



# Parabelflüge *Parabolic Flights*

Brücke zur Internationalen  
Raumstation ISS  
*A bridge to the International  
Space Station ISS*





## Inhalt

Parabelflüge – Ein Programm des DLR Raumfahrtmanagements .....	4-5
Parabelflüge – Brücke zur Raumstation .....	6-23
Experimentieren an Bord .....	24-37
Forschung unter Weltraumbedingungen .....	38-41
Biowissenschaftliche Forschung .....	42-47
Humanphysiologische Forschung .....	48-57
Medizintechnik und biotechnologische Forschung ..	58-65
Physik und materialwissenschaftliche Forschung .....	66-79
Raumfahrttechnologie .....	80-85
Die Zukunft der Parabelflüge .....	86-87
DLR im Überblick .....	88

## Content

<i>Parabolic flights – A Programme Operated by the DLR Space Administration .....</i>	<i>4-5</i>
<i>Parabolic flights – A Bridge to the Space Station .....</i>	<i>6-23</i>
<i>Experimenting on Board .....</i>	<i>24-37</i>
<i>Research under Space Conditions .....</i>	<i>38-41</i>
<i>Research in Life Sciences .....</i>	<i>42-47</i>
<i>Research in Human Physiology .....</i>	<i>48-57</i>
<i>Research in Medical Engineering and Biotechnology ..</i>	<i>58-65</i>
<i>Research in Physics and Materials Science .....</i>	<i>66-79</i>
<i>Space Technologies .....</i>	<i>80-85</i>
<i>The Future of Parabolic Flights .....</i>	<i>86-87</i>
<i>DLR at a Glance .....</i>	<i>88</i>

## Impressum/Imprint

**Herausgeber/Publisher**  
Deutsches Zentrum für Luft-  
und Raumfahrt (DLR)  
German Aerospace Center

**Verantwortliche im Sinne  
des Presserechts (ViSdP)/  
Responsible according  
to the press law**

Sabine Hoffmann

**Anschrift/Postal Address**

Königswinterer Straße 522-524  
53227 Bonn  
Germany

Tel./Phone: +49 (0) 228 447-120  
Fax: +49 (0) 228 447-386  
DLR.de/rd

**Redaktion/Editorial Office**

Andreas Schütz (Imprimatur)  
Elisabeth Mittelbach (Imprimatur)  
Martin Fleischmann (Chefredaktion/Editor in Chief)  
Dr. Ulrike Friedrich (Redaktion/Editor)  
Dr. Katrin Stang (Redaktion/Editor)

**Autoren/Authors**

Dr. Markus Braun, Dr. Rainer Forke,  
Dr. Ulrike Friedrich, Dr. Rainer Kuhl,  
Maria Roth, Prof. Dr. Günter Ruyters,  
Dr. Katrin Stang

**Gestaltung/Design**

CD Werbeagentur GmbH,  
53842 Troisdorf, Germany  
www.cdonline.de

**Druck/Printing**

M&E Druckhaus GmbH,  
49191 Belm, Germany  
www.me-druckhaus.de

**Drucklegung/Press date**

Bonn, August 2015

Abdruck (auch von Teilen) oder  
sonstige Verwendung nur nach vorheriger  
Absprache mit dem DLR gestattet.

*Reproduction in whole or in part or any  
other use is subject to prior permission  
from the German Aerospace Center (DLR).*



## Parabelflüge – Ein Programm des DLR Raumfahrtmanagements

Parabelflüge gehören zum Programm „Forschung unter Weltraumbedingungen“. Hier unterstützt das DLR Raumfahrtmanagement Biologen, Mediziner, Physiker und Materialwissenschaftler aus Universitäten und anderen deutschen Forschungseinrichtungen. Zudem entwickelt die Raumfahrtindustrie im Auftrag des DLR speziell für den Einsatz im Weltraum geeignete Geräte. Um den Einfluss der Schwerkraft zu untersuchen, muss man diesen Faktor und seine Größe verändern und auch ganz ausschalten. Je nach der benötigten Zeitdauer bietet das DLR den Wissenschaftlern die entsprechenden Fluggelegenheiten und bringt ihre Experimente direkt in die Schwerelosigkeit.

Flugmöglichkeiten für automatisch ablaufende Versuche:

- der Fallturm in Bremen (5 bis 9 Sekunden Schwerelosigkeit),
- die Forschungsraketen TEXUS (6 Minuten) und MAXUS (12 Minuten) sowie
- russische Forschungssatelliten wie FOTON, BION (mehrere Wochen)

Flugmöglichkeiten für Versuche mit anwesenden Experimentatoren:

- Parabelflüge (bis zu 31 mal 22 Sekunden pro Flugtag) und
- die Internationale Raumstation ISS (mehrere Monate bis Jahre)
- die Chinesische Raumstation Tiangong-1 (mehrere Monate bis Jahre)

## Parabolic Flights – A Programme Operated by the DLR Space Administration

Parabolic flights are part of DLR's microgravity programme entitled 'Research under Space Conditions'. The programme is open for scientists working at universities, and other German-based research institutions in the fields of biology, medicine, physics, and materials science. DLR also awards contracts to industry to develop equipment specifically designed for use in space. To study the influence of gravity one must be able to vary its magnitude, or even eliminate that factor completely. Depending on the time required for each experiment, DLR offers scientists a variety of ways in which they may expose their experiments to microgravity.

Flight opportunities for automated microgravity testing:

- the Bremen drop tower (5 to 9 seconds of microgravity),
- sounding rockets TEXUS (6 minutes) and MAXUS (12 minutes), and
- Russian research satellites such as FOTON and BION (several weeks)

Flight opportunities for experiments requiring human presence:

- parabolic flights (up to 31 times 22 seconds each per flight day) and
- the International Space Station ISS (several months up to several years)
- the Chinese Space Station Tiangong-1 (several months up to several years)

„Brücke zur ISS“: Der Airbus A310 ZERO-G ist seit 2015 als neues Parabelflugzeug der französischen Firma Novespace im Einsatz. Parabelflüge ebnen unter anderem den Weg für Experimente und Geräte, um einmal auf der Internationalen Raumstation ISS zum Einsatz zu kommen. Mit dem A310 ZERO-G hat eine neue Ära der Parabelflüge im DLR-Programm „Forschung unter Weltraumbedingungen“ begonnen.

