und Busse. Sie ist zudem kostengünstig und leicht handhabbar“, ergänzt Zunft.

### DAS PROJEKT NEXT GENERATION CAR (NGC)

Ziel des NGC-Projekts ist es, Fahrzeugkonzepte für eine nachhaltige Mobilität zu entwickeln und zu erproben. Hierzu zählt auch die Untersuchung von Feststoff- und Latentwärmespeichern zum Beheizen batterieelektrischer Fahrzeuge. Beteiligt waren die DLR-Institute für Technische Thermodynamik, für Fahrzeugkonzepte und für Materialphysik im Weltraum.



In rötlichem Licht erscheint der auf 900 Grad Celsius aufgeheizte keramische Wärmespeicher auf dem Prüfstand. Wie bei einem Föhn überträgt ein Luftstrom die Wärme mit angenehmen 60 Grad Celsius nach außen.



Der Prototyp des Latentwärmespeichers ist mit mikroporösem Dämmmaterial (grauer Kasten) ummantelt, um Wärmeverluste zu vermeiden. Auf dem Prüfstand messen zahlreiche Sensoren Temperatur, Druck und Volumen von Luftzufuhr (blaues Rohr) und Heizluftstrom.



# AUTONOM DURCHS WASSER

Sensoren und Systeme vom Weltall bis ins Meer

von Jana Hoidis



Auf den Testfeldern eMIR und Spree-Oder-Wasserstraße (SOW) erprobt das DLR Assistenzsysteme und logistische Prozesse für die Schifffahrt auf See und Binnengewässern.



**G**eringere Wartezeiten, zuverlässigere Ankunftsprognosen und sichere Routen: Assistenzsysteme machen die Schifffahrt der Zukunft sicherer, effizienter und komfortabler. Sie spielen eine wichtige Rolle, wenn Teile des Güterverkehrs von der überlasteten Straße aufs Wasser verlagert werden sollen. Für die Idee des autonomen Fahrens auf dem Wasser müssen neue Technologien entwickelt, getestet und zertifiziert werden. Autonomie bedeutet aber auch, dass sich die Beziehung zwischen Mensch und Maschine verändern wird. Hierbei spielen die gesellschaftliche Akzeptanz, aber auch veränderte Arbeitsbedingungen und die Klärung rechtlicher Fragestellungen eine besondere Rolle. In all diesen Bereichen forscht das DLR.

Fachleute unterscheiden zwischen automatisierten, ferngesteuerten und vollautonom fahrenden Schiffen. Vollautonom bedeutet, dass das Steuerungssystem des Schiffes in der Lage ist, Entscheidungen und Aktionen selbst auszuführen. Welcher Automatisierungsgrad für welches Schiff sinnvoll ist, hängt davon ab, wo es eingesetzt werden soll. Kurzstreckenfahrten werden schon auf vollautonomer Basis erprobt. Damit autonome oder teilautonome Schiffe jedoch qualifiziert sowie rechtlich abgesichert eingesetzt werden können, muss die Technik an Bord sehr hohe Anforderungen an ihre Zuverlässigkeit erfüllen. Navigationsinstrumente müssen auch unter extremen Wetterbedingungen wie Eis, Nebel, Sturm, Gischt und Seegang so sicher funktionieren, dass

sie die Aufgaben von Schiffsführenden an Bord übernehmen können. Alle Steuerungsinstrumente müssen zudem gegen Hacker-Angriffe von außen geschützt werden. Deshalb sind internationale Sicherheitsstandards in der Satellitenkommunikation sowie rechtliche Rahmenbedingungen notwendig. Um diese Themen sowohl für die Binnen- als auch für die Seeschifffahrt zu untersuchen, betreibt das DLR mehrere Testfelder und Forschungsboote.

## Binnenschifffahrt für den Gütertransport

Die Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr hat sich in den letzten 30 Jahren nahezu verdoppelt. Vermehrte Staus und hohe Emissionen entlang der Verkehrswege sind die Folge. Aktuell werden in Deutschland nur etwa sieben Prozent der Güter auf Binnengewässern transportiert. „Die Verlagerung von Teilen des Transportes auf Flüsse und Kanäle ist ein wichtiger Beitrag, der dazu dient, nicht nur den Verkehr auf der Straße zu entlasten, sondern unter Einsatz neuer Technologien auch umweltfreundlicher zu gestalten“, so Thoralf Noack, Maritimer Koordinator im DLR. Allerdings sorgt der Klimawandel auch im Bereich der Binnenschifffahrt für neue Herausforderungen. Die Pegelstände des Ober- und Mittelrheins verringerten sich beispielsweise 2022 phasenweise so stark, dass Teile des Binnenschifffahrtsverkehrs zum Erliegen kamen. Auch wenn die Vertiefung von Fahrrinnen weiterhin eine wichtige Option bleiben wird, ist auch hier neues technisches Know-how gefragt. „Innovationen im Bereich neuer Transportsysteme, wie

kleinere, autonome Schiffseinheiten mit geringem Tiefgang, deren Einsatz vom DLR gemeinsam mit der Industrie, kleinen und mittleren Unternehmen, anderen Forschungseinrichtungen und Behörden auf der Spree-Oder-Wasserstraße konzipiert werden, wären eine Option“, ergänzt Thoralf Noack.

## Digitales Testfeld auf der Spree-Oder-Wasserstraße

In Deutschland entsteht derzeit auf der Spree-Oder-Wasserstraße ein digitales Testfeld für die automatisierte und autonome Binnenschifffahrt. Anders als in der Schifffahrt auf hoher See kann der Empfang von Satellitendaten zur Navigation in bebauten Gebieten, vor allem an Brücken oder Schleusen, ungenau sein. Gerade dort aber ist eine zuverlässige Positionierung umso wichtiger, um die Bauwerke vor Kollision zu schützen und keine Einschränkungen des Verkehrs zu erzeugen. Die Lösung liegt hier im intelligenten Zusammenspiel von Satellitennavigation und weiterer Sensorik, die sowohl auf dem Schiff als auch an Land installiert ist, zum Beispiel an Häfen oder Schleuseneinfahrten. Das sind zum Beispiel Kameras, Laser- oder Radarsensoren, die Umgebungsdaten zentimetergenau messen. Dass diese Technik funktioniert, zeigte das DLR gemeinsam mit Forschung, Wirtschaft und Behörden, als es im August 2022 die MS Victor Hugo, ein 82 Meter langes und 10 Meter breites Fahrgastschiff, autonom in die Schleuse bei Straßburg navigieren ließ.

## Positionsbestimmung mit Satellitendaten und Sensorik

Zur Positionsbestimmung nutzt das Assistenzsystem globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) wie GPS und Galileo. Damit das Schiff aber sicher und zentimetergenau in die Schleuse einfahren kann, sind zusätzliche Korrekturdaten notwendig. Diese sollen zukünftig über VDES (VHF Data Exchange System) bereitgestellt werden. VDES ist der Nachfolger von AIS (Automatisches Identifikationssystem), einem Funksystem, das durch den Austausch von Navigations- und anderen Schiffsdaten die Sicherheit und die Lenkung des Schiffsverkehrs



Schiffsbrückensimulator

verbessert. Im Vergleich zu AIS verfügt VDES aber über eine größere Bandbreite und ermöglicht so eine störungsfreiere Datenübermittlung zwischen den Schiffen, den Basisstationen und den Verkehrszentralen. In die Entwicklung von VDES flossen umfangreiche Expertisen der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des DLR-Instituts für Kommunikation und Navigation ein. Aktuell begleiten sie auch den internationalen Standardisierungsprozess des Systems.

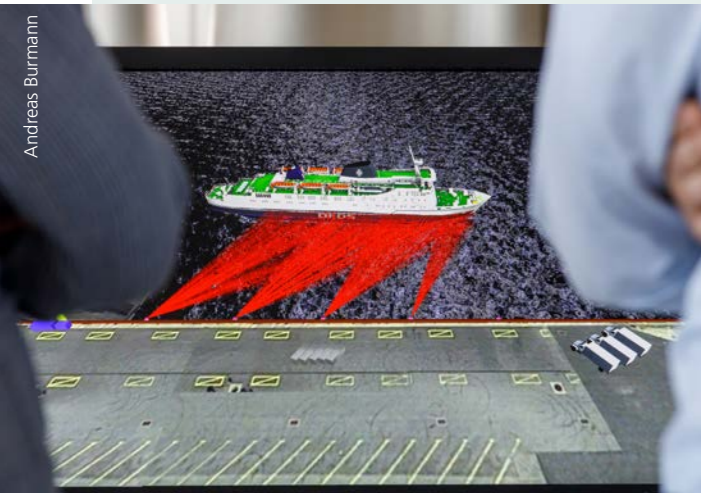
## Maritimes Testfeld eMir auf der Nordsee

Um den hohen Automatisierungsgrad maritimer Systeme auch auf See zu erproben, betreibt das DLR mit Behörden und der Industrie das Testfeld e-Maritime Integrated Reference Platform (eMIR). Hier werden hochautomatisierte Assistenzsysteme zum Beispiel zur Vermeidung von Kollisionen erforscht und entwickelt. Das Testfeld besteht aus zwei Teilen: einer simulationsbasierten und einer realen Testumgebung auf See. Die virtuelle Infrastruktur umfasst Umwelt-, Verkehrs- und Schiffssimulatoren, die auf künstlicher Intelligenz basieren. Mit ihrer Hilfe können die Risiken und die Effizienz innovativer maritimer Systeme schon während der Produktentwicklung abgeschätzt werden. In dem physischen Testfeld – einem Seegebiet von Brunsbüttel über Cuxhaven und Wilhelmshaven bis nach Helgoland, das zu diesem



Die MS Victor Hugo fährt in die Schleuse bei Straßburg. Es war die erste automatisierte Schleuseneinfahrt eines Binnenschiffs.





Sensoren messen den Abstand des Schiffs zur Kaimauer und helfen so beim Anlegen.

## DIE DLR-AUSGRÜNDUNG NAVANION

Bei Anlegemanövern entstehen immer wieder Schäden an Hafeninfrastuktur und Schiffen. Um das in Zukunft zu vermeiden, hat das DLR SmartKai die „Einparkhilfe XXL“ für Seeschiffe entwickelt. Ab Januar 2024 ist das System über die DLR-Ausgründung Navanion GmbH verfügbar. Es funktioniert wie folgt: In die Kaimauer sind Laser-, Radar- und Umweltsensoren integriert. Sie bestimmen sehr präzise die Geschwindigkeit des Schiffs und dessen Lage sowie dessen Abstand zur Kaimauer. Diese Informationen werden über eine im Hafen installierte SmartKai-Box mit weniger als einer Sekunde Verzögerung zur Schiffsbrücke gesendet. Dort werden die Informationen auf einer Seekarte visualisiert, hierzu ist ein beliebiges mobiles Endgerät nutzbar. Lotsen- und Brückenpersonal können mithilfe dieser Informationen entsprechend reagieren und navigieren. Auch nautisch relevante Umweltdaten wie Strömung, Wind und Tidenverhältnisse erfasst das System. SmartKai unterstützt gerade bei Manövern, die durch anliegende Hafeninfrastuktur, wie Stromliegeplätze, Schleusen und Durchfahrten, herausfordernd sind.

➔ Weitere Informationen unter: [navanion.de](http://navanion.de)

Zweck mit Instrumenten ausgestattet wurde – können die maritimen Systeme unter realen Bedingungen getestet werden. Eine vollständige Schiffsbrücke, installiert in einem seegängigen Container, kann an Häfen aufgestellt werden oder auf Schiffen mit an Bord gehen. Prof. Axel Hahn, Direktor des Instituts für Systems Engineering für zukünftige Mobilität, betont den Nutzen des Testfelds: „eMir ist eine faszinierende Großanlage. Damit können wir Daten zum Seeverkehr erheben und eine Forschungsplattform anbieten, um die Entwicklung hochautomatisierter Systeme voranzutreiben.“

### Assistenzsysteme in Seehäfen

Die Häfen in Emden, Cuxhaven und Wilhelmshaven sind elementare Bestandteile von eMir. Hier können neue Technologien für den Hafenverkehr erforscht werden. Schiffsmanöver wie das An- und Ablegen werden so digitalisiert und mithilfe der gesammelten Daten automatisiert. Auch logistische Prozesse für den Hafenbetrieb, beispielsweise das Umschlagen von Waren, werden untersucht. In Emden testen die Forschenden aktuell ein Betriebskonzept für ein autonom fahrendes Baggerschiff, das den Hafen von Schlick befreien soll. Auf dem Forschungsboot Sally sind dafür Sensoren und Kameras angebracht, die die Umgebung im Blick behalten. Fahrende Schiffe oder der Abstand zur Kaimauer können so erfasst werden. Zudem ist Sally mit allerhand Assistenzsystemen wie Kollisionsvermeidungssensoren, Autopiloten und Systemen zur Objekterkennung ausgestattet. Auch hier kommt der portable eMir-Container zum Einsatz, von dem aus die Forschenden

den Sally fernsteuern. So wollen sie die Grenzen dieses Systems und eine zukünftige Zulassung auf einem Baggerschiff erproben.

### Vertrauenswürdigkeit von künstlicher Intelligenz

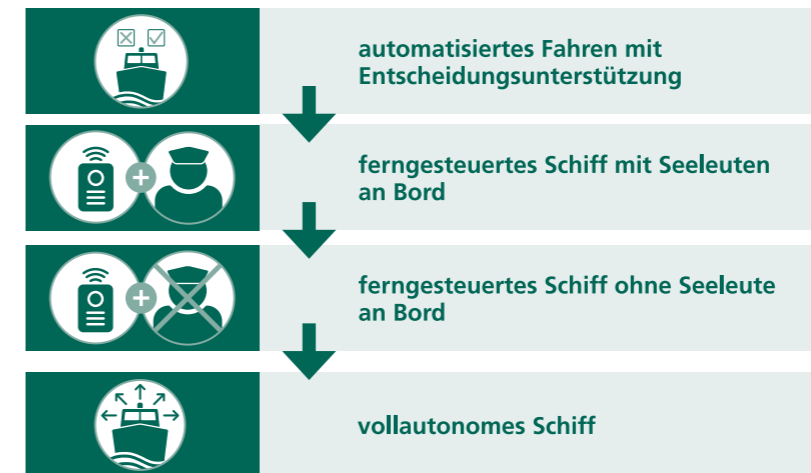
Wenn Fahrzeuge autonom unterwegs sein sollen, müssen sie ihr Umfeld und Objekte in ihrer Nähe genauestens erkennen können. Dafür eignen sich Systeme und Verfahren unter Einsatz künstlicher Intelligenz (KI). Deren Programme müssen höchst vertrauenswürdig sein, sprich nicht fehleranfällig. Wie der Mensch muss auch eine KI erst lernen, Objekte wie Schiffe, Bojen, schwimmende Container, Menschen oder Meeres-tiere sowie Szenarien zu erkennen, um ihnen auszuweichen. Bei optischen, kamerabasierten Systemen wird die KI beispielsweise mit Bildern von Schiffen aus unterschiedlichen Perspektiven trainiert. Eine weitere Herausforderung sind sich ändernde Umweltbedingungen: Wassertropfen auf der Kameralinse könnten es erschweren, ein Objekt korrekt zu identifizieren. Auch ist die Zertifizierung dieser KI-Systeme eine besondere Herausforderung. Hierfür betreibt das DLR beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie einen Schiffsbrückensimulator. Für ihn entwickelten das DLR und das Bundesamt einen Testkatalog. Er enthält Tausende von Szenarien, die die KI in kürzester Zeit erkennen muss.

### Vollautonomes Unterwasserfahrzeug

Das Large Modifiable Underwater Mothership, kurz MUM, soll mit seinem Brennstoffzellenantrieb bis zu 1.500 Seemeilen (2.700 Kilometer)

## DER WEG ZUM VOLLAUTONOMEN SCHIFF

Definition der Internationalen Seeschifffahrtsorganisation (IMO):



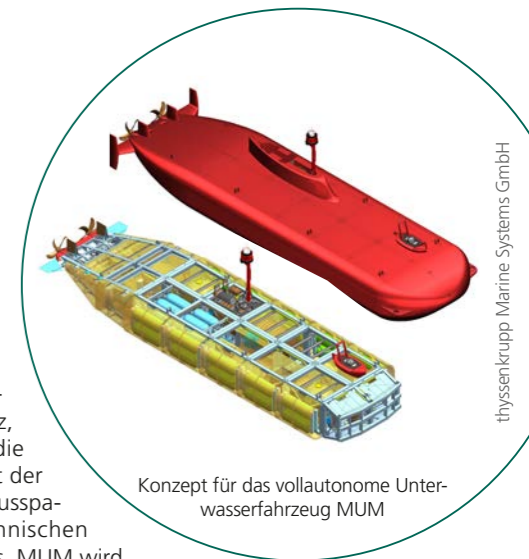
unbemannt zurücklegen können. Es wird circa 50 Meter lang und lässt sich wie aus einem Baukasten mit unterschiedlichen Systemen bestücken: Batterien, Sensoren, Transportbehältern oder kleineren Unter-seerobotern – daher auch der Name „Mothership“. Ein vom DLR entwickeltes laserbasiertes Kamerasystem kann per KI Objekte erkennen und sorgt dafür, dass MUM diese sicher und autonom umfahren kann. Hauptanwendungsfälle von MUM sind Wartungsarbeiten an Pipelines oder das Aufspüren und Entfernen von im Zweiten Weltkrieg versenkter Munition. „Der Vorteil ist, dass es auch bei schlechtem Wetter unter Wasser, also unter Sturm und Wellen, an kritischen Infrastrukturen wie Gaspipelines das ganze Jahr über autonom Reparaturen durchführen kann“, sagt Carl Wrede, stellvertretender Direktor des DLR-Instituts für den Schutz maritimer Infrastrukturen. Der Plan: Das große Mutterschiff fährt möglichst nah an eine Stelle, an der es ein kleineres U-Boot aussetzt, das dort mit einem Greifarm autonom Arbeiten ausführt.

### Internationale gesetzliche Herausforderungen

Nach Abschluss der Forschungsarbeiten soll MUM zum Produkt weiterentwickelt werden. Die gesellschaftliche Akzeptanz und mögliche Anwendungsszenarien hat das DLR in einer Umfrage evaluiert. Hierzu befragten die Forschenden mögliche Interessengruppen wie Kapitäninnen und Kapitäne, Schiffsbau-Unternehmen, Werften, wissenschaftliche Einrichtungen sowie Lotsinnen und Lotsen. Außerdem arbeiten sie an rechtlichen Rahmenbedingungen. Die Rechtslage ist auf hoher See an kein Land gebunden. Je nachdem, ob ein motorisiertes Schiff, ein Segelboot oder ein

Fischkutter den Weg kreuzt, gelten andere Verkehrsregeln, auch in deutschen Hoheitsgewässern. Die gesellschaftliche Akzeptanz, Gesetzeslagen und die Vertrauenswürdigkeit der KI sind wichtige Einflussparameter bei der technischen Gestaltung des Schiffs. MUM wird zuerst in einem maritimen Testfeld in der Ostsee in mittleren Tiefen von 70 Meter erprobt. Bis es autonom in den Weltmeeren unterwegs sein kann, müssen die Internationale Seeschifffahrtsorganisation (IMO) und die einzelnen Staaten einen klaren Rechtsrahmen für den weltweiten Betrieb von autonomen Schiffen schaffen. Carl Wrede sieht hier Potenziale: „Das DLR hat das Alleinstellungsmerkmal, die technologische Entwicklung mit der rechtlichen vorantreiben zu können. Unsere Ingenieurinnen und Ingenieure, Juristinnen und Juristen arbeiten eng zusammen. Bei der Technologieentwicklung werden von Anfang an Rechtsfragen und bei der Erarbeitung eines Rechtsrahmens die Anforderungen an die Technologie mitgedacht. So möchten wir die autonome Schifffahrt sicher in die Anwendung bringen.“

Jana Hoidis ist an den DLR-Standorten der Region Nord für die Kommunikation verantwortlich.

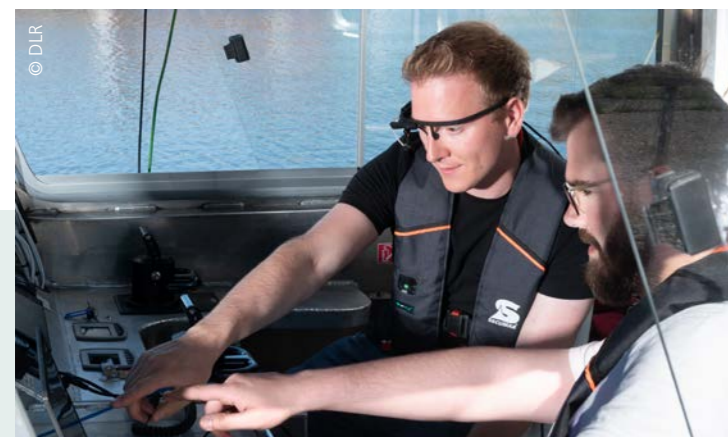


Konzept für das vollautonome Unterwasserfahrzeug MUM

thyssenkrupp Marine Systems GmbH



➔ Weitere Informationen über die maritime Forschung des DLR unter: [dlr.de/de/forschung-und-transfer/themen/maritime-forschung](http://dlr.de/de/forschung-und-transfer/themen/maritime-forschung)



Tests im September 2023 mit dem DLR-Forschungsboot Sally im Hafen von Emden dienten dazu, verschiedene Automatisierungsgrade zu erproben.



Die Technik an Bord von Sally kann Hindernisse eigenständig erkennen und auf einem Monitor anzeigen. Aus dem zur Schiffsbrücke umgebauten eMir-Container steuerten die Forscher das Boot aus der Ferne.





# LICHT AN UND ACTION

Im Gespräch mit einem Solarforscher  
Interview mit Dr. Dmitrij Laaber

**Die größte künstliche Sonne der Welt steht in Jülich. Sie soll dabei helfen, neue Fotovoltaik- und solarthermische Anlagen zu entwickeln sowie Technologien zu erforschen, mit denen grüner Wasserstoff mithilfe von Sonnenlicht gewonnen werden kann. Dr. Dmitrij Laaber vom DLR-Institut für Future Fuels ist der Herr der Synlight-Anlage. Warum deren Licht von Kinoprojektoren stammt und welche Rolle sie für eine klimaneutrale Energiewirtschaft spielen kann, erzählt er hier.**

## Wofür baut man eigentlich eine so außergewöhnliche Anlage?

Der Haupteinsatzzweck von Synlight ist, Anlagen für solarthermische Kraftwerke oder auch solarchemische Reaktoren in voller Größe zu testen. Normalerweise startet die Entwicklung neuer Technologien in kleinem Maßstab im Labor. Dafür existieren weltweit einige wenige Anlagen. Sie sind relativ kostengünstig aufzubauen und liefern zwischen 10 und 20 Kilowatt Strahlungsleistung, sind also recht kompakt. Bevor man den Reaktor dann in einem Solarturm installiert, wo er von einigen hundert oder vielleicht 1.000 Heliostaten – also Spiegeln – bestrahlt wird, müssen viele „Kinderkrankheiten“ ausgemerzt werden. Das geht am besten unter fest definierten und wiederholbaren Bedingungen. Dafür haben wir Synlight. Prinzipiell steht die Anlage allen Interessierten zur Verfügung. Für kleinere Forschungsgruppen gibt es beispielsweise auch Förderprogramme, mithilfe derer sie die Nutzung finanzieren können.

## Woher stammen die Strahler dieser „Sonne“?

In Synlight sind aktuell 148 Lampen für mittelgroße Kinoprojektoren verbaut. Sie haben sieben Kilowatt elektrische Anschlussleistung. Im Kino nutzt man diese Xenon-Lampen, um Farben originalgetreu auf der Leinwand abzubilden. Wir verwenden sie, um dem echten Sonnenlicht möglichst nahezukommen und so realistische Testbedingungen

zu erhalten. Dabei sind wir unabhängig von Tages- oder Jahreszeiten. Wir können quasi 24 Stunden am Tag bestrahlen. Wenn die Lampen eingeschaltet sind, befindet sich allerdings niemand in den Versuchsräumen oder in der Strahlerhalle, denn dann würde man erblinden. Auch die UV-Strahlung ist sehr intensiv. Selbst wenn man nur neben den Lampen stünde, bekäme man sofort einen heftigen Sonnenbrand. Deshalb überwachen wir alle Versuche mit speziellen Kameras, die für Einsätze in Wüstengebieten konzipiert wurden.

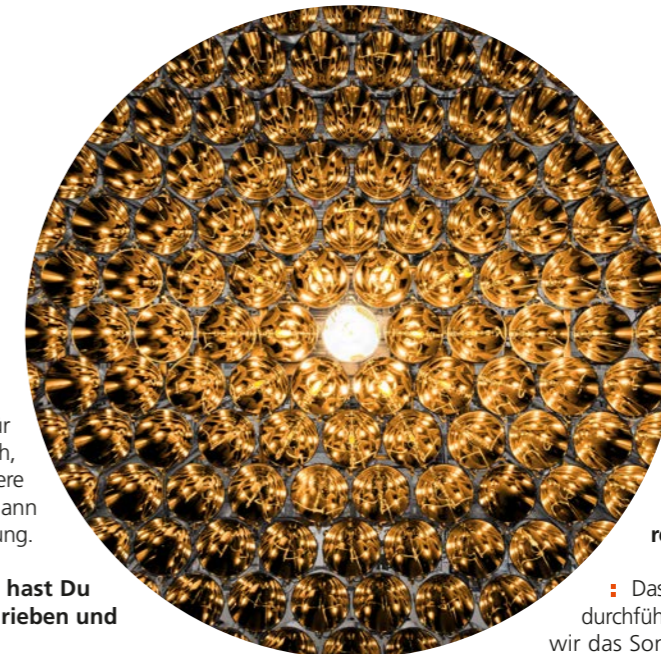
## Du hast erst Maschinenbau und dann Energietechnik studiert. Haben Dich technische Themen schon immer interessiert?

Das ist fast eine Familientradition. Schon mein Großvater war Ingenieur und meine Mutter hat Maschinenbau studiert. Ich war zwar nicht gezwungen, diese Tradition fortzuführen, aber es hat mich immer interessiert. Nach dem Abitur war es logisch für mich, etwas Technisches



Dmitrij Laaber bei Wartungsarbeiten an einem der Strahlermodule

Jeder der 148 Strahler von Synlight ist einzeln steuerbar.



zu studieren. Die Entscheidung für Maschinenbau war vielleicht willkürlich, aber ich habe sie nie bereut. Die spätere Vertiefung in Energietechnik war dann eine deutlich bewusstere Entscheidung.

## ... und während des Studiums hast Du außerdem Theaterstücke geschrieben und Regie geführt ...

Stimmt. Dazu hat mich meine damalige Freundin – und heutige Ehefrau – inspiriert. An meiner TU in Hamburg fehlte mir etwas Kultur. So entstand die Idee, eine Theater-AG zu gründen. Die besteht noch heute und hat sogar einen Preis für die Verbesserung des studentischen Lebens an der TU gewonnen.

## Dir liegt die Umwelt sehr am Herzen. Was kannst Du mit Deiner Forschung konkret dafür tun?

Ich denke viel über die Umwelt, mein Verhalten und die globalen Probleme nach. Mir ist mein Job wichtig, weil ich möglichst umweltfreundliche Energieformen erforschen und so dazu beitragen kann, dass diese hoffentlich irgendwann massentauglich werden. Auch wenn mein persönlicher Beitrag recht klein ist, ist er einer von vielen auf dem Weg zu einer klimaneutralen Energiewirtschaft mit dem wesentlichen Baustein Wasserstoff.

*„Mir ist mein Job wichtig, weil ich möglichst umweltfreundliche Energieformen erforschen und so dazu beitragen kann, dass diese hoffentlich irgendwann massentauglich werden.“*

Dr. Dmitrij Laaber  
DLR-Institut für Future Fuels



Die Strahler der Synlight-Anlage können eine bis zu 10.000-fache Konzentration des natürlichen Sonnenlichts erzeugen.



Reaktor zur thermischen Wasserstoffherzeugung

Beim grünen Wasserstoff geht es darum, erneuerbare Energie zu gewinnen. Welchen Beitrag kann Synlight dazu leisten, dieses Verfahren zu optimieren?

Das ist der Kern vieler Versuche, die wir hier durchführen. Wir entwickeln Verfahren, bei denen wir das Sonnenlicht nutzen, um eine chemische Reaktion zu starten. Dabei wird Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten. Für die Entwicklung nutzen wir das Licht von Synlight und erhitzen unsere Reaktoren auf etwa 1.400 Grad Celsius. Später soll die Sonne diesen Schritt übernehmen. Dieser Prozess ist umweltfreundlicher, als Wasserstoff aus Erdgas zu gewinnen, da keine Emissionen entstehen. Solarforschung kann außerdem dazu beitragen, Industrieprozesse CO<sub>2</sub>-ärmer zu gestalten, denn die chemische Industrie benötigt neben den Rohstoffen sehr viel Wärme.

## Um wieder die Brücke zu schlagen – hier bist Du ja auch so etwas wie ein Regisseur ...

Natürlich fahre ich nicht jeden Versuch selbst. Dafür haben wir ein ganzes Team. Auch bin ich nicht an jedem Aufbau direkt beteiligt, aber die gesamte Planung, Entwicklung und Koordination laufen über mich.

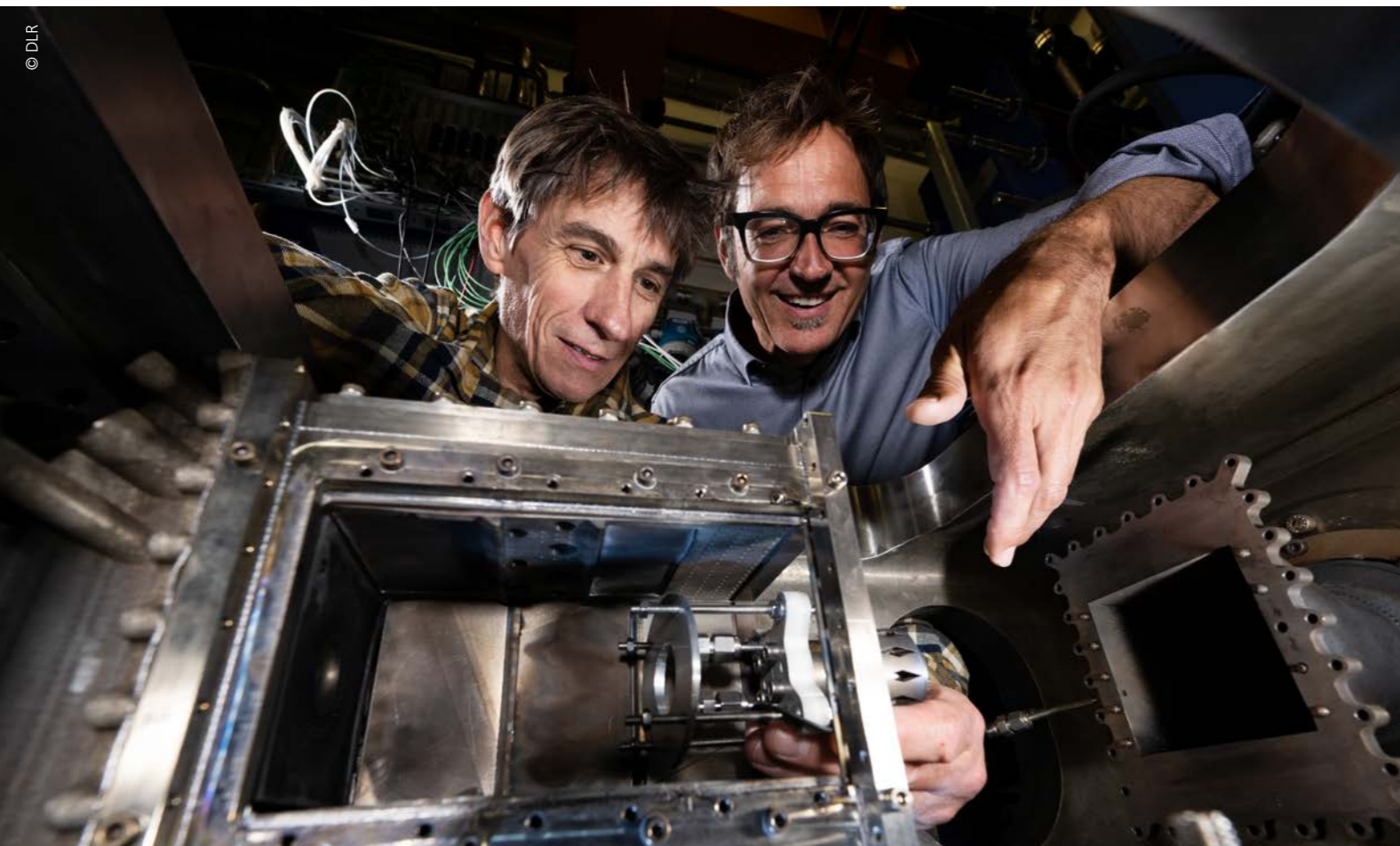
## Wie vereinen sich für Dich Wissenschaft und Kreativität?

Wissenschaft ohne Kreativität ist nicht möglich. Beim Forschen gibt es keine Standardlösungen. Man muss immer etwas Neues ausprobieren, manchmal auch irgendwas Wildes, bei dem die grauhaarigen Experten sagen: „Ihr seid bescheuert, das wird nie funktionieren!“ Natürlich scheitert man auch häufig, aber ohne dieses Scheitern erreicht man nichts.

Der Podcast DLR-FORSCHTELLUNGSGESPRÄCH wird produziert von Daniel Beckmann, Andreas Ellmerer und Antje Gersberg. Sie alle arbeiten in der DLR-Kommunikation.



Der Podcast ist zu hören auf [DLR.de/Podcast](https://www.dlr.de/Podcast) und allen gängigen Streaming-Plattformen.



# PRÜFSTAND-PROFIS

Erste Tests mit reinem Wasserstoff für Flugzeugtriebwerke

Interview mit Dr. Bertram Janus und Dr. Christian Willert

**F**ür eine klimafreundliche Luftfahrt bietet Wasserstoff enormes Potenzial. Anders als bei Kerosin entstehen bei seiner Verbrennung nur Wasser und Wärme ... zumindest theoretisch. Allerdings hat ein solcher Treibstoff auch seine Herausforderungen: Damit der Wasserstoff flüssig bleibt, muss er stets auf  $-253$  Grad Celsius gekühlt werden. Auch verbrennt Wasserstoff anders als Kerosin. Wie genau dieser potenzielle neue Flugzeugtreibstoff sicher und schadstoffarm verbrennen kann, untersuchen die Forscherinnen und Forscher des DLR-Instituts für Antriebstechnik in Köln. Dazu nutzen sie moderne Hochdruckbrennkammerprüfstände in Kombination mit moderner laseroptischer Messtechnik. Warum diese Technik so gefragt ist, darüber sprechen Dr. Bertram Janus, kommissarischer Co-Institutsleiter und Leiter der Abteilung Brennkammer, sowie Dr. Christian Willert, Leiter der Abteilung Optische Triebwerksmesstechnik, in diesem Gespräch.

**Welche Flugzeugklassen sollen denn in Zukunft mit Wasserstoff betrieben werden?**

**Dr. Bertram Janus:** Das gilt es derzeit noch zu bewerten. Unser Verständnis davon, was die einzelnen Technologie-zweige leisten können, wächst stetig. Denn es gibt unterschiedliche Ansätze für ein klimaverträgliches Passagierflugzeug: Bei Kurzstrecken liegen die Erwartungen eher im Bereich „elektrisches Fliegen“. In diesem Zusammenhang wird auch an hybriden Ansätzen mit Wasserstoff als Energieträger geforscht.