*A 'bridge' to the ISS: since 2015, the Airbus A310 ZERO-G operated by Novespace has been the new aircraft for parabolic flights. It helps to pave the way for some experiments and equipment aspiring for a place on the International Space Station ISS. The aircraft marks the beginning of a new era of parabolic flights in DLR's 'Research under Space Conditions' programme.*



## Parabelflüge – „Brücke“ zur Internationalen Raumstation

Alles auf der Erde unterliegt der Schwerkraft. Ihre Auswirkungen sind dabei sehr unterschiedlich: Zum Teil sind sie eher schwach und bleiben von uns unbemerkt, zum Teil sind sie offensichtlich. In der Wissenschaft stört die Schwerkraft bei einer Reihe von Untersuchungen oder man möchte gerade wissen, was ohne ihren Einfluss passiert. In diesen Fällen wollen Forscher in Schwerelosigkeit experimentieren. Für Kurzzeituntersuchungen nutzen Forscher Parabelflüge. Dabei fliegt ein Flugzeug spezielle Manöver, die der Flugbahn eines geworfenen Balls ähneln. So erreicht man für etwa 22 Sekunden Schwerelosigkeit – und dies bis zu 30 Mal hintereinander. Diese Flüge sind die einzige Möglichkeit für Wissenschaftler, ihre Versuche eigenhändig in der Schwerelosigkeit durchzuführen. Das DLR bietet regelmäßig Parabelflüge an und öffnet ihnen damit den Zugang zu innovativer Forschung in dieser besonderen Umgebung: So können sie neue Technologien erproben, den Körper des Menschen oder bestimmte physikalische Vorgänge erforschen oder ein Weltraumexperiment beispielsweise für die Internationale Raumstation ISS vorbereiten. Diese „Brücke zur ISS“ setzt seit 2015 das neue Flugzeug Airbus A310 ZERO-G fort. Gleichzeitig beginnt mit ihm eine neue Parabelflug-Ära im Programm „Forschung unter Weltraumbedingungen“.

## Parabolic Flights – A 'Bridge' to the International Space Station

*Everything on Earth is subject to the forces of gravity. Their effects may vary a lot: sometimes they are weak and go largely unnoticed, sometimes they are obvious. When it comes to scientific investigations, gravity can sometimes prove to be a nuisance, or, conversely, scientists may be interested to know what would happen without its influence. To study such effects, scientists want to experiment in microgravity. For experiments of short duration, parabolic flights are a good option. In these, an aircraft flies a series of special manoeuvres, which resemble the trajectory of a flying ball. Periods of microgravity of about 22 seconds can thus be achieved, up to 30 times in a row. These flights are the only opportunity for experiments in microgravity to be conducted by the scientists themselves. DLR offers parabolic flights on a regular basis, providing access to innovative research in a very special environment. They can thus test new technology, investigate the human organism or certain phenomena in physics, or prepare a piece of space-borne research before it gets its turn on the International Space Station ISS. This 'bridge to the ISS' is provided since 2015 by a new aircraft, the Airbus A310 ZERO-G. The new aircraft also marks the beginning of a new era of parabolic flights under DLR's microgravity programme 'Research under Space Conditions'.*

## Geschichte der Parabelflüge

Im Jahr 1950 haben die beiden deutschen Wissenschaftler Dr. Fritz und Dr. Heinz Haber die theoretischen Grundlagen dafür gelegt, wie man bei Parabelflügen Schwerelosigkeit erreicht. Seitdem werden sie für Forschung, technologische Tests und zur Vorbereitung von Astronauten für ihren Aufenthalt im All genutzt. Erforscht wurden hierbei besonders flugmedizinische Themen. Russische Kosmonauten sowie amerikanische und später europäische Astronauten übten den Umgang mit Raumanzügen und Experimentiergeräten und lernten geeignetes Verhalten in der Schwerelosigkeit. Zwar wurden bereits in den 1970er-Jahren einzelne Experimente auf kleinen Sportflugzeugen durchgeführt. Doch erst ab Beginn der 1980er-Jahre wurden Parabelflüge zunehmend für die Wissenschaft eingesetzt. Außerdem wurden neue, für den Weltraumeinsatz entwickelte Geräte getestet.

In der russischen Raumfahrt wird eine Ilyushin 76 MDK für Parabelflüge verwendet. Die amerikanische Raumfahrtbehörde NASA setzte hierzu früher eine Boeing KC-135, danach eine DC-9 beziehungsweise 10 und eine kommerziell betriebene Boeing 727 ein. In Europa flog man diese Manöver zunächst mit einer Caravelle. Von 1997 bis 2014 leistete der Airbus A300 ZERO-G seinen Dienst, ehe er im April 2015 vom A310 ZERO-G abgelöst wurde. Mit diesen Jets können 20 bis 23 Sekunden Schwerelosigkeit pro Parabel erreicht werden. Über mehrere Jahrzehnte hat die NASA auf diese Weise Astronauten trainiert, wissenschaftlich experimentiert und Technik getestet. Außerdem wurden Schülern, Lehrern und Studierenden über ein umfangreiches Nachwuchsförderungsprogramm einbezogen. Seit den 1980er-Jahren organisierte das DLR Parabelflüge in den USA und ab den 1990er-Jahren auch mit dem russischen Flugzeug. Diese Flüge, an denen viele deutsche Wissenschaftler und Astronauten teilnahmen, bereiteten die großen deutschen Weltraummissionen wie Spacelab D-2 und MIR-92 vor.

Die Europäische Weltraumorganisation ESA veranstaltet seit 1984 ein bis mehrmals jährlich Parabelflüge für die Wissenschaft. Außerdem hat sie regelmäßig auch Studierende eingeladen, Experimente für ihre Abschlussarbeiten durchzuführen. Da Deutschland Mitglied der ESA ist, können auch deutsche Forscher und Ingenieure diese Parabelflüge nutzen. Seit Mitte der 1990er-Jahre erhöhte sich in Deutschland jedoch sehr stark der Bedarf, in Schwerelosigkeit zu experimentieren. Das DLR hat deshalb 1999 entschieden, regelmäßig ein- bis zweimal im Jahr eigene Kampagnen in Europa zu fliegen.

## The History of Parabolic Flights

Back in 1950, two German scientists, Dr Fritz and Dr Heinz Haber, provided the theoretical groundwork for generating microgravity on a parabolic flight. Since then, parabolic flights have been used in scientific research, technology testing, and preparing astronauts for their stay in space, with a special focus on aeromedical research. Russian cosmonauts as well as American and, later, European astronauts took part in parabolic flights to acquire skills like how to handle spacesuits and scientific equipment as well as practising the correct way to move around in microgravity. Scientific experiments, which in the 1970s had been carried out occasionally on light sport aircraft, began to play a major role in the early 1980s when parabolic flights were increasingly used for scientific purposes. In addition, parabolic flights became ever more important in the testing of new equipment developed for use in space.

The Russian space community used an Ilyushin 76 MDK for their parabolic flights. The American space agency, NASA, first flew a KC-135, later to be followed by a DC-9 or a DC-10, respectively, and a commercially operated Boeing 727. In Europe, parabolic flight manoeuvres were first flown on a Caravelle. From 1997 until 2014, the job was handed over to the Airbus A-300 ZERO-G until its replacement by the A310 ZERO-G in April 2015. Those jet planes can achieve 20 to 23 seconds of microgravity on each parabola. For several decades, NASA used parabolic flights for astronaut training, conducting scientific experiments and technology testing. A major talent programme was launched to promote the flights among students and graduates. In the 1980s, DLR began to organise parabolic campaigns in the USA, and in the 1990s flights were also conducted on the Russian aircraft. Those flights, which were also joined by many German scientists and astronauts, served to prepare a number of major space missions with German participation, like Spacelab D-2 and MIR-92.

Since 1984, the European Space Agency ESA has been mounting one or several parabolic-flight campaigns every year for the science community. On a regular basis, students are offered the opportunity to come on board and carry out experiments for their thesis research. With Germany being an ESA member, German researchers and engineers have access to these parabolic flights. However, a hugely increased demand for microgravity experiments in Germany since the mid-1990s led to DLR's decision in 1999 to fly its own campaigns once or twice a year on a regular basis in Europe.

Die europäischen Parabelflüge fanden ab 1984 zunächst mit einer Caravelle des französischen Flugzeugbauers Sud Aviation statt. Sie war eines der ersten strahlgetriebenen Kurz- und Mittelstreckenverkehrsflugzeuge der Welt.

European parabolic flights, which began in 1984, were first conducted on an aircraft built by the French aircraft manufacturer Sud Aviation, a Caravelle, which became known as one of the world's first short and medium haul jet aircraft.



Die NASA setzte früher zunächst eine Boeing KC-135 für Parabelflüge ein.  
NASA's first parabolic flights were carried out on a Boeing KC-135.



Später flog die NASA ihre Parabelflugmanöver dann mit einer McDonnell Douglas DC 9.

Later, NASA flew its parabolic flight manoeuvres on a McDonnell Douglas DC 9.





Die DLR-Parabelflüge mit dem Airbus A300 ZERO-G und dem A310 ZERO-G  
*DLR Parabolic Flights with the Airbus A300 ZERO-G and the A310 ZERO-G*

Zwischen 1999 und 2014 hat das DLR 25 eigene Parabelflugkampagnen durchgeführt – zwei davon in Zusammenarbeit mit der ESA und der französischen Raumfahrtagentur CNES. Diese sogenannten „Partial-G-Parabolic Flights“ boten den Wissenschaftlern hauptsächlich Parabeln mit der Anziehung, wie sie auf dem Mond beziehungsweise dem Mars herrschen (Parabelflüge 17 und 21). Um die Parabelflüge als Fluggelegenheit für die Schwerelosigkeitsforschung bekannt zu machen und der Öffentlichkeit wissenschaftliche Projekte vorzustellen, wurden vier Kampagnen am Flughafen Köln-Bonn veranstaltet. Außerdem wurde das Parabelflugzeug beim Tag der Luft- und Raumfahrt des DLR in Köln beziehungsweise der internationalen Luft- und Raumfahrtausstellung ILA in Berlin ausgestellt. Zu bestimmten Jubiläumskampagnen wurden Künstler eingeladen, Wissenschaft und Kunst auf Parabelflügen miteinander zu verknüpfen – sei es fotografisch, literarisch oder als Kunstinstallation.

*Between 1999 and 2014, DLR carried out a total of 25 parabolic flight campaigns of its own, two of which were flown jointly with ESA and the French Space Agency CNES. Most parabolas flown on these latter so-called 'Partial-g Parabolic Flights' were intended for research under gravity conditions like those of the Moon or Mars, respectively (flights 17 and 21). To make parabolic flights better known among scientists as flight opportunities for microgravity research, and to present the science projects to a wider public in Germany, four campaigns took off from Cologne-Bonn Airport. The parabolic flight aircraft was also put on display during DLR's Open Day in Cologne and at the Berlin International Air Show ILA. To mark special jubilee campaigns, artists were invited to create fusions of arts and science on the theme of parabolic flights – be it in the form of photographs, literature, or art installations.*

Nr./ No.	Datum/Date	Ort/Location	Experimente/ Experiments	Flugzeug/ Aircraft
1	7. – 17.12.1999	Bordeaux	8	A300
2	27.11. – 8.12.2000	Bordeaux	9	A300
3	30.10. – 9.11.2001	Bordeaux	11	A300
4	15. – 25.10.2002	Bordeaux	15	A300
5	17. – 27.6.2003	Bordeaux	23	A300
6	6. – 20.9.2004	Köln-Bonn/Cologne	25	A300
7	6. – 16.9.2005	Bordeaux	20	A300
8	15. – 29.5.2006	Köln-Bonn/Cologne	22	A300
9	7. – 17.11.2006	Bordeaux	23	A300
10	3. – 17.9.2007	Köln-Bonn/Cologne	20	A300
11	18. – 30.11.2007	Bordeaux	15	A300
12	31.3 – 12.4.2008	Bordeaux	23	A300
13	2. – 14.2.2009	Bordeaux	15	A300
14	7. – 21.9.2009	Köln-Bonn/Cologne	14	A300
15	1.– 12.3.2010	Bordeaux	12	A300
16	15. – 26.11.2010	Bordeaux	13	A300
17	30.5. – 10.6.2010 (JEPPF-1)	Bordeaux	4	A300
18	5. – 18.9.2011	Bordeaux Köln-Bonn/Cologne	12	A300
19	6. – 17.2.2012	Bordeaux	12	A300
20	3. – 16.9.2012	Bordeaux/Berlin	13	A300
21	3. – 14.12.2012 (JEPPF-2)	Bordeaux	4	A300
22	15. – 26.4.2013	Bordeaux	11	A300
23	2. – 13.9.2013 + 20. – 22.9.2013	Bordeaux Köln-Bonn/Cologne	25	A300
24	3. – 14.2.2014	Bordeaux	28	A300
25	20. – 31.11.2014	Bordeaux	30	A300
26	27.4. – 8.5.2015 (CoPF)	Bordeaux	4	A310
27	30.8. – 11.9.2015	Bordeaux	>11	A310

## Partner und beteiligte Organisationen

Ein so komplexes Programm wie die DLR-Parabelflüge kann nicht eine Organisation alleine umsetzen. Das DLR Raumfahrtmanagement, das für das Flugprogramm und die Auswahl der Experimente zuständig ist, wird deshalb von vielen Partnern unterstützt. So wird zum Beispiel die französische Firma Novespace, der das Parabelflugzeug Airbus A310 ZERO-G gehört, mit der Durchführung der Parabelflugkampagnen beauftragt. Die Ingenieure der Firma beraten und betreuen die Wissenschaftler beim Bau ihrer Experimentiergeräte, holen alle notwendigen Genehmigungen ein, stellen das Flugzeug und organisieren die Crew für die Flüge. Außerdem sind zahlreiche weitere Einrichtungen an der Planung und Durchführung einer DLR-Kampagne beteiligt.



## Partners and Participating Organisations

A programme as complex as that of DLR's parabolic flights is too much for a single organisation to handle. Therefore, the organisation in charge of the flight programme and the selection of experiments, the DLR Space Administration, gets help from a large number of partners. One of them is the French company Novespace, the owner of the parabolic flight aircraft Airbus A310 ZERO-G. The company has been commissioned to run the parabolic flight campaigns. Its engineers advise the scientists in the design of their experiment kits, and get all the necessary permits and licenses, provide the aircraft, and recruit the flight crews. Beyond that, many other organisations play a part in planning and implementing DLR campaigns.