Dieser wird dabei aber nicht in einem Triebwerk verbrannt, sondern in einer Brennstoffzelle in Strom umgewandelt. Damit wird der Propeller angetrieben. Wir hingegen forschen an der direkten Verbrennung von Wasserstoff in konventionellen Flugzeugtriebwerken für die Mittelstreckenklasse. Hier wird momentan das größte Potenzial für den verbrennungsbasierten Wasserstoffbetrieb gesehen. Deshalb kooperieren wir mit verschiedenen Triebwerksherstellern, die aktuell Demonstratoren entwickeln. Die aktuellen Versuche am DLR konzentrieren sich auf eine Triebwerksklasse für Business Jets.

**Airbus will bis 2035 das weltweit erste wasserstoffbetriebene Verkehrsflugzeug entwickeln ...**

**Janus:** Richtig. Der Flugzeughersteller plant zunächst eine Technologiedemonstration am Boden und später auch in der Luft. Dazu möchte er ein modifiziertes Triebwerk an einen Airbus A380 montieren, um zu zeigen, dass ein Wasserstoffantrieb grundsätzlich möglich ist. Gleichzeitig können Untersuchungen zur Klimawirkung durchgeführt werden. Das ist ein großer Meilenstein auf dem Weg zu einem wasserstoffbetriebenen Flugzeug. Die großen Triebwerkshersteller, mit denen wir in verschiedenen EU-geförderten Projekten zusammenarbeiten, unterstützen diesen Weg. Und bei uns am DLR in Köln finden die vorbereitenden Verbrennungstests statt.

**Bis 2035 soll das Wasserstofftriebwerk den Weg in die zivile Luftfahrt finden. Welche Hürden müssen bis dahin noch genommen werden?**

**Janus:** Das erste Zwischenziel sind Triebwerksdemonstratoren auf dem Boden. Hierzu laufen Versuche in unseren Prüfständen, bei denen wir die Verbrennung von außen durch ein Fenster beobachten können. Wir lernen, das Verhalten des Brenners und der Brennkammer besser zu verstehen, und beseitigen grundsätzliche technische Unsicherheiten. Sobald ausreichend Vertrauen in den Brenner besteht, folgen anwendungsnähere Experimente in größeren, komplexeren Prüfständen, wo ganze Ringbrennkammern untersucht werden können – unter Bedingungen, die denen eines realen Triebwerks entsprechen. Nach weiteren erfolgreichen Tests baut der Triebwerkshersteller den Brenner dann in ein Triebwerk ein.

*„Wir lernen, das Verhalten des Brenners und der Brennkammer besser zu verstehen, und beseitigen grundsätzliche technische Unsicherheiten.“*

**Dr. Bertram Janus**

Kommissarischer Co-Institutsleiter und Leiter der Abteilung Brennkammer



Christian Willert (links) und Bertram Janus diskutieren im Hochdruckbrennkammerprüfstand 1 über einen Versuch.

**Warum werden die Versuche beim DLR gemacht und nicht bei der Industrie? Was kann das DLR, das die Privatwirtschaft nicht kann?**

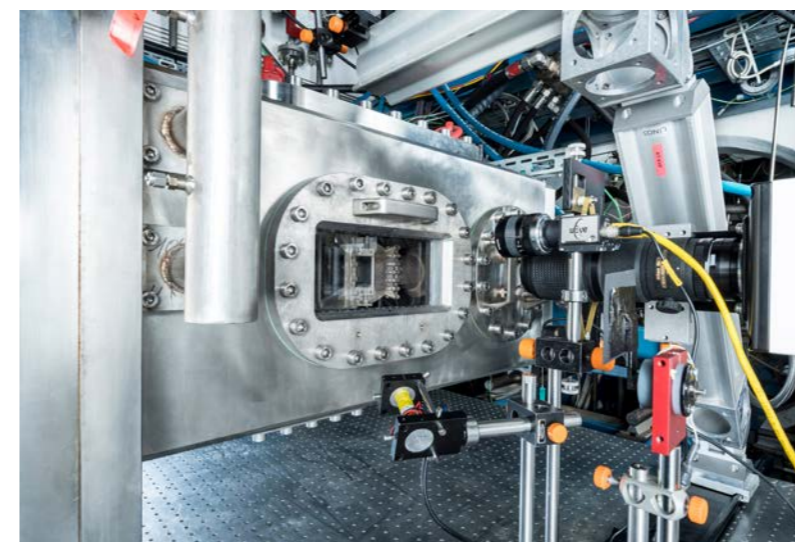
**Janus:** Mit den Hochdruckbrennkammerprüfständen wie dem Hochdruckbrennkammerprüfstand 1 (HBK1) stellen wir der Industrie eine außergewöhnliche Infrastruktur zur Verfügung. Beispielsweise erlauben druckfeste Quarzglasfenster spezielle Einblicke in die eigentlich geschlossene Brennkammer. So können wir das Verbrennungsverhalten charakterisieren und die Strömung innerhalb der Brennkammer bestimmen. Dafür setzen wir eigens entwickelte laseroptische Messverfahren ein.

**Dr. Christian Willert:** In den Versuchen nutzen wir verschiedene Messtechniken. Sie vervollständigen das Bild des Verbrennungsvorgangs. Außerdem können wir mit solchen Experimenten Simulationen überprüfen und verbessern, welche die Kolleginnen und Kollegen aus der Numerischen Simulation vorab durchgeführt haben. Mit den optischen Messungen erfassen wir die Reaktions- und Wärmefreisetzungszonen, ohne dabei die Brennkammerströmung zu beeinflussen. Außerdem können wir durch Strömungsfeldmessungen die Bewegung des Luft-Wasserstoff-Gemischs und der Reaktionsprodukte durch die Brennkammer verfolgen.

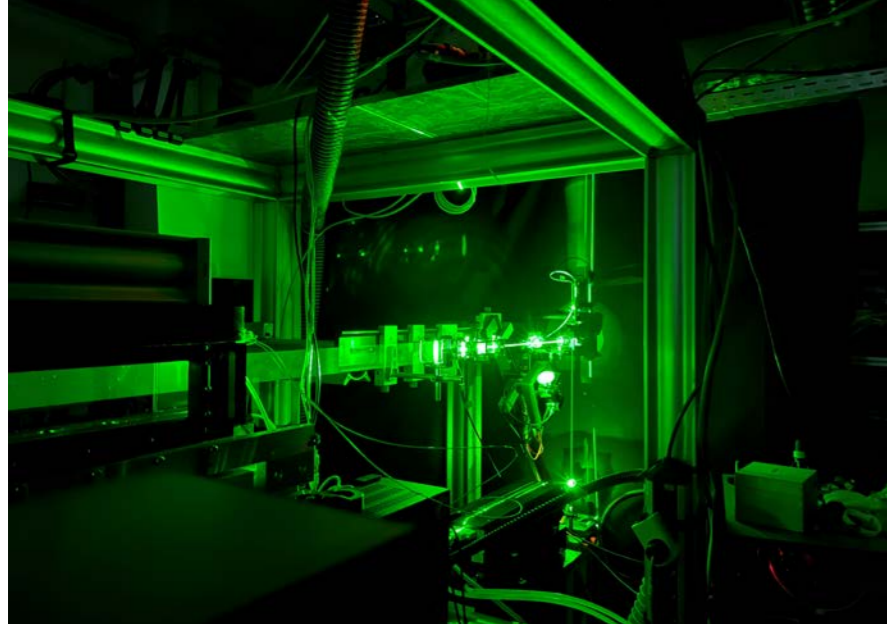
**Janus:** Am HBK1 schauen wir uns Technologieentwicklungen in einem frühen Stadium an. Der HBK5 ist unser größter Verbrennungsprüfstand am DLR. Hier können bis zu den hohen Technologiereifegraden 5–6 ganze Ringbrennkammern für reale Triebwerke untersucht werden. Das Besondere ist, dass viele Prüfstände beim DLR in Köln entstanden sind, sich ständig weiterentwickelt haben und stetig an neue Anforderungen angepasst werden. Außerdem haben wir eine einzigartige Infrastruktur für Luft, Kerosin und Sonderkraftstoffe, die unsere Anlagen je nach Forschungsgegenstand versorgen. Zudem punkten wir seit einigen Jahren mit unserer hervorragenden Wasserstoffinfrastruktur.

**Wie laufen die Wasserstoffversuche in der gläsernen Hochdruckbrennkammer genau ab?**

**Janus:** Man kann sich das so vorstellen, dass man aus der Ringbrennkammer eines Flugzeugtriebwerkes ein Segment „herausschneidet“. Die verglaste Kammer wird in der Regel mit einzelnen Brennern unter realitätsnahen Bedingungen betrieben: hohe Luftvorwärmtemperatur und Betriebsdrücke bis 25 bar. Dies ist ein Alleinstellungsmerkmal dieses Prüfstands. Der Brenner wird dann unter verschiedenen Betriebsbedingungen getestet, zum Beispiel im Leerlauf auf dem Rollfeld oder beim „Taxiing“ – also dem Fahren in Richtung Startbahn oder Parkposition –, beim Abheben oder in der Flugphase. Wir haben ein Messsystem, das die Abgaszusammensetzung analysiert, und wir können in die Brennkammer hineinschauen, um dort Strömungen zu messen. Darüber hinaus benutzen wir Messverfahren, die chemische Prozesse in



Die optische Messstrecke im Hochdruckbrennkammerprüfstand 1 (HBK1)



Laserstrahlen machen chemische Prozesse in der Brennkammer sichtbar.

der Brennkammer abbilden. Auf diese Weise möchten wir das Eindüsenverfahren für den Brennstoff so verbessern, dass möglichst wenige Schadstoffe entstehen.

*„Als bildgebendes Verfahren nutzen wir Laser, die einen sogenannten Lichtschnitt, auch Transsektion genannt, erzeugen. Damit werden einzelne Ebenen im Brenn-bereich sichtbar.“*

**Dr. Christian Willert**

Leiter der Abteilung Optische Triebwerksmesstechnik

**Willert:** Als bildgebendes Verfahren nutzen wir Laser, die einen sogenannten Lichtschnitt, auch Transsektion genannt, erzeugen. Damit werden einzelne Ebenen im Brenn-bereich sichtbar. Das lässt sich in gewisser Weise mit der Computertomografie vergleichen, bei der man per Röntgenstrahlung das Gehirn in zweidimensionalen Scheiben darstellt. In unserem Fall bilden die Kameras, die durch ein Sichtfenster in der Brennkammer filmen, diese Ebenen ab.

**Wo besteht denn Potenzial für Optimierung?**

**Janus:** Je tiefere Einblicke wir in die Strömung bekommen, desto bessere Ansatzpunkte finden wir zur Beantwortung der Frage, wie wir den Ablauf in der Brennkammer optimieren können. Damit könnten wir beispielsweise Temperaturspitzen vermeiden. Wo Luft und Brennstoff „unglücklich“ aufeinandertreffen, entstehen mitunter kurzfristig sehr hohe Temperaturen – das fördert die Entstehung von schädlichen Stickoxiden. Bei den Wasserstofftests nutzen wir einen Brenner, den wir selbst gestaltet haben und bei dem wir Phänomene und Prozesse beeinflussen können. So erfahren wir, ob die technische Idee, die dahintersteckt, sich bewahrheitet.

**Willert:** Weiteres Potenzial besteht im hinteren Teil der Brennkammer, am Austrittskanal, also dort, wo die heiße Strömung die thermische Energie an die Maschine abgibt. Mit unseren Lasern sehen wir Dinge, die das Auge nicht erkennen kann. Wir arbeiten zum Beispiel sehr viel mit UV-Licht, um Radikale – Hydroxyl, molekular kombinierten

Sauerstoff und Wasserstoff – anzuregen. Die Fluoreszenz nutzen wir, um Konzentrationen und Temperaturen abzuleiten. Die optimale Gestaltung der Temperaturverteilung ist auch an dieser Stelle enorm wichtig, um Beschädigungen an der Turbine abzuwenden und eine möglichst lange Lebensdauer zu erreichen.

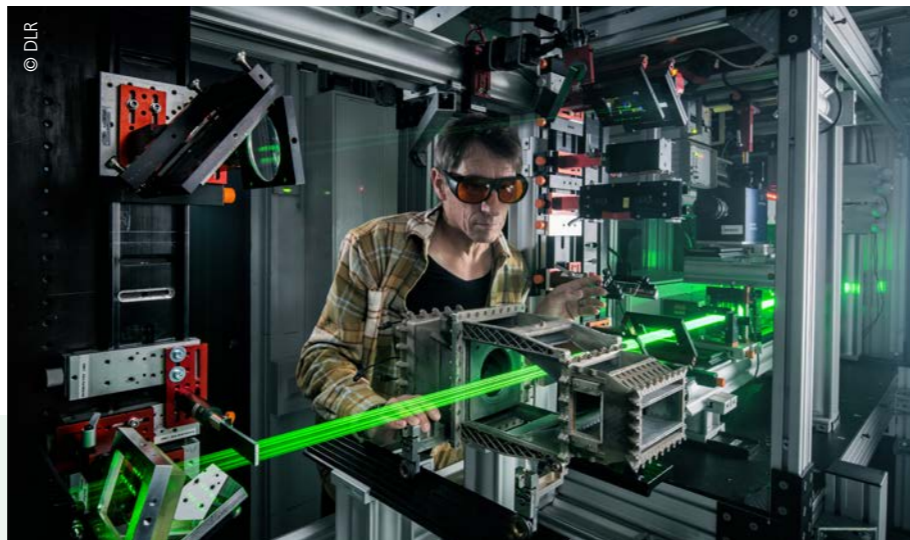
**Wenn man hundertprozentigen Wasserstoff verbrennt, bekommt man wirklich nur Wasser und Wärme als „Abfallprodukte“?**

**Willert:** Aus der Turbine kommt tatsächlich nur Wasser in Form von Dampf. Dadurch, dass Stickstoff in der Luft ist, können zusätzlich auch Stickstoffoxide entstehen, was es zu vermeiden beziehungsweise zu minimieren gilt. Durch den Kontakt mit der kalten Umgebungsluft bilden sich Kondensstreifen wie bei herkömmlichem Flugzeugtreibstoff.

**Gibt es innerhalb des DLR Synergien zwischen der Antriebstechnik und anderen Instituten bei den Wasserstoffverbrennungsversuchen?**

**Willert:** Auf jeden Fall! Was die technischen Verbrennungsinhalte und die Verbrennungsdagnostik angeht, kooperieren wir mit dem Institut für Verbrennungstechnik in Stuttgart. Und wir sind mit den Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik in Göttingen in engem Austausch bei Messverfahren für hohe Strömungsgeschwindigkeiten. Aufgrund der Nutzung von Wasserstoff in Raketentriebwerken gibt es auch Überschneidungen mit den „Raumfahrern“ in Lampoldshausen, was die Entwicklung von optischer Messtechnik angeht.

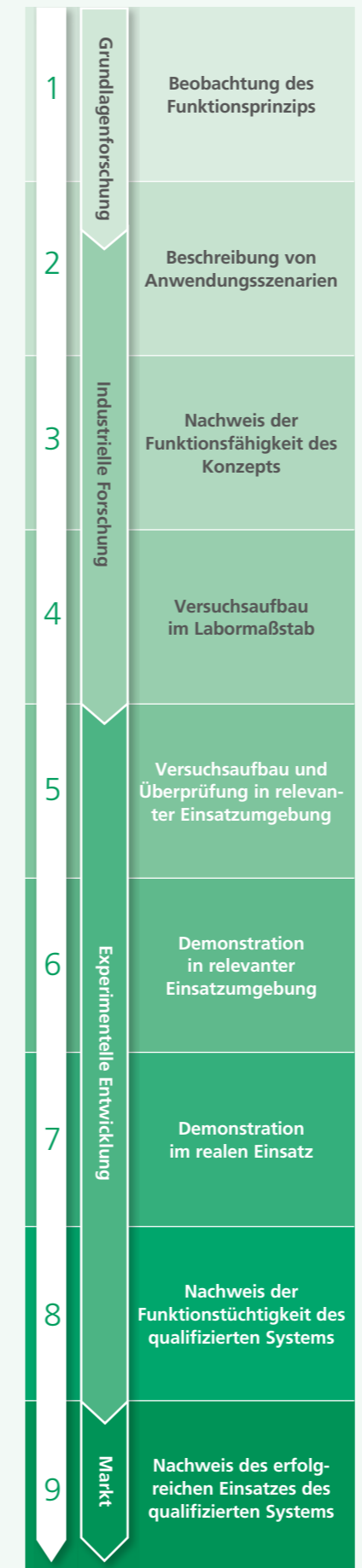
Die Fragen stellte **Michael Müller**. Er ist Redakteur in der DLR-Kommunikation.



Christian Willert nutzt die Laser-Verbrennungsdagnostik bei einer Brennkammer, die im HBK1 eingesetzt wird.

# Wasserstofftestanlagen des DLR-Instituts für Antriebstechnik in Köln

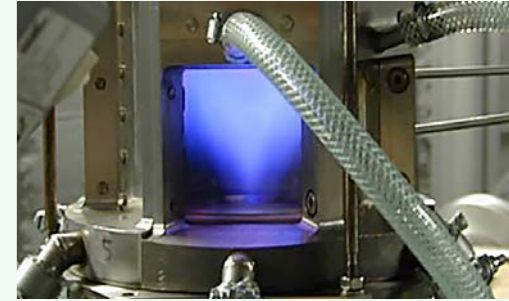
## TECHNOLOGIEREIFEGRADE (TRL)



### ATMOSPHÄRISCHER BRENNKAMMER-PRÜFSTAND

Der atmosphärische Brennkammer-Prüfstand dient zur Erprobung neuer H<sub>2</sub>-Verbrennungstechnologien im frühen Stadium. Es geht darum, mit geringem Aufwand erste Bewertungen von Funktionalität und Potenzialen vorzunehmen. Neben Emissionsmessungen können auch optische Messungen des Strömungsfelds und Reaktionsverhaltens für Brenner und Brennkammern vorgenommen werden.

TRL: 2-3



### EIN-DÜSEN-SEKTOR-PRÜFSTAND (EDS)

Der Ein-Düsen-Sektor-Prüfstand (EDS) geht bei der Erforschung neuer H<sub>2</sub>-Verbrennungstechnologien einen Schritt weiter in Richtung Technologieentwicklung. Die Bedingungen ähneln denen im realen Betrieb. Wasserstoff sowie mit Wasserstoff angereicherte Treibstoffe und Sustainable Aviation Fuels (SAF) kommen hier zum Einsatz. Untersucht wird der Brennereinnahbereich – die sogenannte Primärzone. Auch hier werden optische Messmethoden verwendet, welche die reagierende Strömung nicht beeinflussen.

TRL: 3-4



### DER HOCHDRUCKBRENNKAMMERPRÜFSTAND 1 (HBK1)

Der Hochdruckbrennkammerprüfstand 1 (HBK1) ist das „Bindeglied“ zwischen der Grundlagenforschung und der Demonstration neuartiger Verbrennungsprototypen. Anwendungsgebiete sind Brennkammersysteme sowohl für stationäre als auch für Flug-Gasturbinen. Wie beim EDS werden hier auf H<sub>2</sub> basierende Kraftstoffe und SAF verbrannt und laseroptisch untersucht.

TRL: 4-5



### DIE HOCHDRUCKBRENNKAMMER-PRÜFSTÄNDE 2 UND 5

In den Hochdruckbrennkammerprüfständen HBK2 und HBK5 wird unter realen Betriebsbedingungen geforscht. Die Verbrennungsverfahren für Gasturbinen und Flugantriebe sind in diesem Stadium bereits nahe am serienreifen Produkt. Sowohl im HBK2 als auch im HBK5 besteht große Flexibilität hinsichtlich des Treibstoffes: Neben H<sub>2</sub> und SAF können auch Kerosin, Erdgas, Synthesegas und Ammoniak genutzt werden.

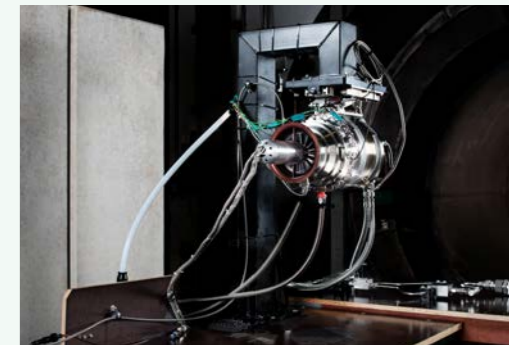
TRL: 5-6



### FUTURE PROPULSION TEST FACILITY

Die Future Propulsion Test Facility befindet sich im Aufbau und soll 2024/2025 einsatzbereit sein. Die Forschung wird sich hier auf die Verwendung von Wasserstoff in Flugtriebwerken konzentrieren. Das Themenspektrum ist auf die Brennstoffaufbereitung fokussiert und beschäftigt sich mit drängenden Fragestellungen von der Lagerung, der Förderung und der Verdampfung flüssigen Wasserstoffs „in luftigen Höhen“ bis hin zur Demonstration gesamter Brennstoffsysteme inklusive kleinerer Triebwerke.

TRL: 3-7



# VERTIKALER START AM HORIZONT DER STADT

Wie urbaner Lufttaxi-Verkehr funktionieren kann

von Michael Müller



Begleiten Sie Martina auf ihrer Reise

*Martina Meyer ist gerade am Flughafen Hamburg-Fuhlsbüttel gelandet. Sie muss direkt weiter in die Innenstadt. Martina schaut auf die Uhr: Mit U- oder S-Bahn benötigt sie für die zehn Kilometer zum Congress Centrum knapp vierzig Minuten. Mit Taxi oder Mietwagen dauert es geringfügig länger, aber nur, wenn sie gut durchkommt – angesichts der momentanen Rush-hour fraglich. Doch seit Kurzem gibt eine praktische Alternative: das Lufttaxi ...*

Zugegeben, dieses Szenario ist eine Zukunftsvision. In der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts könnte sie jedoch Realität werden. An ihrer Umsetzung arbeiten beim DLR insgesamt zehn Forschungsinstitute unter Leitung des Instituts für Flugführung. Das inzwischen abgeschlossene Projekt, in dem das DLR mit der NASA und dem Bauhaus Luftfahrt zusammenarbeitete, heißt HorizonUAM (Urban Air Mobility, städtischer Luftverkehr).

## Luftraumintegration und Netzwerkmanagement

*Martina macht sich auf den Weg zum benachbarten Vertidrom. Von hier aus schrauben sich die elektrisch angetriebenen Lufttaxis in die Höhe. Sie sind in etwa so groß wie ein Kompaktvan und bieten Platz für vier Personen. Mit drei weiteren Fahrgästen, die dasselbe Ziel haben, checkt Martina ein und steigt zu. Ein Pilot oder eine Pilotin ist nicht an Bord, der Flug wird vollautomatisch durchgeführt.*

„Vertidrom“ ist bei HorizonUAM der Sammelbegriff für Start- und Landeflächen von Lufttaxi. Darunter fallen sowohl Vertiports als auch Vertistops. Ein Vertiport ist ein Set von Landepads, das neben Ladestationen auch Kapazitäten für Wartung und Reparaturen besitzt. Hier werden Ersatzteile und Werkzeug vorrätig gehalten und Personen kümmern sich um die Einsatzfähigkeit der Flugtaxi. Vertistops verfügen lediglich über ein Landepad sowie minimale Infrastruktur zur Passagierabfertigung, Wetterüberwachung, Kommunikation und Navigation.

Die Forschenden modellierten die luftseitigen Abläufe am Vertidrom. Dabei berücksichtigten sie mögliche Infrastrukturausfälle und Verspätungen sowie wechselnde Windverhältnisse. Aus der Simulation leiteten sie ein Konzept ab, mit dem man unterschiedliche Startplatz-Entwürfe bewerten und vergleichen kann.

Zu der Frage, wie Vertidrome in die Infrastruktur eines bestehenden Flughafens integriert werden können, führten die Forschenden eine Realzeitsimulation durch. Ergebnis: Lufttaxi-Verkehr auf jetzt schon existierenden Landebahnen ist nur in Zeiten geringen Verkehrsaufkommens möglich. Hierfür gibt es zwei Gründe: Die Tower-Lotsinnen und -Lotsen können lediglich eine begrenzte Anzahl zusätzlicher Vehikel kontrollieren. Daher empfehlen die DLR-Fachleute dort die Einrichtung eines speziellen UAM-Lotsenarbeitsplatzes. Hinzu kommt, dass es auf bestehenden Landebahnen nur wenige freie Zeitslots für weitere Abflüge oder Ankünfte gibt.

Neben dem Vertidrom am Flughafen werden mehrere kleine, über das Stadtzentrum verteilte Vertistops benötigt. Für Hamburg mit knapp zwei Millionen Einwohnenden auf gut 775 Quadratkilometern erstellten die DLR-Fachleute eine Vorhersage auf Basis einer Simulation. Dabei betrachteten sie alle wesentlichen Faktoren – vor allem Fluggeräte und Reisende – als individuell handelnde Einheiten. Die Auswertung ergab einen Gesamtbedarf von 2.800 Flügen pro Tag mit einer Auslastung von bis zu 80 Prozent. Dieser Bedarf kann durch 275 Lufttaxis abgedeckt werden, die zwischen 20 über das Stadtgebiet verteilten Vertidromen zirkulieren. Die Nachfrage wird aber voraussichtlich nicht für alle Vertidrome gleich hoch sein. Deshalb ergibt sich für jeden Start- und Landeplatz eine andere Anzahl an Parkpositionen für Flugtaxi – für Hamburg insgesamt circa 400.



Vertiports sind die entscheidende Infrastruktur, damit in der nahen Zukunft Flugtaxis in Städten unterwegs sein können. Sie bestehen aus mehreren Landepads sowie Infrastruktur für Wartung und Reparatur. Weltweit gibt es zum Beispiel schon Prototypen in Rom, Chicago und Singapur. Ein Vertistop (unten) besteht nur aus einem Landepad.

Auch die Flugzeit kann durch gutes Netzwerkmanagement optimiert werden: Zur Wahl standen zeitslotbasierte Anflüge, wie man sie vom herkömmlichen Flugbetrieb her kennt, und trajektorienbasierte Anflüge. Dabei wird anhand der Informationen „Breitengrad“, „Längengrad“, „Höhe“ und „Zeit“ automatisch eine möglichst direkte Flugbahn berechnet und mit den Flugbahnen der anderen Vehikel in der Umgebung koordiniert. In der Simulation zeigte sich, dass die Flugdauer bei Zeitslotvergabe tendenziell höher ist als bei Trajektorien. Unabhängig vom Verfahren beträgt die Zeitersparnis gegenüber bodengebundenem Verkehr über 30 Prozent auf ausgewählten Routen, wobei Staus, Tunnelsperren und andere Hindernisse im Straßenverkehr in der Simulation noch gar nicht berücksichtigt wurden.

Im Vertidrom checken die Passagiere für den Lufttaxi-Flug ein.



## Akzeptanz durch Passagiere und Bevölkerung

*Nach dem senkrechten Abheben ist die Reise Flughöhe von 150 Meter schnell erreicht. Es geht Richtung Süden, wo immer möglich über unbebautem Gebiet, entlang einer Bahntrasse. Martinas anfängliche Nervosität aufgrund dieser neuen Erfahrung legt sich schnell.*

Bei HorizonUAM erlebten 30 Personen einen Kurztrip mit dem Flugtaxi in einem Kabinensimulator. Eine Virtual-Reality-Brille zeigte den „Flug-gästen“ realitätsnahe Animationen von An- und Abflugmanövern sowie von innerstädtischen Routen. Im Fokus stand ihr Wohlbefinden. Die Auswertung ergab, dass bei nominalen Flugbedingungen die Anwesenheit eines Crewmitglieds an Bord die gefühlte Sicherheit nicht signifikant erhöhte. In Szenarien mit einer überraschenden Umplanung der Route fühlten sich die Probandinnen und Probanden jedoch tendenziell wohler, wenn ein Crewmitglied mit an Bord war.



In diesem Kabinensimulator des DLR-Instituts für Flugführung unternahmen Probandinnen und Probanden einen virtuellen Lufttaxi-Flug.

Die Akzeptanz für diese neue Art der Mobilität spielt auch für die Bevölkerung insgesamt eine große Rolle. Der von Flugtaxis verursachte Lärm kann die Lebensqualität negativ beeinflussen. Zur Geräuscherfassung von unbemannten Luftfahrzeugen wurde eine Smartphone-App entwickelt und erprobt. Diese misst die Lautstärke von Flugobjekten in Dezibel. Zusätzlich kann sie Einschätzungen wie den subjektiven Grad der Lärmbelastung registrieren. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler führten außerdem eine repräsentative Telefonbefragung



Höhepunkt und Abschluss eines drei Jahre dauernden Großprojektes: Im Juli 2023 wurden am DLR-Forschungsflughafen Cochstedt alle wesentlichen Aspekte von Lufttaxi-Flügen „durchgespielt“.

## AM PROJEKT BETEILIGTE DLR-INSTITUTE UND -EINRICHTUNGEN

- Institut für Flugführung (Koordination)
- Institut für Antriebstechnik
- Institut für Flugsystemtechnik
- Institut für Luftverkehr
- Institut für Kommunikation und Navigation
- Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin
- Institut für Physik der Atmosphäre
- Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt
- Institut für Instandhaltung und Modifikation
- Nationales Erprobungszentrum für unbemannte Luftfahrtsysteme

zur Akzeptanz in der deutschen Bevölkerung durch. Die Einstellung der Befragten war dabei abhängig vom Einsatzzweck: Zivile Drohnen, die beispielweise zum Bevölkerungsschutz oder in der Landwirtschaft eingesetzt werden, besitzen derzeit eine tendenziell höhere Akzeptanz als Flugtaxis. Am ehesten können sich die Befragten vorstellen, ein Flugtaxi zu nutzen, wenn es um die Erreichbarkeit ländlicher Regionen mit schlechter Anbindung an den öffentlichen Nahverkehr geht.

### Sicherheit im automatisierten Flug

*Schon kommt der Fernsehturm in Sicht, lange kann es nicht mehr dauern. Unten auf der Bundesstraße 433 währenddessen: Unfall, Stau, Bildung einer Rettungsgasse für Einsatzfahrzeuge. Wenig später wechseln die sechs schwenkbaren Rotoren des Lufttaxis in den Landemodus, der vertikale Abstieg über der Binnenalster wird autonom eingeleitet.*

Zukünftig sollen Flüge von Drohnen und Lufttaxis außerhalb der Kontrollzone von Flughäfen über das System „U-space“ ohne Beteiligung von Lotsinnen oder Lotsen koordiniert werden. Damit der Betrieb über dicht besiedeltem Gebiet sicher ist, müssen Flugtaxis untereinander zuverlässig und in Echtzeit kommunizieren, um nicht zu kollidieren. Das DLR-Team entwickelte ein Ad-hoc-Kommunikationssystem, das auf die speziellen Anforderungen des städtischen Luftverkehrs zugeschnitten ist. Zur Erprobung wurde eine experimentelle Plattform aufgebaut, die im Praxistest von zwei Hexakoptern angefliegen wurde. Die Kollisionsvermeidung und die gesicherte Übertragung von bodengebundenen Navigationsdaten wurden hier erfolgreich demonstriert.



Wenn Flugtaxis autonom unterwegs sein sollen, müssen sie während des Landevorganges Personen auf dem Landepad selbstständig erkennen und das Kontrollzentrum warnen. Dann kann die Landung verzögert werden, bis der Landeplatz frei ist.

In der Simulation waren die Flugtaxis autonom unterwegs. In der Realität werden die ersten Flugtaxis noch von Pilotinnen oder Piloten an Bord gesteuert. Autonome Funktionen können auf längere Sicht mehr und mehr ihrer Aufgaben übernehmen. So wurde in HorizonUAM eine bordseitige Autonomiefunktion entwickelt und getestet. Sie basiert auf künstlicher Intelligenz beziehungsweise auf Machine Learning. Das Programm hat mithilfe tausender Trainingsbilder gelernt, Menschen aus verschiedenen Höhen und Perspektiven zu erkennen. Dies ist wichtig, damit das Flugtaxi im Gefahrenfall ausweichen oder die Landung verzögern kann. Außerdem entwickelten die Forschenden eine Software, die überwacht, ob der Bordcomputer die richtigen Entscheidungen trifft.

### Lufttaxis: Wie ist die Marktlage?

*Nach gut zehn Minuten Flug setzt der Multikopter auf dem Landepad des Vertistops am Rand der Binnenalster auf. Eine kleine Erfrischung noch, dann geht es fußläufig weiter zum benachbarten Congress Center. Martina wird es zu ihrem Termin dort rechtzeitig schaffen. Der Preis von circa 60 Euro für den schnellen und umweltverträglichen Transport hat sich aus ihrer Sicht voll bezahlt gemacht. Zudem war es ein ganz besonderes Erlebnis, dicht über der Hafenmetropole zu schweben!*

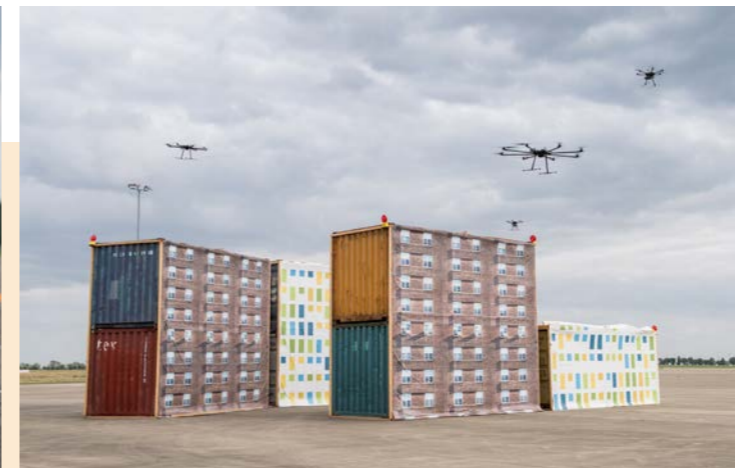


Ansicht der U-Fly-Software, einer Entwicklung des DLR-Instituts für Flugführung. Sie dient zur Kontrolle und Überwachung unbemannter Fluggeräte (kleinere UAV oder Lufttaxis). Hier können Routen geplant, Flüge freigegeben oder umgelenkt werden.

Mit dem Abschluss von HorizonUAM ist der Themenkomplex städtische Luftmobilität noch nicht zu Ende erforscht. Insbesondere die kostenintensiven Bereiche Infrastruktur, Luftverkehrsmanagement und Vehikelpreis bedürfen weiterer Untersuchung. Für die nächsten Schritte soll zum Beispiel am DLR-Forschungsflughafen Cochstedt ein Demonstrator für einen Vertiport errichtet werden. Weitere Projekte sind in Vorbereitung.

Aus Sicht der Kundschaft darf die finanzielle Hürde für die Nutzung eines Lufttaxis nicht zu hoch liegen. Für zukünftige Betreibende hingegen steht die Rentabilität im Mittelpunkt. Um beides in Einklang zu bringen, kalkulierten die Forschenden einen Preis zwischen vier und acht Euro pro geflogenem Kilometer. Ein weiterer Lerneffekt: Kurze Anfahrten und Zugänge zu den Vertidromen sind ebenfalls essenzielle Treiber für die Nachfrage. Weltweit sollte genug Marktpotenzial vorhanden sein. Außer Hamburg haben die Forschenden gut 200 weitere Städte identifiziert, in denen der Einsatz von Lufttaxis um 2050 herum realistisch sein könnte.