DFS Deutsche Flugsicherung



Köln Bonn Airport



Luftwaffe

### Beteiligte bei DLR-Parabelflügen in Frankreich

DLR Raumfahrtmanagement	Experimentauswahl, Veranstalter der Parabelflüge; bei Durchführung in Deutschland: Vor-Ort-Management
DLR Nutzerunterstützungszentrum MUSC	Wissenschaftliche und technische Unterstützung von Nutzern und Nutzergruppen
DLR Flugmedizinisches Zentrum	Flugmedizinische Untersuchung von Parabelflug-Teilnehmern, medizinische Unterstützung der Flüge
Novespace SA	Technische und organisatorische Ausführung der Parabelflüge, Eigentümer des Airbus A310 ZERO-G
Sabena technics	Wartung und Betrieb des Airbus A310 ZERO-G

### Zusätzliche Beteiligte bei DLR-Parabelflügen in Deutschland

Flughafen Köln/Bonn GmbH	Bereitstellung von Räumlichkeiten und Infrastruktur, Gesamtunterstützung der Kampagne
Deutsche Luftwaffe, Standort Köln/Bonn	Logistische Unterstützung
DLR_School_Lab Köln-Porz	Organisation und Unterstützung von Schülerexperimenten
DFS Deutsche Flugsicherung GmbH und Eurocontrol Maastricht	Bereitstellung der Fluggebiete für die Parabelmanöver, Flugsicherung während der Flüge

### The following institutions are involved in DLR's parabolic flight campaigns in France

DLR Space Administration	Selection of experiments, organisation of flight campaigns, on-site management of campaigns conducted in Germany
DLR User Support Centre MUSC	Scientific and technical support of users and user groups
DLR Aeromedical Center	Aeromedical examination of parabolic flight passengers, medical flight support
Novespace SA	Campaign implementation in technical and organisational terms, proprietor of the Airbus A310 ZERO-G
Sabena technics	Maintenance of the Airbus A310 ZERO-G

### The following additional partners are involved in DLR's parabolic flight campaigns in Germany

Köln/Bonn Airport GmbH	Provision of accommodation and infrastructure, overall campaign support
German Air Force, Köln (Cologne)/Bonn base	Logistic support
DLR_School_Lab Köln-Porz	Organisation and support of pupils' experiments
DFS Deutsche Flugsicherung GmbH and Eurocontrol Maastricht	Identification of flight areas for parabolic manoeuvres, air-traffic control during flights



### Ideal für Parabelflüge geeignet

Die Flugzeuge der Airbus-Serien A300 und A310 sind besonders gut für Parabelflüge geeignet, denn ihre starken Turbinen liefern den notwendigen Schub für derartige Manöver. Die Flugzeugstruktur blieb für die Parabelflüge unverändert. Im Cockpit wurden hingegen einige Schalter verlegt, damit die Piloten sie auch in der Schwerelosigkeit gut erreichen können. Für die besonderen Flugmanöver kamen einige Anzeigergeräte wie zum Beispiel Beschleunigungsmesser hinzu.

Während der Parabelflüge ist die Passagierkabine bis auf 50 Sitze völlig leer geräumt. Dieser freie Raum von 100 Quadratmetern und maximal 2,3 Metern Höhe – weltweit die größte Experimentierfläche in einem Parabelflugzeug – steht der Wissenschaft zur Verfügung und ist zum Schutz der Forscher mit Schaumstoffmatten ausgepolstert. In diesem Bereich werden die Experimentiergeräte auf Bodenschienen montiert und an die Stromversorgung des Flugzeugs angeschlossen. Netze sichern die Experimentierfläche gegen die übrigen Bereiche des Flugzeugs ab.

Einige technische Daten werden während des Fluges in Echtzeit verfolgt und aufgezeichnet. Hierzu gehören beispielsweise die Beschleunigungen in den drei Raumrichtungen, die Stromversorgung und der hydraulische Druck. Die Beschleunigungsdaten werden den Wissenschaftlern nach den Flügen für ihre Analysen mitgeteilt, denn sie geben Auskunft über die Qualität der Schwerelosigkeit während der Parabeln.

## Der Airbus A300 ZERO-G

Der dritte jemals gebaute Airbus der Serie A300 trat im Juni 1973 seinen Jungfernflug an. Danach diente er als Testflugzeug für technische Neuerungen. So wurden verschiedene Turbinen getestet sowie elektronische Hilfsmittel wie Autopiloten – beispielsweise für die Flugzeugmodelle A310 und A320 – überprüft und weiterentwickelt. Im Jahr 1996 wurde der A300 für Parabelflüge qualifiziert und von 1997 bis 2014 von der französischen Firma Novespace für Schwerelosigkeitsflüge eingesetzt. Außerdem dokumentierte der A300 ZERO-G die Startphase der europäischen Trägerrakete Ariane 5 mit einer speziellen Radarantenne. Insgesamt 113 Forschungskampagnen hat dieses Flugzeug gemeistert – davon 104 Parabelflugkampagnen für CNES, ESA, DLR und andere Raumfahrtagenturen. Sechsmal war der ZERO-G am Flughafen Konrad-Adenauer in Köln-Bonn zu Gast. Viermal wurde dort zwischen 2004 und 2009 eine volle zweiwöchige wissenschaftliche Kampagne geflogen. Zu zwei weiteren Terminen – in 2011 und 2013 – fanden am Flughafen Köln-Bonn Demonstrationsflüge während des „Tags der Luft- und Raumfahrt“ von DLR und ESA statt. Außerdem wurde das Flugzeug sechsmal in Köln und zweimal auf der Internationalen Luft- und Raumfahrtmesse ILA ausgestellt. Nachdem der Airbus A300 ZERO-G 5.200 Start-Landezyklen, 4.200 Flugstunden und 13.183 Parabeln gemeistert hat, ging er am 31. Oktober 2014 in den „Ruhestand“. Der Flughafen Köln/Bonn hat das Parabelflugzeug erworben. Große und kleine Besucher können es dort besichtigen.

### Einige technische Daten des Airbus A300 ZERO-G Some technical data of the Airbus A300 ZERO-G

Gewicht max./Weight max	137 t
Länge/Length	53,62 m
Breite/Width	44,84 m
Höhe/Height	16,90 m
Rumpf-Durchmesser/Fuselage diameter	5,64 m
Turbinen/ Engines	2 x General Electric CF6-50
Experimentierfläche/Experimental floorspace	100 m <sup>2</sup> Länge/length 20 m Breite/width 5 m
Maximale Deckenhöhe/Maximum cabin height	2,3 m
Elektrische Versorgung/Special power supply	20 kW, 230 V bei/at 50 Hz

## The Airbus A300 ZERO-G

The third Airbus of the A300 series ever built, now known as the ZERO-G, had its maiden flight in June 1973. Afterwards, it was used to test technical innovations, including various engines, and to review and develop electronic auxiliaries like autopilots to be used in, for example, the A310 and A320 aircraft models. Having been qualified for parabolic flights in 1996, the A300 was used by the French Novespace company for microgravity flights from 1997 to 2014. Besides, the A300 ZERO-G was employed to document the launch phase of the European Ariane 5 launcher using a special radar antenna. The aircraft has mastered no fewer than 113 research campaigns, among them 104 parabolic flight campaigns for CNES, ESA, DLR, and other space agencies. The ZERO-G paid six visits to the Konrad Adenauer Airport of Cologne-Bonn. From there, it flew four complete scientific campaigns of two weeks between 2004 and 2009. On two further occasions, in 2011 and 2013, demonstration flights took place at Cologne-Bonn airport during DLR's and ESA's 'Aerospace Day'. Furthermore, the aircraft was open for visits by the public six times in Cologne and twice at the Berlin Air Show. Having accomplished 5,200 take-off and landing cycles, 4,200 flight hours, and 13,183 parabolas, the A300 ZERO-G retired with honours on October 31, 2014. The aircraft has been acquired by Cologne/Bonn Airport, where it may be inspected by adults and children.