Michael Müller ist Redakteur in der DLR-Kommunikation.



Kleine Multikopter repräsentierten Lufttaxis, Schiffscontainer simulierten die Häuserschluchten Hamburgs im Maßstab eins zu vier.

# ALLES, WAS SCHWINGT

Forschung für vibrationsarme Hubschrauber  
von Johannes Knebusch und Marc Böswald



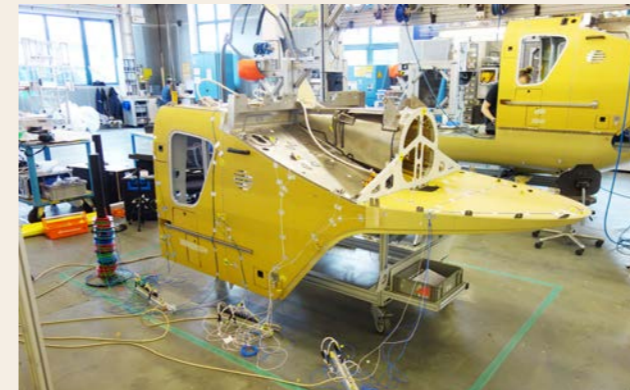
Die Airbus Helicopters H135 ist ein leichter zweimotoriger Mehrzweckhubschrauber.

**O**b bei der Bergrettung, bei der Brandbekämpfung oder bei Polizeieinsätzen – Hubschrauber kommen in den verschiedensten Bereichen zum Einsatz. Im Gegensatz zu Flugzeugen können sie senkrecht starten und landen. Dank ihrer Leichtbauweise haben sie eine hohe Flugleistung und geringe Betriebskosten. Einen Nachteil bringen die wendigen Flieger jedoch mit sich: Aufgrund ihrer Leichtbaustruktur sind sie anfällig für mechanische Schwingungen. Starke Schwingungen erschweren die Bedienbarkeit des Hubschraubers und können bei Missionen wie heiklen Krankentransporten oder Luftaufklärungen mit hochauflösenden Kameras stören. Heute werden Hubschrauber zu großen Teilen am Computer entworfen. Die zugrunde liegenden Modelle müssen möglichst realitätsgetreu sein. Um das zu erreichen, begleiteten Forscherinnen und Forscher aus dem DLR-Institut für Aeroelastik den Bau eines Helikopters und untersuchten seine Teile Stück für Stück für Stück ...

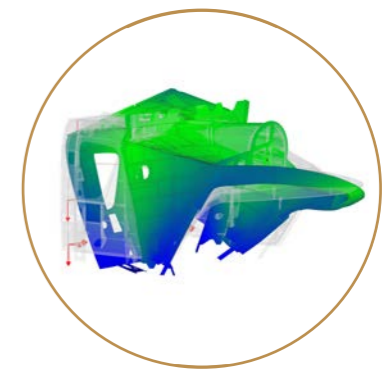
## Wie Schwingungen sichtbar werden

Vibrationen entstehen infolge dynamischer Rotorlasten im Wesentlichen durch die Queranströmung des Hauptrotors und lassen sich deshalb nicht völlig vermeiden. Von dort können sie sich über die komplette Struktur des Fluggeräts ausbreiten. Um einen möglichst vibrationsarmen Hubschrauber zu entwickeln, müssen die Fachleute die entsprechenden Kräfte im Voraus berechnen. Heutzutage nutzen sie dazu computerbasierte

Verfahren wie CFD oder MKS (siehe Glossar). Im zweiten Schritt simulieren die Entwicklerinnen und Entwickler den Einfluss der Schwingungen auf die Hubschrauberzelle. Das Simulationsprogramm zeigt, wie sich die Kräfte innerhalb der Zelle ausbreiten und an welchen Stellen die Vibrationen am größten sind. Auf Grundlage dieser Simulation werden dann Maßnahmen entwickelt, die die Vibrationen gezielt reduzieren. Allerdings sind die Modelle, die den Berechnungen zugrunde liegen, bislang noch nicht genau genug.



Vor Ort testeten die Forschenden die Vibrationen des Hubschraubers in verschiedenen Bauzuständen. Daraus erstellten sie verbesserte Simulationsmodelle.



## Das Ziel: ein Modell, ganz nah an der Realität

Im Projekt eVolve schlossen sich Forschende des DLR-Instituts für Aeroelastik sowie Entwicklerinnen und Entwickler von Airbus Helicopters Deutschland zusammen, um dies zu ändern. Ihr Ziel war es, digitale Hubschraubermodelle so zu verbessern, dass diese die Vibrationen so realitätsgetreu wie möglich abbilden. Solche Berechnungsmodelle werden bereits in der Entwurfsphase aufgebaut. Für den Aufbau der Berechnungsmodelle nutzen die Ingenieurinnen und Ingenieure CAD- und FEM-Modelle und treffen Annahmen zum mechanischen Verhalten der Konstruktion. Nach der Entwurfsphase bauen sie einen Prototyp. Im Standschwingungstest wird das strukturdynamische Verhalten untersucht. Die Ergebnisse des Tests vergleichen sie mit den Ergebnissen der FEM-Simulation. Sind die Abweichungen zwischen Test und Simulation zu groß, müssen die Berechnungsmodelle an die Realität angepasst werden. Ein vollständiger Hubschrauber ist sehr komplex und es gibt viele mögliche Stellen, an denen Abweichungen auftreten können. Diese sind meist auf unzureichende Annahmen des mechanischen Verhaltens zurückzuführen und werden durch den Vergleich mit Testdaten überprüft und verbessert.

## GLOSSAR

### CFD-Verfahren:

CFD steht für Computational Fluid Dynamics (Deutsch: numerische Verfahren zur Strömungsberechnung). Es ist die Umsetzung der Strömungsmechanik als Computerprogramm. Die zugrunde liegenden mathematischen Modelle sind die Navier-Stokes-Gleichungen, Euler-Gleichungen und Potenzialgleichungen.

### MKS:

Die Mehrkörpersimulation (MKS) bildet das Zusammenspiel mehrerer mechanischer Bauteile ab. Mithilfe dieser Computersimulation können die Forschenden komplizierte Bewegungsabläufe berechnen und dynamische Reaktionen oder die Leistung von beweglichen Bauteilen vorhersagen.

### CAD:

Beim CAD (Computer Aided Design) werden am Computer mithilfe entsprechender Software Entwürfe, Modelle, Konstruktionen und technische Zeichnungen erzeugt. Das vereinfacht die Konstruktion oder technische Zeichnungen.

### FEM:

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein Verfahren, das häufig zur Beantwortung mechanischer Fragestellungen bei Strukturen mit komplexer Geometrie verwendet wird. Die Strukturen werden in kleinere Bereiche, sogenannte finite Elemente, unterteilt, für die sich leichter entsprechende Gleichungen aufstellen lassen.





Blick in die Endmontagelinie von Airbus Helicopters in Donauwörth



Das Team sichtet die Daten der Vibrationsmessungen (Bild unten)

Im eVolve-Projekt untersuchte das Team einzelne Komponenten, die in der Montagelinie nach und nach zu einem kompletten Hubschrauber zusammengesetzt werden. Somit können Berechnungsfehler bereits frühzeitig und in kleineren Bauteilen erkannt werden. Sie testeten die Bauteile aber nicht etwa im Labor des DLR in Göttingen, sondern in Donauwörth. Hier werden die Helikopter von Airbus gebaut. Zunächst wählten sie einen Kandidaten, den sie über die ganze Fertigung begleiten würden. Dieser sollte möglichst repräsentativ sein. Sie entschieden sich für einen Helikopter ohne zusätzliche An- oder Aufbauten, denn mitunter sind die Fluggeräte neben der Basisausstattung noch mit Seilwinden, Radar, Kameras, Krankentragen oder Ähnlichem ausgerüstet.

Der Baufortschritt wirkt sich auf das Schwingungsverhalten eines Hubschraubers aus. An manchen Montagestationen ändern sich die Masse oder die Steifigkeit der Gesamtstruktur besonders stark. Deshalb sind diese strukturdynamisch besonders relevant. Hier führte das DLR-Team Messungen durch. „Für uns war es eine ganz besondere Situation,

mittlen im laufenden Fertigungsbetrieb Experimente zu machen. Normalerweise messen wir in einem Hangar beziehungsweise im Labor, wo wir alles kontrollieren können. Das war jetzt ein bisschen anders“, sagt Johannes Knebusch vom DLR-Institut für Aeroelastik.

An jeder Station musste sich das Team auf neue Situationen einstellen: Während die Forschenden die Vibration der Bauteile an der ersten Montagestation noch mit einem Impulshammer anregen konnten, weil es nur wenige Teile waren, mussten sie am Ende elektrodynamische Shaker einsetzen, wie sie auch für Vibrationsmessungen an großen Flugzeugen genutzt werden. Für die Experimente hing der Hubschrauber im jeweiligen Bauzustand weich an Gummiseilen. Die Seile gewährleisteten, dass stets dieselben Randbedingungen herrschten und die Ergebnisse miteinander vergleichbar waren. „Hinzu kam auch, dass wir den Fertigungsbetrieb mit unseren Experimenten nicht aufhalten wollten, was uns gut gelungen ist. Außerdem waren unsere Partner sehr flexibel, was die Arbeit extrem erleichtert hat“, ergänzt Marc Böswald, Abteilungsleiter im DLR-Institut für Aeroelastik.



Mit solchen Shakern wird der im Testgestell aufgehängte Hubschrauber am Rotorkopf zum Schwingen angeregt.

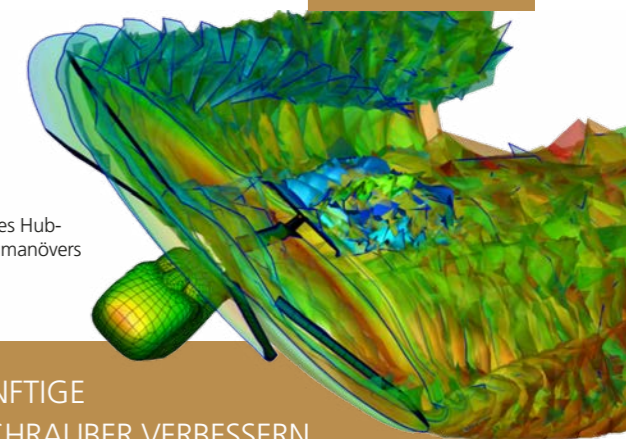
Aus den Ergebnissen erstellten die Forschenden ein dynamisches Modell für den jeweiligen Bauzustand und verglichen es mit den vorhandenen Simulationsmodellen. Dadurch wurde sichtbar, wo in den Modellen Berechnungsfehler waren. Insgesamt führte das Team an zehn Montagestationen Messungen durch. Bei den ersten Tests setzten sie nur rund 30 Sensoren ein, an der letzten Station waren es schon mehr als 200.

Der Vergleich mit Testdaten bildet die Grundlage dafür, vorhandene Simulationsmodelle anzupassen und weiter zu verbessern. Ein weiterer Vorteil ist, dass Simulationen aus frühen Stadien Schwingungsformen einzelner Bauteile zeigen. Diese können dazu genutzt werden, gezielt Modellfehler in verschiedenen Baugruppen aufzuspüren. Später, wenn der komplette Helikopter getestet wird, sind diese Fehler nicht mehr erkennbar. In Zukunft möchte Airbus dieses Vorgehen auch bei anderen Hubschraubertypen anwenden, um auch deren Simulationsmodelle zu verbessern – ein weiterer wichtiger Schritt hin zur Entwicklung vibrationsarmer Hubschrauberzellen.

**Johannes Knebusch** bearbeitet im DLR-Institut für Aeroelastik das Projekt eVolve und koordinierte die Tests in der Montagelinie. **Marc Böswald** leitet im Institut die Abteilung für Strukturdynamik und Systemidentifikation, er war maßgeblich an Planung und Durchführung der Tests beteiligt.



Aktuelle Aeroelastik-Themen finden Sie hier: [dlr.de/ae](https://dlr.de/ae)

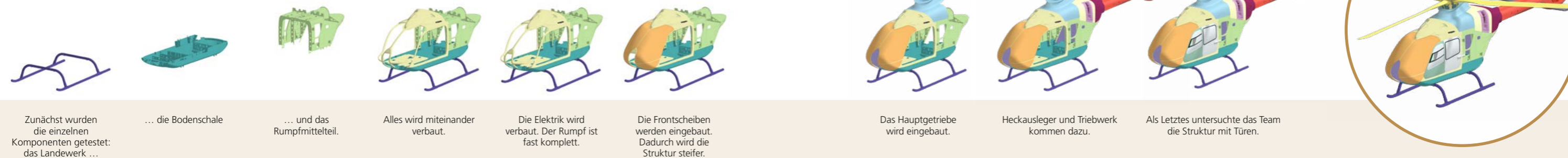


Simulation eines Hubschrauber-Flugmanövers

## ZUKÜNFTIGE HUBSCHRAUBER VERBESSERN

Flugverhalten, Strukturbelastungen, Vibrationen, Passagierkomfort, aber auch der Lärm eines Hubschraubers werden durch die sogenannte Aeromechanik bestimmt. Während Aerodynamik das Verhalten in Bezug auf die Luftkräfte, wie Auftrieb und Widerstand, beschreibt, bezeichnet Aeromechanik das Zusammenspiel von Aerodynamik, Flugmechanik und Strukturdynamik. Sie spielt bei der Entwicklung neuer Hubschrauberkonzepte eine wichtige Rolle. Das Projekt eVolve hat zum Ziel, die Vorhersage der Aeromechanik zu verbessern. Das reduziert das Entwicklungsrisiko und die Zeit bis zur Markteinführung, sowohl bei klassischen Hubschraubern als auch bei neuartigen Drehflüglerkonzepten wie Lufttaxis. Unter der Leitung von Airbus Helicopters Deutschland forscht das DLR zusammen mit Airbus Defence & Space, der Universität Stuttgart sowie der Technischen Universität München in dem Projekt. Die DLR-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler entwickeln in eVolve unter anderem Simulationsmethoden, mit denen die Aeromechanik von Hubschrauberrotoren besser modelliert werden kann, sie erstellen eine Datenbank, die die Schallabstrahlung von Lufttaxis vorhersagt, und sie entwickeln Ansätze zur Vorhersage und Dämpfung von Vibrationen. Seitens des DLR sind die Institute für Aerodynamik und Strömungstechnik, für Aeroelastik, für Flugsystemtechnik sowie das Institut für Softwaretechnologie beteiligt. Das Projekt ist im September 2021 gestartet und endet im August 2024.

## FORSCHUNG WÄHREND DER MONTAGE



# AUF LEISEN FLÜGELN

Eine Ausgründung aus Landsberg setzt Meilensteine beim elektrischen Fliegen

von Bernadette Jung



Der Elektra Trainer im Flug

**F**ür Dr. Konstantin Kondak verleiht die elektrische Mobilität dem klassischen „Ausflug“ eine unerwartet wörtliche Wendung. „Mit den neuen Technologien kann man ohne Reue, einfach nur zum Spaß fliegen“, freut sich der Robotiker und E-Flugzeug-Entwickler. Zusammen mit dem erfahrenen Flugzeugingenieur und E-Flug-Pionier Calin Gologan leitet er die DLR-Ausgründung Elektra Solar. Dort arbeiten zwölf Mitarbeitende an solar-elektrisch angetriebenen Flugzeugen. Ihr neuester Coup ist der Elektra Trainer, der nun in die Serienproduktion gestartet ist. Wie seine Geschwister ist er energieneutral unterwegs und dabei so leise wie mäßiger Regen.

Der Elektra Trainer gehört zur Klasse der Ultraleichtflugzeuge, kann teil- und vollautonom geflogen werden und ist insbesondere für das Pilotentraining geeignet. Anfang 2023 erhielt er seine Zulassung – als erstes elektrisches Ultraleichtmotorflugzeug in Deutschland. Es geht also nicht nur um schöne Ausflüge. Es geht um die Gestaltung einer neuen Mobilität und eine Spitzenposition im internationalen Wettbewerb.

Neben klassischen Luftfahrtthemen weisen hier Technologien aus Robotik und Raumfahrt den Weg. Elektra Solar ist ein Spin-off des DLR-Instituts für Robotik und Mechatronik in Oberpfaffenhofen und wurde 2013 vom ehemaligen Institutsdirektor Prof. Gerd Hirzinger, Calin Gologan und Dr. Konstantin Kondak gegründet. Der Wissenschaftler Kondak leitet die Forschungsgruppe für Flugrobotik und hatte den Drang, die gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis umzusetzen. Die Freude daran treibt ihn bis heute an. Sein großer Traum: Menschen per E-Flugtaxi bewegen.

## Städtetrip gefällig?

Im Rahmen einer Demonstration flog der ausdauernde Zweisitzer im Herbst 2023 rein elektrisch 313 Kilometer von Oberpfaffenhofen nach Bern. Mit der Reichweite und Flugzeit von drei Stunden hätten es auch Ziele wie Venedig, Wien, Straßburg, Frankfurt am Main oder

Prag sein können. Weiterhin meisterte der E-Flieger Schlechtwetter und hätte den gesamten Flug ebenso vollautonom durchführen können, einschließlich einer präzisen Landung. Die Algorithmen für sicheres und effizientes autonomes Fliegen, die in Kooperation mit dem Institut entwickelt wurden, bilden einen wichtigen Baustein für Flugtaxi von morgen. Das Pilotenassistenzsystem im Elektra Trainer nutzt die ausgeklügelte Software bereits heute. „Ein Roboter am Boden kann sich bei Schwierigkeiten einfach ausschalten. Beim Fliegen ist das keine Option“, erklärt der Entwickler. Die Systeme erfüllen daher ein besonderes Maß an Sicherheit – grundlegend auch für den künftigen Transport von Passagieren. Für den nachhaltigen Betrieb hat sich das Team ein besonderes Feature ausgedacht: So gehört zum Elektra Trainer ein Transportanhänger, der optional mit Solarzellen ausgestattet wird. Die mobile Ladestation bringt rund 400 Flugstunden im Jahr und dient zugleich als „Garage“. Damit sparen sich Flugbegeisterte nebenbei die Kosten für einen der raren Hangarplätze.



Elektra One beim Landen auf einer fahrenden Schienen-Plattform. Die Mission wird durch den Autopiloten durchgeführt, der Pilot überwacht und greift nur im Fehlerfall ein.



Calin Gologan (links) und Dr. Konstantin Kondak, Gründer von Elektra Solar

## Am Puls der Forschung

Außergewöhnlich ist, dass das kleine Unternehmen aus Landsberg am Lech aus eigener Kraft gewachsen ist. Hersteller von Ultraleichtflugzeugen haben üblicherweise einen finanzkräftigen Konzern im Rücken, der vor allem längere Entwicklungszeiten abfedert. Was ist also das Erfolgsgeheimnis?

Ein Schlüssel ist Elektra Solars Innovationskraft, die sich direkt aus der Forschung speist. Auch nach zehn Jahren ist das Spin-off eng mit dem DLR-Institut verbunden. Kondak arbeitet zu 50 Prozent am DLR, ebenso sind einige seiner Mitarbeitenden anteilig in Oberpfaffenhofen beschäftigt. Über gemeinsame Projekte haben das Unternehmen und das DLR über Institutsgrenzen hinweg ihre Kompetenzen erweitert. „Es ist eine Win-win-Situation. Wir entwickeln zusammen Technologien, bauen in der Firma zeitnah ein entsprechendes Flugzeug und das Institut sammelt einzigartiges Know-how.“

Eine Zusammenarbeit, die gesellschaftliche Herausforderungen am Puls der Zeit adressiert, wie Prof. Alin Albu-Schäffer, Direktor des DLR-Instituts für Robotik und Mechatronik, bekräftigt: „Ich freue mich sehr, dass unsere mechatronische Antriebsentwicklung ein so breites Anwendungsfeld findet und so zu mehr Nachhaltigkeit in der Luftfahrt beitragen kann.“ Gemeinsam mit dem Institut entwickelt Elektra Solar ein leistungsstarkes elektrisches Antriebssystem. Dieses wird das Start-up für E-Flugzeuge mit vier bis sechs Sitzen für den kommerziellen Passagiertransport weiterentwickeln. Das Projekt ist in das bayerische Luftfahrtforschungsprogramm „Holistische Air Mobility Initiative Bayern“ eingebettet. Die wissenschaftlichen Ergebnisse wird Elektra Solar verwerten, sodass sie direkt in den Wirtschaftskreislauf fließen.

## Das künftige Normal

„Am DLR haben wir einmalige Bedingungen, um unternehmerische Ideen zu verwirklichen – man muss nur entschlossen handeln“, sagt



Unbemannte Version von Elektra Two beim Landen. Für ein stärkeres Abbremsen aktiviert das Autopilotensystem einen Fallschirm – ebenfalls eine Entwicklung von Elektra Solar.



Weitere Informationen unter [elektra-solar.com](http://elektra-solar.com)

Kondak. Unterstützung bietet hier der Bereich Innovation, Transfer und wissenschaftliche Infrastrukturen. Für Nachfolgende wünscht er sich, dass Ausgründungen und Kooperationen als etwas Normales gesehen werden: „Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sollte das Ausgründen gleich zu Beginn als Karriereweg angeboten werden. Wenn Schritte wie Promotion, Gruppen- oder Abteilungsleitung erreicht sind, sollte auch die Ausgründung eine Standardoption sein.“ Dabei geht es ihm nicht um finanzielle Hilfe, sondern um stärkere Aufklärung, Informationen und die Motivation, den Schritt zur Ausgründung zu wagen.

Der Höhenflug des Spin-offs begann mit solar-elektrischen Stratosphärenflugzeugen und erreicht mit dem Elektra Trainer nun einen neuen Standard für elektrische Motorflugzeuge. Wenn Flugtaxi künftig zu unserem Alltag gehören und wir günstiges Breitband-Internet über Höhenplattformen beziehen, könnte Elektra Solar drinstecken. Daran arbeitet Kondak mit seinen Kollegen seit zehn Jahren als Unternehmer und seit mehr als zwanzig Jahren als Forscher – mit neuen Ideen, Konzepten und Leidenschaft für die nächsten Jahrzehnte.

**Bernadette Jung** ist Redakteurin in der DLR-Pressestelle.



Der Elektra Trainer ist mit unter 50 Dezibel so leise, dass die Zulassungsstelle zuerst dachte, die Messinstrumente seien defekt. Die Lärmmessung wurde dreimal wiederholt, um das Ergebnis zu verifizieren.

## DIE ELEKTRA-SOLAR-FLOTTE

Neben dem Elektra Trainer hat Elektra Solar auch andere Konzepte entworfen.

**ELEKTRA ONE:** Vorgänger des Elektra Trainer. Der elektrisch betriebene Einsitzer hatte seinen Erstflug im März 2011. Als besondere Herausforderung meisterte er im Sommer 2015 einen Alpenüberflug.

**ELEKTRA TWO:** Die mit Solarstrom betriebene Höhenplattform hat eine Spannweite von 27 Meter. Sie kann bemannt und unbemannt geflogen werden.

**ELEKTRA VTOL:** Eine elektrische VTOL-Drohne mit Gimbal-Kamera und zwei Stunden Flugzeit – die Kameradaten werden in Echtzeit durch eine algorithmische Pipeline in einer Cloud verarbeitet. Sie hat eine Spannweite von 2,5 Meter.

# WAS WIRKT WIRKLICH?

Klinische Studien schlagen die Brücke zwischen medizinischer Grundlagenforschung und Praxis

Interview mit Dr. Jens-Jörg Schnorr und Dr. Eva Müller-Fries



**In der medizinischen Forschung sind klinische Studien der entscheidende Baustein, wenn es darum geht, festzustellen, welche Therapien wirklich wirken. Seit 20 Jahren begleitet der DLR Projektträger im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) die Förderinitiativen für klinische Studien. Dr. Jens-Jörg Schnorr, Bereichsleiter Gesundheit, und Dr. Eva Müller-Fries, Leiterin der Koordinationsgruppe „Klinische Studien“, zeigen, welchen Nutzen klinische Studien haben und welche aktuellen Entwicklungen es gibt.**

## Warum sind klinische Studien so wichtig?

**Dr. Jens-Jörg Schnorr:** Bevor neue Therapien tatsächlich bei Patientinnen und Patienten eingesetzt werden dürfen, muss ihre Wirksamkeit wissenschaftlich nachgewiesen werden. Klinische Studien erbringen den entscheidenden Praxistest: Was wirkt wirklich? Und haben die Patientinnen und Patienten einen Nutzen davon? Diese Forschungsarbeiten leisten einen entscheidenden Beitrag zur Überführung von Ergebnissen der Grundlagenforschung in die praktische Anwendung. Hier wird direkt mit Patientinnen und Patienten geforscht. Deshalb unterliegen diese Studien strengsten wissenschaftlichen und ethischen Standards. Diese im Blick zu behalten, gehört zu unseren Aufgaben.

**Das BMBF fördert sogenannte Investigator Initiated Trials – also Studien, die von forschenden Ärztinnen und Ärzten selbst initiiert werden. Was ist das Besondere daran?**

**Dr. Eva Müller-Fries:** Sie haben einen direkten Bezug zur Praxis, ohne dass wirtschaftliche Interessen dahinterstehen. Häufig sind die Ergebnisse relevant, um die Versorgung zu verbessern, aber es lassen sich keine direkten wirtschaftlichen Gewinne damit erzielen. Die Bandbreite der Themen ist groß, weshalb unser Team viel eigene wissenschaftliche und methodische Expertise einbringt, um die Projekte angemessen zu begleiten. Außer um Studien zu neuen Therapien von sogenannten

*„Die Bandbreite der Themen ist groß, weshalb unser Team viel eigene wissenschaftliche und methodische Expertise einbringt, um die Projekte angemessen zu begleiten.“*

**Dr. Eva Müller-Fries**  
Leiterin Koordinationsgruppe „Klinische Studien“

Volkskrankheiten wie Krebs oder Diabetes geht es hier auch um Forschungsprojekte, die Seltene Erkrankungen mit nur wenigen Betroffenen in den Blick nehmen. Auch „Drug Repurposing“ steht oft im Fokus – also die Suche nach neuen Anwendungsgebieten für bereits zugelassene Arzneimittel. Und häufig geht es auch darum, ob Therapien reduziert werden können oder sogar verzichtbar sind.

## Über welche Erfolge freuen Sie sich?

**Schnorr:** Mittlerweile blicken wir auf 137 klinische Studien und 164 systematische Reviews, die im Rahmen der Förderrichtlinien „Klinische Studien“ beziehungsweise „Klinische Studien mit hoher Relevanz für

*„Bereits drei Jahre nach Abschluss dieser Studien wurde ein nennenswerter Anteil der Forschungsergebnisse in die Regelversorgung übernommen beziehungsweise in medizinischen Leitlinien aufgegriffen.“*

**Dr. Jens-Jörg Schnorr**  
Bereichsleiter Gesundheit

die Patientenversorgung“ mit über 250 Millionen Euro vom BMBF gefördert wurden. Eine von uns initiierte Umfrage unter den Projektleitungen zeigte: Bereits drei Jahre nach Abschluss dieser Studien wurde ein nennenswerter Anteil der Forschungsergebnisse in die Regelversorgung übernommen beziehungsweise in medizinischen Leitlinien aufgegriffen. Damit haben die vom BMBF geförderten klinischen Studien die Versorgungslandschaft in Deutschland in den vergangenen Jahren nachhaltig verändert.

**Dr. Jens-Jörg Schnorr** unterstützt die Forschungsförderung klinischer Studien seit 20 Jahren – erst als wissenschaftlicher Referent, dann als Abteilungsleiter und jetzt als Leiter des Bereichs Gesundheit im DLR Projektträger. Der erfolgreiche Transfer von der Theorie in die Praxis begeistert ihn immer wieder aufs Neue.



**Dr. Eva Müller-Fries** ist wissenschaftliche Referentin im DLR Projektträger und leitet die Koordinationsgruppe „Klinische Studien“. Seit 15 Jahren setzt sie verschiedene Fördermaßnahmen im Bereich der klinischen Forschung um. Die Patientenbeteiligung liegt ihr besonders am Herzen.

**Müller-Fries:** Ich gebe hierzu mal ein Beispiel: Manche der erfolgreich abgeschlossenen Projekte zeigen, dass auch der Ansatz „Weniger ist mehr“ einen Platz in der modernen Medizin verdient. Eine Studie untersuchte Therapien für Frauen mit leichten Harnwegsinfektionen. Die Forschenden konnten nachweisen, dass die Mehrheit der betroffenen Frauen auch mithilfe eines pflanzlichen Arzneimittels wieder gesund wird. Das spart Antibiotikaverordnungen und hilft, Resistenzen zu vermeiden. Ich möchte ein weiteres erfolgreiches Ergebnis aus dem Bereich der Seltene Erkrankungen nennen: Hier zeigten Forschende, dass das eigentlich als Blutdrucksenker eingesetzte Medikament Ramipril das Fortschreiten des sogenannten Alport-Syndroms um viele Jahre verzögern kann. Kinder, die von dieser Erkrankung betroffen sind, leiden unter einer Vernarbung des Bindegewebes der Niere. Wenn Ramipril rechtzeitig eingesetzt wird, haben diese Kinder die Chance auf ein Leben ohne Dialyse.

## Nichts bleibt, wie es ist – welche Perspektiven und Entwicklungen stehen an?

**Müller-Fries:** Es gibt in diesem Feld viele Herausforderungen, aber auch spannende Perspektiven. Die aktive Einbindung von Patientinnen und Patienten, ihren Angehörigen sowie weiteren relevanten Zielgruppen zählt dazu: Wenn nicht mehr „über“, sondern „mit“ den Betroffenen geforscht wird, kann dies entscheidend dazu beitragen, die Qualität klinischer Studien zu erhöhen, und ihre Ergebnisse relevanter machen. Wir haben diese Entwicklung früh aufgenommen und beispielsweise eine entsprechende Schulung für Forschende konzipiert sowie eine frei zugängliche Handreichung zum Thema veröffentlicht.

Die Fragen stellte **Dr. Claudia von See**, Fachkommunikation Bereich Gesundheit, DLR Projektträger.



**Mehr zum Thema?** In einem Videointerview blickt Dr. Jens-Jörg Schnorr, Leiter des Bereichs Gesundheit im DLR Projektträger, auf 20 Jahre klinische Studien:

• [s.dlr.de/videointerview-klinische-studien](https://s.dlr.de/videointerview-klinische-studien)



# AUS DEM ARCHIV

Im Zentralen Archiv des DLR lagern über 50.000 Dokumente. Darunter sind einige Schätze vergraben. Diese Rubrik begibt sich auf Spurensuche mitten hinein in die Flut von Bildern, Schriftstücken, Urkunden und Texten, um diese zu heben. Der erste Teil dieser Folge handelt von außergewöhnlicher Forschung in Windkanälen nach dem Ersten Weltkrieg.



## VOM AUTOMOBIL BIS ZUR ZUGBREMSE

Aerodynamische Forschung unter den Restriktionen des Versailler Friedensvertrags

von Dr. Jessika Wichner

**N**achdem die Kampfhandlungen des Ersten Weltkriegs am 11.11.1918 beendet waren, wurde am 28.06.1919 der sogenannte Versailler Friedensvertrag unterzeichnet. Er hatte weitreichende Auswirkungen auf die Luftfahrt im Deutschen Reich: Bis 1922 waren sowohl die Luftfahrtforschung als auch der Bau von leistungsstarken Flugzeugen und Flugmotoren verboten. Dementsprechend machten sich die Forschenden auf die Suche nach neuen Einnahmequellen, um Forschungsanlagen und Mitarbeitende zu finanzieren ...

Das Luftfahrtforschungsverbot hatte einschneidende Auswirkungen auf die beiden im Deutschen Reich befindlichen Luftfahrtforschungseinrichtungen, die Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) in Berlin-Adlershof und die Aerodynamische Versuchsanstalt (AVA) in Göttingen. Waren bisher vorrangig Luftschiffmodelle, Flugzeuge und Flugmotoren in den Windkanälen von DVL und AVA untersucht worden, so fanden in den 1920er Jahren eine Vielzahl von Studienobjekten Einzug in die Luftfahrtforschungseinrichtungen.

### Automobile und Schienenfahrzeuge

1921 ließ Edmund Rumpler (1872–1940) seinen sogenannten Rumpler-Tropfenwagen im Windkanal der AVA untersuchen. Rumpler hatte bis zum Ende des Ersten Weltkriegs Flugzeuge konstruiert und sich danach auf den Automobilbau verlegt. Er wusste, dass sich die aerodynamische Forschung auch auf bodengebundene Fahrzeuge übertragen ließ. Auch andere Firmen, beispielsweise Daimler, erkannten den Wert von professionell durchgeführten Experimenten im Windkanal und ließen in den 1920er und 1930er Jahren eine Reihe von Rennwagenmodellen in der AVA testen.

Ein weiteres Transportmittel, das nach dem Ersten Weltkrieg Einzug in die AVA hielt, war das Schienenfahrzeug. So führte der stellvertretende Leiter der AVA, Albert Betz (1885–1968), bereits um 1920 Reihenummessungen an Lokomotiven mit und ohne Leitbleche zur Reduzierung

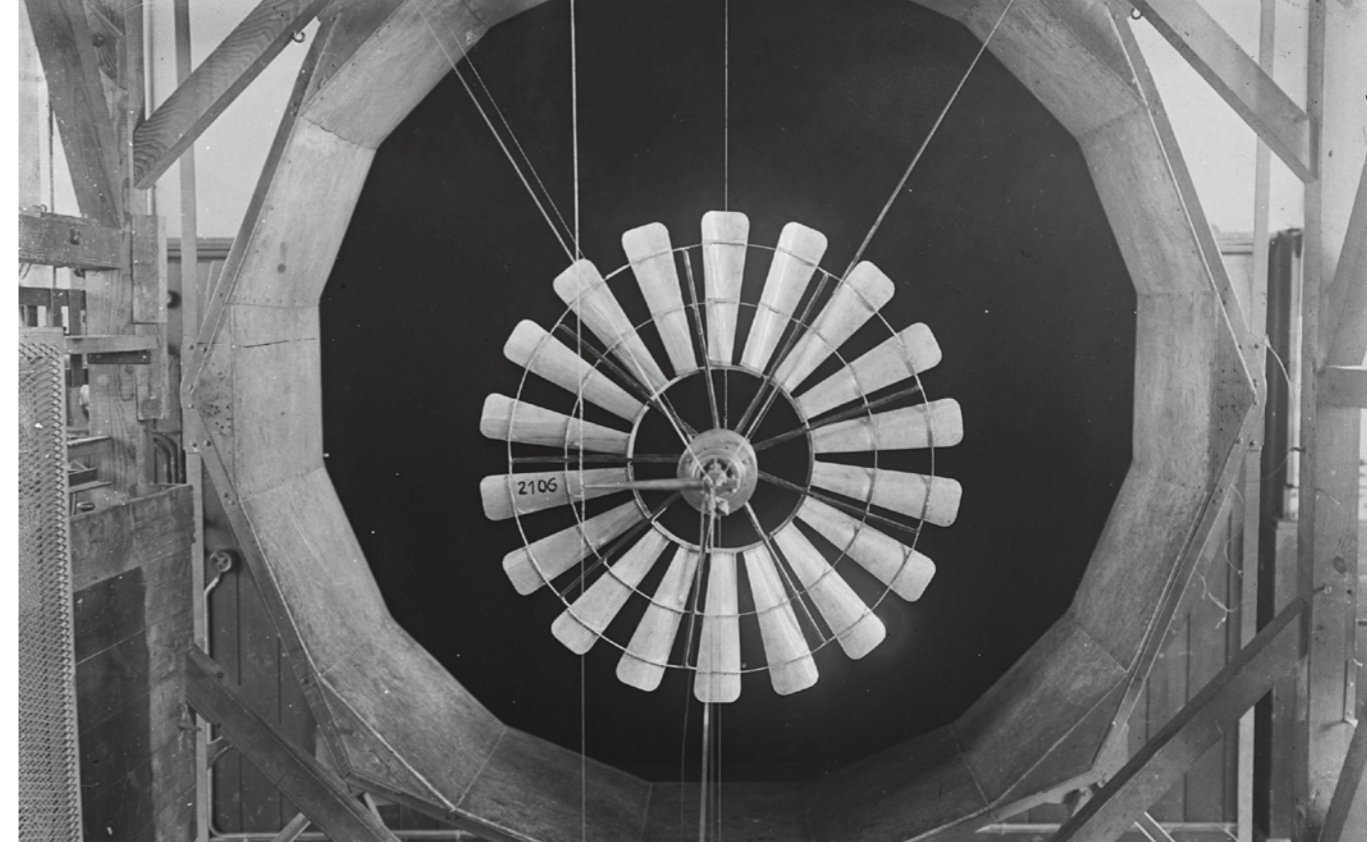


Dummy eines Skispringers im Windkanal der AVA im Jahr 1927. In den späten 1970er Jahren wurde die Untersuchung der Körperhaltung von Skispringern mit Leistungssportlern im Windkanal fortgeführt.

des Luftwiderstandes durch. Sein Ziel war es, die Energiekosten für den Betrieb von Zügen zu reduzieren. Auch diese Forschungsarbeiten sprachen sich in der Industrie schnell herum und so forschte die AVA bald schon nicht mehr nur an Lokomotiven und Tenderwagen, sondern auch an Zugbremsen in Form von Sandstreuern für Straßenbahnen – eine Auftragsarbeit der Berliner Straßenbahn Betriebs-GmbH aus dem Jahr 1928.