Der Airbus A300 ZERO-G wurde am 3. November 2014 nach Köln überführt und dem dortigen Flughafen übergeben. Bei seiner Landung wurde er gebührend empfangen. Seitdem können ihn Besucher des Flughafens besichtigen.

On November 3, 2014, the Airbus A300 ZERO-G was flown to Cologne where it was handed over to the airport operators. On arrival, it was greeted by a befitting welcome ceremony. It has now been put on display for airport visitors.







Besondere Vergangenheit: Nachdem der Airbus A310 zunächst als „Kanzler-Airbus“ Bundeskanzler und -minister sicher zu ihren Staatsbesuchen brachte, dient der A310 ZERO-G nun der Wissenschaft als Parabelflugzeug. Hierfür musste das luxuriöse Interieur zum Beispiel 270 Spezialmatten für die Experimentfläche oder einfacher Bestuhlung weichen. Umgebaut wurde die Maschine bei der Lufthansa Technik AG in Hamburg.

*An aircraft with a past: after its tour of duty as the 'Chancellor Airbus', carrying the Federal chancellor and ministers on their state visits and government business, the A310 ZERO-G is now flying in the name of science performing parabolic flights. Part of its luxurious interior had to go to make room for the experiment area with its 270 special flooring mats and simple seats. The modification was carried out by Lufthansa Technik AG in Hamburg.*

## Der Airbus A310 ZERO-G

Der Airbus A310-304 „10+21“ trat 1989 seinen Jungfernflug an und wurde am 24. Juni 1989 vom Flugzeughersteller Airbus an die DDR-Fluggesellschaft „Interflug“ übergeben. Er wurde bis 1991 als Linienmaschine auch von Regierungsmitgliedern genutzt. Am 27. August 1991 ging das Flugzeug ins Eigentum der bundesdeutschen Luftwaffe über und war als VIP-Maschine „Konrad Adenauer“ von 1993 bis 2014 für Reisen und Staatsbesuche von Bundeskanzlern und -ministern im Einsatz. Stationiert war der „Kanzler-Airbus“ bei der Flugbereitschaft des Bundesverteidigungsministeriums am Flughafen Köln/Bonn. Genau 25 Jahre nach der Erstzulassung wurde die „Konrad Adenauer“ am 24. Juni 2014 an den neuen Eigner Novespace übergeben, der anschließend zahlreiche Testflüge durchführte. Vom 3. September 2014 bis zum 18. März 2015 überholte die Lufthansa Technik AG in Hamburg die Maschine und baute sie zum Parabelflugzeug um. Zu seinem ersten wissenschaftlichen Parabelflug startete der Airbus A310-ZERO-G am 5. April 2015. Von nun an werden fünf bis sechs Kampagnen jährlich mit ihm geflogen.

## The Airbus A310 ZERO-G

*The Airbus A310-304 '10+21' had its maiden flight in 1989 and was handed over by the manufacturer, Airbus, to the GDR's Interflug airline on June 24, 1989. Employed in regular service until 1991, it was also used by members of the government. On August 27, 1991, the aircraft became the property of the German Air Force and was employed from 1993 to 2014 under the name of 'Konrad Adenauer' to carry federal chancellors and federal ministers on journeys and state visits. The Chancellor's Airbus as it was called was based at the flight operations centre of the Federal Ministry of Defence at Cologne/Bonn Airport. Exactly 25 years after its first registration, the Konrad Adenauer was handed over to its new proprietor, Novespace, on June 24, 2014, and tested on numerous flights. Between September 3, 2014, and March 18, 2015, the aircraft was overhauled and converted into a parabolic flight aircraft by Lufthansa Technik AG in Hamburg. The Airbus A310 ZERO-G took off for its first scientific flight on April 5, 2015. From now on, it will be used to fly five or six campaigns every year.*

### Ideal for parabolic flights

*The aircraft belonging to the Airbus series A300 and A310 are ideal for parabolic flights because their powerful engines deliver the thrust that is required for manoeuvres of this kind. The overall structure of the aircraft was not modified for parabolic flights. In the cockpit, on the other hand, some switches were re-located so that they could be easily reached by the pilots even in microgravity.*

*For special flight manoeuvres, a few instruments were added such as, for example, an accelerometer. The passenger cabin was cleared of all furniture, save for 50 seats. Measuring 100 square metres in size and a maximum of 2.3 metres in height, this largest experimenting area in a parabolic aircraft worldwide is available to scientists, for whose protection the walls are padded with foam mats. In this area, experimental equipment is mounted on rails in the floor and connected to the aircraft's power supply system. Nets secure the experimental area from the other sections of the aircraft.*

*Some technical data are tracked and recorded live during each flight, including, for example, acceleration in all three spatial directions, power supply, and hydraulic pressure. After each flight, acceleration data are forwarded to scientists for their analyses because they yield information about the quality of microgravity during the parabolas.*

### Einige technische Daten des Airbus A310 ZERO-G Some technical data of the Airbus A310 ZERO-G

Gewicht max./Weight max	157 t
Länge/Length	46,43 m
Breite/Width	43,90 m
Höhe/Height	15,80 m
Rumpf-Durchmesser/Fuselage diameter	5,64 m
Turbinen/ Engines	2 x General Electric CF6-80
Experimentierfläche/Experimental floorspace	100 m <sup>2</sup> Länge/length 20 m, Breite/width 5 m
Maximale Deckenhöhe/Maximum cabin height	2,25 m
Elektrische Versorgung/Special power supply	23 kW, 220 V bei/at 50 Hz



## Im Cockpit

Im Cockpit des A300 ZERO-G waren zwei Testpiloten und zwei Flugingenieure für den sicheren Flug verantwortlich. Der A310 ZERO-G wird nun von drei Testpiloten geflogen, die für je eine Raumrichtung verantwortlich sind. Nur das optimale Zusammenspiel zwischen den Piloten sorgt für sichere und präzise Flugmanöver. Vor jeder Parabelflugkampagne gibt es Trainingsflüge für die Cockpit-Crew, um diese speziellen, komplexen Manöver immer wieder zu üben. Als besondere Vorrichtung ist vor jedem Piloten ein Beschleunigungsmesser (Akzelerometer) eingebaut, nach dem die Piloten die Flugmanöver ausrichten. So wird die Restbeschleunigung des Flugzeugs in einem Bereich von nur wenigen Hundertstel der Erdbeschleunigung gehalten. Während der Flugmanöver ist einer der Piloten für die Querachse, der andere für die Längsachse des Flugzeugs zuständig. Spezielle Vorrichtungen an den Lenksäulen verhindern, dass ein Pilot mehr als eine Flugzeugachse steuern kann. Der dritte Pilot regelt den Turbinenschub, der zweite überwacht den Luftraum und übrige technische Daten. Das eingesetzte Parabelflugzeug gehört der französischen Firma Novespace, die die Parabelflüge im Auftrag von Weltraumorganisationen durchführt.