### Windräder

Parallel zur Forschung an Schienenfahrzeugen widmete sich Betz der Untersuchung von Windrädern. Er wollte sie zur Energiegewinnung einsetzen. Infolge der Besetzung des Ruhrgebiets durch französische und belgische Truppen zwischen 1923 und 1925 war Kohle als Energieträger im Deutschen Reich sehr teuer geworden, sodass die Suche nach alternativen Energiequellen ein wichtiges Forschungsgebiet darstellte. Betz hatte sich vor und während des Ersten Weltkriegs eingehend mit der Formgebung von Propellern befasst und übertrug diese Erkenntnisse nun auf Windräder. Seine sogenannte Tragflügel-



Ein vielflügliges Windrad im Windkanal der AVA im Jahr 1925

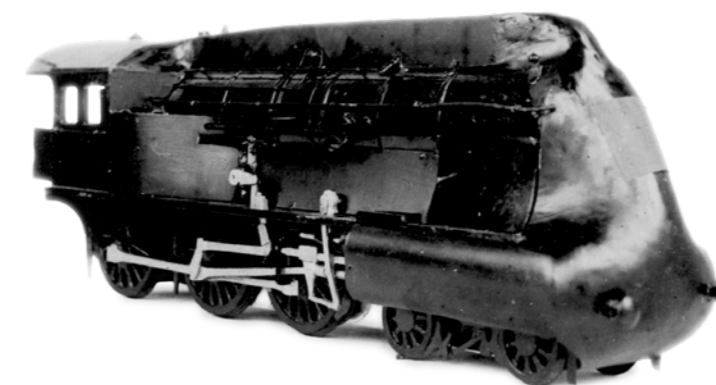
Theorie zur Formgebung von Rotorblättern hat bis heute Bestand. Er formulierte sie erstmals in seinem 1926 veröffentlichten Buch „Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen“.

### Von Staubsaugern und Skispringern

1925 wurden die Restriktionen des Versailler Friedensvertrags schließlich gelockert. Nun konnte auch die zivile Luftfahrtforschung wieder aufgenommen werden. Das verbesserte zwar die finanzielle Situation der AVA in der zweiten Hälfte der 1920er Jahre, doch war die Forschungseinrichtung auch über das Jahr 1925 hinaus stark auf Aufträge außerhalb der Luftfahrtforschung angewiesen. So erwies es sich für die AVA als Glückfall, dass die Staubsaugerindustrie die Windkanalforschung für sich entdeckte. Anders als in Loriots berühmtem Sketch über den Saugbläser Heinzelmann („Es saugt und bläst der Heinzelmann, wo Mutti sonst nur saugen kann“), der als vielversprechendes Kombigerät angepriesen wurde, ging es der Staubsaugerindustrie jedoch nicht um die Entwicklung neuer Geräte, sondern lediglich um die Ermittlung der Luftdurchlässigkeit von Staubsaugerbeuteln. Diese wurde von der AVA bis in die 1930er Jahre akribisch untersucht.



Modell einer Zugbremse für eine Straßenbahn, untersucht im Windkanal der AVA im Jahr 1928



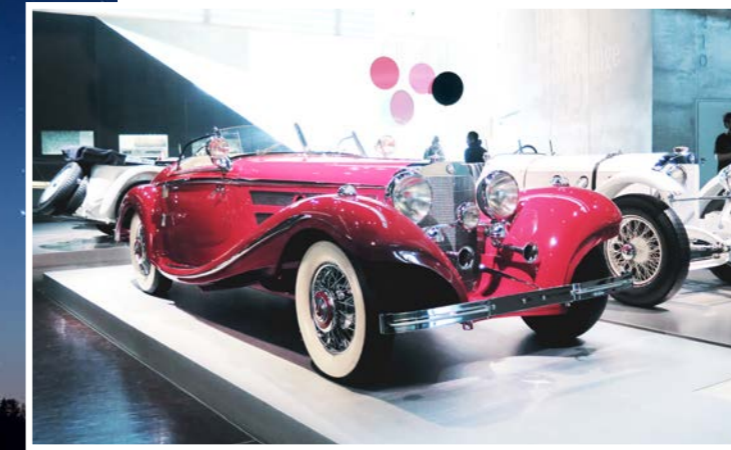
Stromlinienverkleidete Lokomotive um 1920. Die Leitbleche beeinflussen den Fahrtwind so, dass der aus dem vorn liegenden Schornstein ausgestoßene Rauch und Abdampf von den Fenstern des Führerstands weggelenkt werden. Ähnliche Versuche wurden in den 1930er Jahren beispielsweise für die Firma Henschel durchgeführt.

Eine weitere, eher ungewöhnliche Anfrage erreichte die AVA im Jahr 1927 durch den Schweizer Skiverband. Dieser wollte die optimale Körperhaltung eines Skispringers im Flug ermitteln und setzte dabei auf die Hilfe der AVA. Diese fertigte einen entsprechenden Dummy an und vermaß ihn im Windkanal. Bis heute nehmen Skispringer die im Windkanal der AVA ermittelte optimale Körperhaltung im Flug ein, um einen möglichst weiten Sprung zu erzielen. Diese gleicht einem senkrecht gestellten Flügelprofil.

### Restriktionen als Chance

Die Restriktionen, die der AVA im Bereich der Luftfahrtforschung durch den Versailler Friedensvertrag auferlegt worden waren, boten der Forschungsanstalt gleichzeitig die Chance, ihr Kompetenzspektrum zu erweitern. Somit war der Versailler Friedensvertrag für die AVA nicht nur ein Hemmnis, sondern gleichzeitig auch ein Katalysator, von dem die Forschungseinrichtung langfristig profitierte. Auch nach dem Zweiten Weltkrieg fanden eine ganze Reihe ungewöhnlicher Studienobjekte den Weg in die Göttinger Forschungsanstalt. Welche das waren, erfahren Sie in der nächsten Ausgabe des DLRmagazins.

Dr. Jessika Wichner leitet das Zentrale Archiv des DLR in Göttingen.



Der rote 500 K, für dessen Gegenwert eine Luxusvilla mit Park in bester Berliner Wohngegend zu bekommen war, ist mit seinen geschwungenen Kotflügeln, Perlmutt und Chrom in der Instrumentenaufgabe ein Höhe- und Wendepunkt im Automobilbau.

die oberen Zehntausend. Alles perfekt konserviert, wie aus einer anderen Welt – die Distanz bleibt gewahrt.

Auf der nächsten Ebene beginnt die Nachkriegszeit. Hier steht der 300 SL, der berühmteste Sportwagen des 20. Jahrhunderts. Als zunächst reinrassiger Rennwagen fuhr der „Flügelträger“ weltweit Rennsiege ein. Fahrzeuge und Ausstellungsraum spiegeln den Zeitgeist des Wirtschaftswunders wider. Der Rundgang ist ein wenig wie Geschenkeauspacken an Weihnachten. Oh und ah, ach, wie schön – aber so ganz insgeheim ist es ein Warten auf das besondere Geschenk, das das ganze Jahr über auf dem Wunschzettel stand: Wo sind die Autos aus der Kindheit?

**Alltagsklassiker**

Da ist er endlich, der Strichachter – so heißt er im Volksmund nach seinem Erscheinungsjahr 1968. Als Taxi, ein 240 Diesel – die Tugendhaftigkeit in Blech. Mercedesfahrzeuge, die noch heute jeden Tag in Kairo und Marokko unterwegs sind, von denen Taxler schwärmen, die den damaligen Ingenieuren einen Platz im Paradies wünschen. Wenn der Wagen doch von seinen vielen Fahrten erzählen könnte – über die rote Ampel zur Geburt ins Krankenhaus, die verspäteten Trauzeugen, auf dem Weg zur Beerdigung des Vaters.

„Alltagsklassiker“ heißen die millionenfach gebauten Butter-und-Brot-Daimler. Dazwischen Spezialkarossen, wie das „Papamobil“ für Papst Johannes Paul II., der metallicrote 500 SL von Lady Diana oder der



Einst Opa-Auto, später Studenten-Daimler, heute ein begehrter Kult-Oldie: Der Strichachter war der erste Volks-Daimler. Fast zwei Millionen liefen zwischen 1968 und 1976 vom Band.

# IM STERNENHIMMEL

Auf der Suche nach dem Mythos im Mercedes-Benz Museum

von Dr. Jens Mende

**Im Südwesten ist – oder vielleicht war – „d'r Daimler“ das Maß aller Dinge, auf der Straße und in den Köpfen. Es hieße sicherlich, Eulen nach Athen oder Mercedessterne nach Untertürkheim zu tragen, das Mercedes-Benz Museum als den Autotempel schlechthin zu bezeichnen. Hunderttausende pilgern jedes Jahr zum Geburtsort des Automobils nach Stuttgart. 160 Fahrzeuge aus mehr als 130 Jahren Automobilhistorie, von Legenden wie dem Flügelträger über nie in Serie gebaute Prototypen und Silberpfeile, die Renngeschichte schrieben, bis zum millionenfach gebauten Alltags-Daimler – das Museum ist mehr als eine Ausstellung, es ist eine Inszenierung des Mythos Mercedes.**

In weiten, scheinbar endlosen Schleifen windet sich die metallene Fassade um die Ausstellungsebenen des Museumsgebäudes – architektonisch eine Doppelhelix, für die unsere DNA Pate stand. In der riesigen Eingangshalle mit viel Sichtbeton herrscht ein Sprachengewirr wie in einer Abflughalle. Hier wird Stuttgart international. Zu den ewigen Stellplätzen für betagte Mercedes, in den „Sternenhimmel“, geht es mit dem Aufzug nach oben. Willkommen im Jahr 1886: Hier stehen sie, der dreirädrige Benz-Patentmotorwagen und Daimlers Motorkutsche. Die ersten Automobile – wie ungelenke Vehikel ohne Pferde sind sie Zeugen einer Technikpoche, die uns heute fremd ist.



Es folgt die Ära der Fahrzeuge aus der Kaiserzeit, mit Holzspeichen und viel Plüsch, die in den großen Kompressor-Mercedes der 1930er Jahre gipfelt. Das Museum spiegelt die Sonnenseite der damaligen Zeit für die Großen und Reichen wider. Keine profanen Fahrzeuge, sondern Solitäre für

Der 300 SL Flügelträger – wegen seiner sich konstruktionsbedingt nach oben öffnenden Türen heißt die zweiseitige Sportwagen-Ikone im Englischen „Gullwing“ (Möwenschwinge).

In weiten Kurven führen Rundgänge durch die Sammlung mit einer Ausstellungsfläche von insgesamt mehr als zwei Fußballfeldern. „Mythosräume“ erzählen chronologisch die Geschichte der Marke Mercedes-Benz. Omnibusse, Taxis, Feuerwehr- und Rettungswagen sowie Fahrzeuge mit prominenten Vorbesitzern bilden in den „Collectionsräumen“ epochenübergreifende Themeninseln.

**Beginn der Ära „Mercedes“**

Es waren Impulse des späteren österreichisch-ungarischen Generalkonsuls Emil Jellinek aus dem Motorsport, die mit zum Erfolg der Daimler-Motorwagen führten. Jellinek fuhr mit Daimlers Motorwagen ab 1899 Rennen unter dem Pseudonym seiner Tochter Mercédès – und gewann. Die Sammlung dokumentiert den damals rasanten Fortschritt. Daimler durfte seine Autos unter dem Namen „Mercedes“ verkaufen, Jellinek fuhr der Konkurrenz davon, der Mythos Mercedes war geboren.

MERCEDES-BENZ MUSEUM

Mercedesstraße 100, 70372 Stuttgart  
Telefon: 0711 1730000

**Öffnungszeiten:**  
di.–so. 09:00–18:00 Uhr

**Eintrittspreise:**  
Tageskarte, regulär: 12 Euro, ermäßigt: 6 Euro

[mercedes-benz.com/de/kunst-und-kultur/museum](https://www.mercedes-benz.com/de/kunst-und-kultur/museum)

unrestaurierte graue 190 SL von NASA-Astronaut David Scott. Hier werden Erinnerungen wach – das Museum gibt sich sachlich. Aus den Achtzigern und Neunzigern sind jedoch nur wenige Fahrzeuge ausgestellt. Wo ist der Mythos Mercedes geblieben?

**Durch die Steilkurve in die Zukunft**

Silberpfeile und Rekordfahrzeuge – in einer Steilkurve in Szene gesetzte Rennwagen erinnern an die Erfolge von Mercedes im Motorsport, dazu originale Erinnerungstücke berühmter Rennfahrer. Am Ende des Rundgangs lässt Mercedes die Muskeln spielen. Der Gang führt schließlich zum Ausstellungsbereich „Faszination Technik“, der dem Designprozess gewidmet ist. Hier stehen Zukunftsvisionen für Autos von morgen mit neuen Antrieben und Formen – entsteht hier ein neuer Mythos?

Dynamisch und postmodern, mit viel Licht und Schatten, gibt sich das Museum – zeitlos, distinktiert. Aber doch auch ein bisschen wie ein alter Mercedes – solide, robust, ein wenig nüchterne Perfektion. Am Ausgang stehen die Neuwagen der gegenüberliegenden Mercedes-Niederlassung. Beim Vorbeigehen denke ich an den Strichachter aus der zweiten Etage. Ob die Neuen es irgendwann auch in den Sternenhimmel schaffen?

**Dr. Jens Mende** ist für die Kommunikation am DLR-Standort Stuttgart verantwortlich. Als Stuttgarter Kind der 1970er Jahre ist ihm der „Mythos Mercedes“ natürlich nicht fremd – kein Wunder, dass es ihm der Strichachter angetan hat.

**DIE SONDERAUSSTELLUNG „DER MOBILE MENSCH“**

Jede Menge Action und spannende Infos über nachhaltige Mobilität garantiert die interaktive Sonderausstellung **„Der mobile Mensch – Deine Wege. Deine Entscheidungen. Deine Zukunft“**. Geschicklichkeit, Wissen und Neugier sind an acht Erlebnis- und fünf Themenstationen gefragt. Große Touchscreens laden ein zu einer spielerisch-interaktiven Reise in die virtuelle Stadt „Mobotopia“, in unsere zukünftige Mobilität. Was ist das passende Verkehrsmittel für mich und andere? Wie lassen sich Fahrzeuge, Infrastruktur sowie Nutzerinnen und Nutzer miteinander vernetzen? Wie helfen neue Mobilitätskonzepte, Städte lebenswerter zu gestalten? Ein elektronischer Spielball speichert die persönlichen Ergebnisse an den einzelnen Stationen. Am Ende bekommen die Besucherinnen und Besucher eine individuelle Auswertung. Bei dem Parcours geht es um mehr als Punktesammeln – die Ausstellung zeigt Trends sowie Innovationen und regt mit Praxisbeispielen dazu an, über das eigene Alltagsverhalten nachzudenken.

Sechs Beteiligte, darunter das DLR, haben ihr Wissen, ihre Expertisen und zahllose Beispiele aus der Praxis in die Ausstellung eingebracht. Im Begleitprogramm gibt es Thementage, Führungen, Vorträge und Diskussionsrunden – direkt im Museum oder bei den Ausstellungsbeteiligten. Bis Mitte November 2024 kann die Ausstellung kostenfrei auf Ebene 0 im Mercedes-Benz Museum besucht werden.



## EIN KLEINES RAUMSCHIFF IM EWIGEN NICHTS

Ich bin ein kleines Raumschiff im ewigen Nichts, ein winziger Punkt zwischen funkelnden Sternen, ein lebendiger Satellit in der Unendlichkeit. Mit diesem „Prolog im Himmel“ beginnt sie, die Autobiografie des deutschen ESA-Astronauten Matthias Maurer über seine ISS-Mission Cosmic Kiss. Der 53-jährige Saarländer war fast sechs Monate lang, vom 11. November 2021 bis zum 6. Mai 2022, der 13. Deutsche im All. Die Internationale Raumstation ISS bezeichnet er als „galaktische Oase“, nie zuvor sei er an einem „solch surrealen Ort“ gewesen.

Als kleiner Junge wollte Maurer Pilot werden, doch als die Europäische Raumfahrtagentur ESA im Jahr 2008 neue Astronauten suchte, warf er seinen Hut (oder besser gesagt Helm) in diesen Ring. Mit Erfolg: Der promovierte Werkstoffwissenschaftler schaffte es in dem Mammut-Auswahlverfahren unter die besten zehn Bewerber. Damals gab es aber nur sechs freie Plätze im Astronautenkorps. Maurer nahm die Entscheidung professionell und nutzte den „Fuß in der Tür“, um bis zu seiner offiziellen Ernennung als Astronaut im Sommer 2015 bereits für die ESA zu arbeiten – unter anderem im Columbus-Kontrollzentrum beim DLR in Oberpfaffenhofen, von wo er 2014 die erste ISS-Mission seines Kollegen Alexander Gerst unterstützte.

In seiner Autobiografie **Cosmic Kiss – Sechs Monate auf der ISS – Eine Liebeserklärung an den Weltraum (Droemer)** nimmt uns Matthias Maurer mit auf eine (Zeit-)Reise durch sein außergewöhnliches Berufsleben. Spannend und lebendig, wissenschaftlich fundiert und detailreich schildert er anhand seiner Ausbildungsstationen, was es heißt, ein Astronaut zu werden und zu sein. Überlebenstrainings in der schwedischen Wildnis, in einem sardischen Höhlensystem oder als Aquanaut auf dem Meeresgrund bei den Florida Keys – all diese Übungen in internationalen Teams dienen der Vorbereitung auf den ersten Einsatz im All. Sobald die eigene Mission und die Crew feststehen, dreht sich alles um das Einstudieren der Prozesse und Abläufe an Bord der Raumstation, des größten Labors außerhalb unserer Erde. Im Trainingszentrum der NASA in Houston (Texas) ist die ISS in einem riesigen Tauchbecken nahezu eins zu eins nachgebaut. Hier trainierte Maurer im Januar 2021 für seinen Außenbordeinsatz, den er dann tatsächlich ein gutes Jahr später, im März 2022, im Weltraum absolvierte.

Matthias Maurer hatte das Glück, seinen Geburtstag auf der ISS zu feiern, mit der „wildesten Party ALler Zeiten“, wie er schreibt. Wunderbar menschlich, neben all der Technik an Bord und nur durch eine dünne Wand getrennt vom so wunderschönen, aber auch so tödlichen Kosmos. Raumfahrt – nicht nur faszinierend, sondern auch relevant für unser Leben auf der Erde. Auch das zeigt das Werk eindrücklich. Zugleich wirft es einen authentischen Blick auf den Menschen Matthias Maurer und den Raumfahrtkosmos dahinter. Sehr lesenswert für alle, die die astronautische Raumfahrt erleben UND verstehen möchten. Der Erlös aus den Buchverkäufen kommt übrigens studentischen Projekten zur Erforschung des Mondes zugute.

Elisabeth Mittelbach



## WELTALL-WERKZEUGKASTEN

Wie schaffte es der Mensch 1969 auf den Mond? Klar, mit der Saturn-V-Rakete und präzisen Berechnungen darüber, wie die Apollo-Kapseln ihr Ziel genau treffen würden. Was aber hatten die Tausenden in das Apollo-Programm eingebundenen Ingenieure dazu am Zeichenbrett liegen? Computer waren es nicht, sondern – Rechenschieber! Während erste elektrische Rechenmaschinen damals noch riesige Räume füllten, passte der Rechenschieber in jede Aktentasche. Die mit diesem analogen Hilfsmittel erreichbare mathematische Präzision war fast unglaublich.

Ein unscheinbares Detail auf dem Weg des Menschen ins Weltall. Eines von einhundert, das Sten Odenwald in der unterhaltsamen Chronik **Der Traum vom All – Eine Zeitreise durch die letzten 73.000 Jahre (Hanser)** in 100 Etappen auf je einer Doppelseite erzählt. Der Ritt durch die Steinzeit geht wegen nur weniger Artefakte schnell. Dafür wächst das Streben nach astronomischer Erkenntnis in den Hochkulturen der Antike unter Zuhilfenahme allererstausnehmendster Werkzeuge wie Astrolabien oder des rätselhaften Mechanismus von Antikythera. Gewaltige Fortschritte sind dann mit den großen Namen Kopernikus, Brahe, Kepler, Galilei oder Newton verbunden. Und im 20. Jahrhundert beschleunigten sich die Entwicklungen: Erste Raketen, ein Krieg, der – man mag das bedauern – immer auch technischen Fortschritt generiert, 1957 ein Sputnik, und schon hatte Neil Armstrong den „Adler“ sicher gelandet. Weiter ging's zu allen Planeten und mit James Webb suchen wir heute nach Echos vom Urknall. Die vielleicht interessantesten Kapitel in Odenwalds Auflistung sind technische Exoten: so der 1967 eingeführte Interface Message Processor. Heißt heute: Router.

Ulrich Köhler



## WOHIN DIE NEUGIER TREIBT

Üppig liegt es auf dem Tisch: **Bis an den Rand der Welt (Prestel)** ist auf 256 Seiten prall gefüllt mit spektakulären Fotografien, mitreißenden Reportagen und aufschlussreichen Ergebnissen. Nicht nur der Titel suggeriert Entlegenheit. Das Coverbild macht klar, wie klein der Mensch angesichts unseres Planeten ist, den wir noch immer nicht in Gänze erkundet haben. Und genau darum geht es: Expeditionen in unbekannte, aber auch in bekannte Regionen. Extreme Eislandschaften, tropische Höhlenlabyrinth und tiefste Ozeane hat der Autor und Geo-Reporter Lars Abromeit bereits besucht. Für dieses Buch hat er seine zehn Lieblingsexpeditionen zusammengefasst und aufbereitet. Auf den ersten Blick scheint es, als stünden die großformatigen Aufnahmen international renommierter Fotografinnen und Fotografen im Vordergrund. Diese dienen jedoch mehr der Einstimmung und dem Eintauchen in die außergewöhnlichen Situationen, in denen die Teams forschten. Worum es bei den jeweiligen Expeditionen ging, erläutert Abromeit ausführlich im Text. Inzwischen liegen sie Jahre zurück und die erhobenen Daten haben seither zu wissenschaftlichen Erkenntnissen und Ergebnissen geführt, die mittels notizenartiger Infografiken präsentiert werden. So nimmt man nicht nur tiefgreifende Eindrücke, sondern auch neues Wissen aus dem Buch mit. Denn wie Astronaut Alexander Gerst es in seinem Vorwort schön umschreibt: Erst durch das Teilen bringt die Neugier uns alle voran.

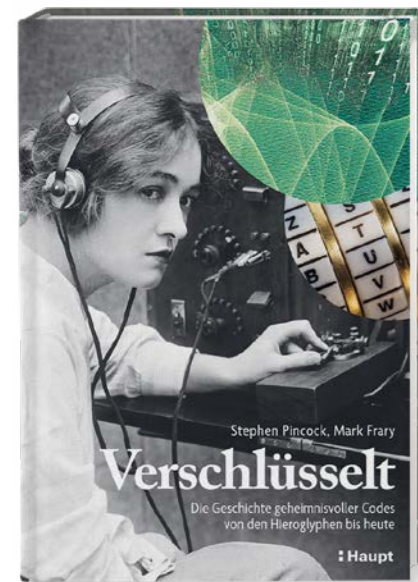
Daniel Beckmann

## WIE GRÜN KANN DIE LUFTFAHRT WERDEN?

Nachhaltigkeit in der Luftfahrt – ist dieses Ziel überhaupt erreichbar? Und was bedeutet es für die Passagiere? Diesen Fragen widmet sich das Buch **Fly Green – Nachhaltige Luftfahrt (Motorbuch-Verlag)**. Verfasst haben es der Wirtschaftsjournalist Frank Lassak sowie sein Co-Autor und Luftfahrtexperte Andreas Spaeth. Die Autoren haben sich für ihre Recherchen ausführlich mit Expertinnen und Experten der Branche unterhalten, darunter auch solche des DLR. Diese Expertise kommt dem Buch spürbar zugute, denn so hebt es sich in seiner umfassenden Darstellung von streiflichtartigen Diskussionsbeiträgen wohltuend ab. Dabei fallen einige harte Aussagen: So deutet vieles darauf hin, dass „die Transformation zur nachhaltigen Luftfahrt für die Fluggäste eher zu einem teuren Vergnügen wird“. Ob das gesteckte Ziel „Net Zero“, womit völlige Klimaneutralität gemeint ist, überhaupt bis 2050 erreichbar ist, wird bezweifelt. Das, so wird Volker Grewe vom DLR-Institut für Physik der Atmosphäre zitiert, „schafft laut unseren Untersuchungen keiner der Net-Zero-Ansätze“.

Das Fazit der Autoren kommt angesichts der Größe der anstehenden Aufgaben nicht überraschend: Ein grundlegender Wandel der gesamten Luftfahrtbranche kann nicht von heute auf morgen erfolgen und er wird seinen Preis fordern – nicht zuletzt für die Passagiere. Aber es gibt einige vielversprechende Ansätze, die die Luftfahrt künftig deutlich weniger umweltschädlich machen können.

Jens Wucherpfennig



## CODEKNACKER

0631422755614932502712392935... Was aussieht wie eine beliebige Aneinanderreihung von Zahlen, ist in Wirklichkeit ein Buchtitel. In **Verschlüsselt – Die Geschichte geheimnisvoller Codes von den Hieroglyphen bis heute (Haupt Verlag)** von Stephen Pincock und Mark Frary werden die Leserinnen und Leser auf eine spannende Reise durch die Geschichte der verschlüsselten Informationsvermittlung geführt. Ob wir eine Nachricht auf WhatsApp versenden, Online-Banking nutzen oder im Web surfen – im Alltag begegnet uns Verschlüsselung oftmals, ohne dass wir sie bemerken.

Das Buch bietet einen interessanten Einblick darüber, welche Verschlüsselungsmethoden in der Vergangenheit – beispielsweise im Kalten Krieg – eingesetzt wurden, welche Rolle sie für die Gegenwart spielen und wie wichtig sie in Zukunft sein werden. Über das Buch verteilte Informationsseiten erläutern verschiedene Verschlüsselungsmethoden, die dann direkt ausprobiert werden können. Diese Info-Seiten führen an manchen Stellen aber auch dazu, dass der Lesefluss des Kapitels unterbrochen wird. Insgesamt lässt sich dem Inhalt dennoch gut folgen. An diesem Buch werden besonders Personen Freude haben, die sich einen ersten Überblick über das Thema Verschlüsselung verschaffen möchten. Auf den 192 Seiten werden die Methoden und Ereignisse nur angerissen. Für „Code-Profis“ ist das Buch also gegebenenfalls zu oberflächlich.

Felicia Lueg

## GRAFISCHER WECKRUF



Wer hier eine Sammlung von Landkarten erwartet, wird enttäuscht, so viel sei gesagt. Für diesen **Atlas eines bedrohten Planeten – 155 geniale Grafiken für alle, die die Welt retten wollen (oekom)** erstellte die Illustratorin Esther Gonstalla verschiedenste Infografiken zum Thema Umweltschutz. Sie reichen von der Entstehung des Treibhauseffekts über die Bedeutung von Kelpwäldern in den Ozeanen bis hin zu umweltfreundlichen Energielieferanten. Die ansprechenden Grafiken sind mitunter recht komplex. Hier hätte an der einen oder anderen Stelle etwas mehr erläuternder Text nicht geschadet. Auf den 200 Seiten wird klar, welche drastischen Folgen der Klimawandel hat und haben wird. Aber: Auch wenn die Meere überfischt, Flora und Fauna dezimiert und Dürren auf dem Vormarsch sind, besteht Grund zur Hoffnung. Beispielsweise erzeugte Deutschland 2021 knapp 140 Millionen Tonnen weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen als 1960. Immer wieder finden sich konkrete Tipps, wie man selbst aktiv werden kann. Die letzten Seiten widmet Gonstalla dem persönlichen Wandel, sprich der Verringerung des ökologischen Fußabdrucks und dem Naturschutz. Ein Buch, das einerseits zum Schmökern einlädt und andererseits dazu inspiriert, den Lesesessel zu verlassen, die Ärmel hochzukrempeln und die Welt zu retten.

Julia Heil

## DAS WELTRAUM-HANDBUCH FÜR DEN NACHWUCHS



Dieses Kinderbuch zum großen Thema Raumfahrt ist in der Reihe „lonely planet kids“ erschienen. Zwar ist mittlerweile schon viel auf dem Markt, was unter anderem die klassische Frage „Wo geht ein Astronaut aufs Klo?“ beantwortet, aber darüber hinaus schafft es dieses bunte Buch, Basiswissen rund um das Thema zu vermitteln. **Abenteuer Raumfahrt (Ravensburger Verlag)** führt ausgesprochen anschaulich mit wunderbaren Bildern und Grafiken in die Weltraumforschung ein. Dabei zeigt es die ganze Vielfalt von Erscheinungen, Entdeckungen und Erkenntnissen, die Raumfahrt und Astronomie so fesselnd machen. Das Handbuch beschreibt nicht nur, was wir heute wissen, sondern lotet auch neue technische Möglichkeiten aus, ferne Welten zu erforschen. Selbst so abstrakte Phänomene wie Schwarze Löcher oder der Spaghetti-Effekt werden äußerst gut erklärt. Bizarre Monde wie der Jupitermond Io kommen ebenso vor wie die Raumsonde Philae und ihre Mission Rosetta. Ein wunderbarer Bildband mit einem breiten Spektrum an hervorragend aufbereitetem Weltraumwissen für acht- bis zwölfjährige potenzielle Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler.

Miriam Poetter

## LINKTIPPS

IDEFIX IM ALL

[instagram.com/mmx\\_rover](https://www.instagram.com/mmx_rover)

Im September 2024 ist es so weit! Der deutsch-französische Rover IDEFIX wird mit der japanischen Mission Martian Moons eXploration (MMX) zu den Marsmonden Phobos und Deimos fliegen, um sie zu erkunden. Welche Aufgaben IDEFIX hat, erzählt er auf seinem eigenen Instagram-Kanal.

REISE DURCH DIE ZEIT

[s.dlr.de/srf-eisenbahngeschichte](https://www.s.dlr.de/srf-eisenbahngeschichte)

Welches war das erste Eisenbahnnetz der Schweiz? Wann wurde der Gotthard-Tunnel gebaut? Warum wurden die Privatbahnen verstaatlicht? Das SRF (Schweizer Radio und Fernsehen) hat die Geschichte der Schweizer Eisenbahn mit Fotos, Grafiken und Videos auf einer interaktiven Website zusammengetragen.

WAS KANN KI?

[elementsofai.de](https://www.elementsofai.de)

Welchen Einfluss hat künstliche Intelligenz auf unseren Alltag und wie entwickelt sie sich weiter? Die Universität Helsinki hat gemeinsam mit der Unternehmensberatung MinnaLearn einen kostenlosen Online-Kurs entwickelt, bei welchem man die Grundlagen der künstlichen Intelligenz lernen kann. Nach Bestehen des Kurses erhält man eine Teilnahmebestätigung.

KINO DER NACHT

[sternhimmel-der-menschheit.de](https://www.sternhimmel-der-menschheit.de)

Freier Blick auf das nächtliche Firmament, ohne Wolken, ohne Störlicht. Den Himmel sehen, so wie er von fernen Kontinenten aus zu beobachten ist. Geschichten erfahren, wie sie sich Maori, Aborigines oder Inuit erzählen ... Das alles ist dank eines Projekts der Stiftung Kunst und Natur möglich. Eine Entdeckungsreise über den gesamten Erdball und durchs Universum.

VORTRÄGE RUND UM LUFTFAHRT

[luftfahrt-der-zukunft.de](https://www.luftfahrt-der-zukunft.de)

Welche Rolle spielt Energieeffizienz bei zukünftigen Verkehrsflugzeugen? Oder wie steht es um die gesellschaftliche Akzeptanz von Drohnen? Diese und weitere Fragen behandeln die Online-Vorträge der Veranstaltungsreihe „Luftfahrt der Zukunft“. Sie sind grundsätzlich kostenlos. Darüber werden auch zwei Exkursionen angeboten: Im Juli geht es zur Leichtwerk AG in Braunschweig und im August besteht die Möglichkeit, die Forschungsflieger des DLR Braunschweig aus nächster Nähe zu bestaunen.

DIE GRENZEN DES ALLS

[s.dlr.de/3sat-scobel](https://www.s.dlr.de/3sat-scobel)

Seit die Menschen zu den Sternen blicken, fragen sie sich, was dort draußen ist. Wir waren niemals näher an einer Antwort. Der Moderator Gert Scobel spricht in dieser Sendung über künftige Raumfahrtmissionen und die Grenzen des erfahrbaren Weltraums. Gäste sind die ESA-Astronautin Samantha Cristoforetti, die Astronomin Susanne Hüttemeister und DLR-Vorstandsmitglied Walther Pelzer, Leiter der Raumfahrtagentur im DLR.

## **Titelbild**

Vor 18 Jahren begann die Karriere des humanoiden Roboters Justin im DLR-Institut für Robotik und Mechatronik. Bei seinem ersten öffentlichen Termin 2006 bestand Justin nur aus einem Torso. An das Hantieren mit einem Würfel war damals nicht zu denken. Diese koordinative Leistung war für Roboter bis vor Kurzem nicht machbar. Heute besitzt Justin sensorische und motorische Fähigkeiten, die denen des Menschen zumindest nahekommen. Notwendig war hierfür ein intensives Training mit Unterstützung von künstlicher Intelligenz und Simulation.



Deutsches Zentrum  
DLR für Luft- und Raumfahrt