## In the Cockpit

*In the cockpit of the A300 ZERO-G, two test pilots and two flight engineers were responsible for safety in flight. Now, the A310 ZERO-G is flown by three test pilots, each responsible for one direction in space. Only optimum collaboration between the pilots can ensure the safety and precision of flight manoeuvres. Before each parabolic flight campaign, the cockpit crew rehearses this special, complex manoeuvre again and again on training flights. A special feature is the accelerometer installed in front of each pilot, which he uses to manoeuvre the aircraft during the flight so as to keep its residual acceleration down to some hundredth of Earth's normal gravity. During each flight manoeuvre, one of the pilots is responsible for the transversal axis, the other for the longitudinal axis of the aircraft. Each control stick features a special device to prevent the pilot from controlling more than one axis of the aircraft. While one flight engineer controls the thrust of the engines, the second monitors the air space and other technical data. Owned by the French Novespace company, the aircraft carries out parabolic flights on behalf of the various space organisations.*



Eric Delesalle (hinten links) ist Flugkapitän des Airbus A310 ZERO-G. Er hat es gemeinsam mit seinem Team in der Hand, wie gut die Qualität der Schwerelosigkeit während der Parabelmanöver ist.

Eric Delesalle (left in the back) is the captain of the Airbus A310 ZERO-G. It is down to him and his crew to ensure the quality of the microgravity experienced during each parabolic flight manoeuvre.

## Interview

### Was hat Sie motiviert, Pilot zu werden?

**Delesalle:** Ich war damals 18 Jahre alt und wusste nicht, was ich werden wollte. Ich interessierte mich für Physik und Mechanik, mochte Autorennen und Motorräder. Meine Eltern rieten mir, Ingenieur zu werden und diesen Vorschlag fand ich eigentlich gut. Allerdings hatte ich keine Lust, mein Leben nur im Büro zu verbringen, weil ich gerne Sport treibe. So konnte ich mich nicht wirklich entscheiden. Aber dann traf ich zwei sehr gute Freunde. Sie rieten mir, eine Ausbildung bei der französischen Luftfahrt-Militärakademie zu machen. Das war der Wendepunkt und eine wirklich gute Idee für meine Lebensplanung.

### Was waren Ihre Aufgaben als Pilot, bevor Sie mit den Parabelflügen anfangen?

**Delesalle:** Ich begann meine Laufbahn als Kampfpilot und war 18 Jahre bei der französischen Luftwaffe. Gegen Ende dieser Zeit wurde ich Testpilot für militärische Flugversuche. Danach verließ ich die Luftwaffe und wechselte zu EADS/Airbus. Dort war ich als ziviler Testpilot bei EADS-Sogerma tätig. Nach ein paar Jahren dort durfte ich den Airbus A300 zum ersten Mal nach seinem Umbau zusammen mit meinem Kollegen Pierre Haignere fliegen. Es folgte eine Qualifizierungsphase. In dieser Zeit wurden alle notwendigen Anpassungen vorgenommen, um die Maschine für die Parabelflüge tauglich zu machen. Novespace bot mir dann an, die Maschine zu fliegen. So begann meine Laufbahn als Parabelfluggpilot. Ich liebe diese Art zu fliegen. Es ist eine spannende Herausforderung, diese kniffligen, anspruchsvollen Manöver zu bewältigen. Es macht wirklich Spaß, die notwendigen Techniken zu entwickeln. Man muss dabei extrem kreativ sein. Der erste Flug nach der Modifikation war 1996. Die erste volle Kampagne flogen wir 1997.

### Und nun ist der neue Flieger da, der Airbus A310...

**Delesalle:** Diese Maschine zu fliegen, ist ein Vergnügen. Insbesondere jetzt, da wir das neue Anzeigesystem speziell für Parabelflüge (PPS) installiert haben, an dessen Entwicklung ich mitgearbeitet habe. Nach so vielen Testflügen betrachte ich die Maschine ein bisschen wie ein eigenes Baby. Ich freue mich, dass bisher alle Beteiligten mit den Parabeln zufrieden waren. Daran haben wir lange gearbeitet.

### Ist es möglich, die speziellen Manöver vorher auf einem Simulator zu trainieren?

**Delesalle:** Ja, einige der Parabelflugmanöver lassen sich vorher üben. Wir haben auf zwei Simulatoren trainiert. Einer war der Simulator der Airbus-Entwicklungsabteilung. Die Flugkabine entspricht zwar nicht der des Parabelfliegers, aber mit den Geräten kann man arbeiten. Das bot uns die Möglichkeit, unser eigenes Parabelflugsystem PPS zu entwickeln. Unsere spezielle Bordelektronik wurde also im Simulator entwickelt. Auch in der Pilotenausbildung wurde dieser Simulator genutzt, damit sich die Piloten mit dem neuen System vertraut machen können. Aber das allein reicht nicht aus. Es gibt eine Vielzahl an Systemen, die während eines echten Flugs bedient werden müssen. Man kann Simulatoren nicht für alle zu erwartenden Szenarien programmieren. Auch die Kommunikation mit der Flugsicherung stimmt nicht immer mit dem überein, was dann auf einem realen Flug zu hören ist. Es ist also unumgänglich, am Ende der Ausbildung ein paar „echte“ Flüge zu absolvieren.

## Interview

### What was the reason that motivated you to become a pilot?

**Delesalle:** Well, I was around 18 years old. I was wondering what to do. I was fond of physics, mechanics, and fond of car races and motorbikes. My parents wanted me to become an engineer and I rather agreed with that wish. But I didn't want to spend my life in an office. I like sports, exercising and so on. I was at a loss at that time. But then I met two very good friends who suggested I should join the French Air Force Academy. That was the turning point and a really good idea for my life plan.

### What did you do as a pilot before you started on the parabolic flights?

**Delesalle:** I began my career as a fighter pilot. I spent 18 years in the French Air Force. At the end of this period, I worked as an experimental test pilot for military flight tests. Afterwards I left the Air Force to enter EADS/Airbus. I began this work as a test pilot in the civilian world at Sogerma. A few years after I entered Sogerma, I had the chance to fly the Airbus A300 aircraft for the first time after its modification, together with Jean Pierre Haignere. Then a qualification period followed. We made all the necessary adjustments to prepare the aircraft for parabolic flights. Then Novespace asked me to fly this aircraft. This is how I started my career as a parabolic pilot. I have always loved this kind of flights because it is an exciting challenge to face this difficult manoeuvre. You know how demanding the manoeuvres are. It really is a pleasure to develop the necessary methods and techniques and be as creative as possible. The first flight after modification was in 1996 and the first full campaign was in 1997.

### And now we have the new aircraft, the A310...

**Delesalle:** This aircraft, the A310 ZERO-G, is a pleasure to fly. Especially as we now have the Parabolic Piloting Display (PPS) which I helped to develop. I did many flight tests, so I can consider this aircraft my baby. I am very happy that everyone has been satisfied with the parabolas so far. We work quite a lot on that issue.

### Was it possible to practise on a simulator before you flew the actual aircraft?

**Delesalle:** Yes, we could test some of the manoeuvres required in real parabolic flights. We trained in two types of simulators. One was the development simulator based at the Airbus Company. The cabin is not very representative but you can work with some other equipment. This offered us the opportunity to develop our special parabolic pilot system PPS. So we actually designed our system on the simulator. We also trained the pilots to get used to this new system on the simulator. But this is not enough given the number of aircraft systems to be handled on a real flight. You cannot code all the simulators for every possible scenario. Besides, the feedback you get from flight control is not exactly the same as on a real airplane. You need to finish the training on a few 'real' flights.

Piloten des Airbus A310 ZERO-G  
Pilots of the A310 ZERO-G





Driebe/DLR

Das Parabelflugzeug Airbus A310 ZERO-G fliegt seine Manöver nur in speziell ausgewählten Gebieten, die die Crew von den französischen Fluglotsen zugeteilt bekommt. Der Luftraum ist dann für andere Flugzeuge gesperrt. Natürlich suchen sich die Piloten mithilfe von Wetterkarten Gebiete aus, die möglichst frei von Turbulenzen sind. Meistens fliegt die Maschine über dem Meer – beispielsweise über dem Atlantik südwestlich der Bretagne, über dem Mittelmeer bei Sardinien und Korsika oder über der Nordsee.

*The parabolic flight aircraft Airbus A310 ZERO-G flies its manoeuvres only in designated areas assigned to its crew by the French air traffic controllers. During manoeuvres, that particular airspace is off limits for other aircraft. The pilots of course use weather maps to choose areas with as little turbulence as possible. In most cases, the manoeuvres are flown over the sea, over the Atlantic Ocean south west of Brittany, over the Mediterranean off Sardinia and Corsica, or over the North Sea.*

**Fliegt sich das neue Flugzeug anders als das alte?**

**Delesalle:** Nun, die beiden Flieger sind sich sehr ähnlich, sie gehören ja zu ein und derselben Familie. Der A310 ist der neuere von den beiden. Er hat ein moderneres Navigationssystem und ein neues Display. Der A300 war einfacher ausgestattet. Der A310 ist die erste Maschine der Airbus-Familie mit ganz moderner Bordelektronik und fliegt sich komfortabler. Außerdem ist er kürzer. Auch das ist ein Vorteil: Er spricht dadurch besser an und hat auch mehr Leistung relativ zum Gewicht. Durch dieses Merkmal schafft er eine höhere Injektionsgeschwindigkeit. Damit erreichen wir längere Phasen mit reduzierter Schwerkraft. Aber insgesamt ist er genau so gebaut wie der A300, weswegen wir mit der Maschine schon vertraut waren. Deshalb konnten wir auch die Sonderausbildung sehr schnell abschließen.

**Arbeiten Sie lieber als Parabelflugpilot, als andere Einsätze zu fliegen?**

**Delesalle:** Ich bin begeistert von dieser Art zu fliegen. Es gibt auf der Welt nur drei Maschinen, die für diese Manöver geeignet sind. In Europa sind wir nur sechs Piloten, die diese Flüge mit einer A310 durchführen können. Selbst nach 5.000 Parabeln ist dieser Job für mich noch immer Vergnügen und Herausforderung zugleich. Es sind rein manuelle Flüge. Verstehen Sie mich nicht falsch: Natürlich sind auch automatisierte Routinen im Cockpit notwendig. Es gehört ja zu den Kernaufgaben eines Testpiloten, automatische Systeme mit zu entwickeln, die den Piloten im Cockpit maximal unterstützen. Parabeln werden aber, wie gesagt, manuell geflogen. Wir müssen sehr präzise arbeiten und uns stark konzentrieren. Aber gerade diese Herausforderung und die Zufriedenheit unserer Passagiere machen auch uns zufrieden. Es ist ein gutes Gefühl, wenn die Wissenschaftler an Bord zufrieden sind und diese Zufriedenheit mit uns teilen. Das ist der Moment, in dem ich sehr stolz bin, zu dieser Organisation zu gehören. Und außerdem lernt man bei dieser Arbeit die Wissenschaftler kennen. Darunter sind sehr interessante Typen. Bei so einer Flugkampagne herrscht eine ganz besondere Atmosphäre. All das macht die Tätigkeit sehr interessant.

**Herzlichen Dank.**



© DLR

**Is there a difference between piloting the old and the new one?**

**Delesalle:** Well, both airplanes are quite similar, because they belong to the same family. The A310 is the more recent one with a modern navigation system and navigation display. The A300 was rather old with basic systems. The A310 is the first aircraft of the Airbus family featuring modern avionics. It is more comfortable to fly. The A310 is shorter. This is an advantage because the airplane is easier to fly. It is also more powerful relative to its weight. This characteristic allows for a higher injection speed. So we manage to get longer periods of reduced gravity. But in general, the systems are designed with the same architecture as the A300, so we are familiar with the airplane as such. That is why we received our qualifications very quickly.

**Do you prefer parabolic flights over other piloting duties?**

**Delesalle:** I am very enthusiastic about this kind of flight. There are only three aircraft in the world performing these special manoeuvres. We are only six pilots in Europe who can carry out these flights on the A310. After 5,000 parabolas, the job is still both a pleasure and a challenge for me, because it is pure manual flying. Do not get me wrong: automatic controls in the cockpit are necessary. The basic work of an experimental test pilot consists in developing automatic processes to give pilots maximum support. But as I mentioned before, parabolic flights are performed manually. We have to work very accurately and be highly concentrated. But it is from this difficult challenge and the happiness of our passengers on the airplane that we receive our satisfaction. You are pleased if the scientists on board are happy and give you positive feedback. Then I always feel proud to be a part of this organisation. And what is more, there is also the opportunity to meet the science people. A lot of them are very interesting guys. There is a very special atmosphere during such a flight campaign. All this makes it a very attractive activity.

**Thank you very much.**

Die Crew muss die Restbeschleunigung des Flugzeugs in einem Bereich von nur wenigen Hundertstel der Erdbeschleunigung halten. Während der Manöver ist einer der Piloten für die Querachse, der andere für die Längsachse des Flugzeugs zuständig. Spezielle Vorrichtungen an den Lenksäulen verhindern, dass ein Pilot mehr als eine Flugzeugachse steuern kann. Währenddessen regelt der dritte Pilot den Turbinenschub, der zweite überwacht den Luftraum und übrige technische Daten.

*The crew must keep the aircraft's residual acceleration within a range of only a few hundredths of gravitational acceleration. During a manoeuvre, one pilot is in charge of the lateral axis and the other one takes care of the longitudinal axis. A special device on each control stick ensures that no pilot can control more than one axis of the aircraft. Meanwhile, the third pilot controls turbine thrust, while the other one monitors the airspace and the remaining technical data.*



Schneider/DLR



Schwerelos für 22 Sekunden: Auf Parabelflügen haben die Wissenschaftler die einzigartige Chance, selbst beim Ablauf ihrer Experimente in der Schwerelosigkeit dabei zu sein und das Gefühl dieser Leichtigkeit des Seins zu spüren.

*Weightless for 22 seconds: parabolic flights provide researchers with the unique opportunity to be present during their own microgravity experiments, and to get a sense of what this utter 'lightness of being' feels like.*

## Das Experimentieren an Bord

Das Experimentieren an Bord ähnelt dem Forschen im Labor. Es können laborübliche Geräte eingesetzt werden. Die Wissenschaftler bauen die Geräte in Boxen oder Halterungen (Racks) ein, die am Boden der Flugzeugkabine festgeschraubt werden. Medizinische Testpersonen sind in Sitzen, auf dem Kabinenboden oder in speziellen Geräten festgurtet. Alle Experimentiergeräte werden vor dem ersten Flugtag gründlich überprüft, damit es während des Fluges nicht zu Unfällen kommt. Eine Versuchsanordnung muss hierfür bestimmte Sicherheitskriterien erfüllen – etwa einen Notschalter aufweisen und eine harte Landung ohne Bruch aushalten. Testpersonen müssen sich notfalls schnell aus ihrer Versuchsanordnung befreien können. Humanphysiologisch-medizinische und sportwissenschaftliche Experimente müssen darüber hinaus ethisch unbedenklich sein. Ihr Ablauf muss von einem medizinischen Prüfungsgremium – einer sogenannten Ethikkommission – freigegeben werden. Das Besondere an Parabelflügen ist, dass Wissenschaftler und Techniker während des Fluges eigenhändig experimentieren. Sie beobachten den Versuchsablauf, beurteilen ihn und ändern eventuell die Versuchsparameter noch während eines Fluges. Bei medizinischen Versuchen können nacheinander mehrere Testpersonen untersucht werden. Das Beste daran: Die Wissenschaftler sind beim Ablauf ihrer Versuche selbst an Bord.

## Experimenting on Board

*Experiments on board resemble those conducted in a terrestrial laboratory, and common laboratory equipment may be used. Scientists integrate their equipment in cases or racks that are firmly bolted down to the floor of the cabin. Medical test subjects are strapped to seats, the cabin floor, or special equipment. To avoid accidents in flight, all the equipment used in experiments is checked thoroughly before the first flight day. To pass the check, a test setup needs to comply with specific safety criteria. Experiments need to be equipped with an emergency switch and to be able to withstand a hard landing without breakage. In emergencies, test subjects must be able to escape quickly from their test rigs. In addition, experiments in human physiology, medicine, and sports science must be conformable with ethical precepts. Their protocols must be approved by a medical board called the ethical review committee. What makes parabolic flights special is that scientists and engineers run their own experiments during the flight. They observe their progress, judge it, and modify test parameters when required. Medical tests may be performed on several subjects in succession. The best thing about it: the researchers are on board when their experiments are conducted.*



Miniaturisierung par Excellence: War im Airbus A300 ZERO-G noch eine ganze Konsole (oben) für die Überwachung des Flugzeugs und der Experimente nötig, so erledigt im Nachfolger A310 ZERO-G ein einziges Notebook (unten) diesen Job.

Miniaturisation par excellence: while Airbus A300 ZERO-G still had an entire dedicated console (above) for monitoring the airplane and each experiment, its successor A310 ZERO-G does the job on a single notebook (below).

## Zugang zu Parabelflügen

Auf einem DLR-Parabelflug können deutsche Universitäten, Kliniken, Forschungsinstitute, Firmen und DLR-Forschungsinstitute in Schwerelosigkeit experimentieren. Zuvor müssen sie allerdings einen Experimentvorschlag an das DLR senden, der dann von externen Gutachtern beurteilt und auf seine Durchführbarkeit geprüft wird. Der Vorschlag muss wissenschaftliche oder technische Fragen enthalten, zu deren Lösung Phasen von 20 Sekunden Schwerelosigkeit notwendig und auch ausreichend sind. Die Forscher müssen außerdem wissenschaftliche Erfahrung auf ihrem Fachgebiet mitbringen und neue Erkenntnisse erwarten. Vom DLR werden nur Vorschläge ausgewählt, die hohen wissenschaftlichen Ansprüchen genügen beziehungsweise bei denen ein Funktionstest in Schwerelosigkeit wichtig ist. Je nach Bedarf sind drei bis fünf Flugtage vorgesehen. Nach der Rückkehr ins heimische Labor werten die Wissenschaftler ihre Versuchsdaten aus. Die Ergebnisse werden in Fachzeitschriften veröffentlicht und auf Kongressen vorgestellt. Sollten ergänzende Experimente bei Parabelflügen nötig sein, so sind weitere Flüge nach sechs bis zwölf Monaten möglich.

## Nachwuchsförderung

Als größte ingenieurwissenschaftliche Forschungseinrichtung des Bundes will das DLR gerade junge Menschen für Wissenschaft und Technik begeistern. Nach dem Motto „Raus aus der Schule, rein ins Labor“ werden Schüler in den DLR\_School\_Labs über wichtige Forschungsthemen informiert und experimentieren selbst. Bei mehreren Parabelflügen haben diese „jungen Wissenschaftler“ an Experimenten eines DLR\_School\_Labs oder von Universitäten mitgearbeitet. Ein volljähriges Mitglied der jeweiligen Schülergruppe erhielt die Chance, auf Parabelflügen selbst unter Schwerelosigkeit zu forschen. In Zukunft sollen gelegentlich Lehrer mitfliegen, um die Begeisterung für „Forschung unter Weltraumbedingungen“ ins Klassenzimmer zu übertragen.

## Access to Parabolic Flights

DLR's parabolic flights are open to German universities, hospitals, research institutes, manufacturers, and DLR research institutes to run experiments in microgravity. To qualify for a flight opportunity, however, they must submit a research proposal to DLR which is assessed by external experts and examined for feasibility. The proposal should contain scientific or technical research questions for the solution of which a 20-second period of microgravity is necessary and sufficient. In addition, researchers should have previous experience in their scientific discipline and be ready for new discoveries. DLR will select only those proposals that meet exacting scientific demands and those for which functional tests in microgravity are indispensable. Three to five flight days are scheduled, depending on demand. After their return to their laboratories at home, scientists evaluate their experimental data. Results will be published in scientific journals and presented at congresses. If supplementary experiments should be required, follow-up flight opportunities can be made available after six to twelve months.

## Young Scientists Programme

With DLR being the federal government's largest research institution in engineering sciences, it is one of its foremost goals to encourage young people to go for a career in science and technology. 'Out of school and into the lab' is the motto under which pupils come to DLR\_School\_Labs to learn about major research themes and run their own experiments. Some of these 'young scientists' cooperated in the preparation of a parabolic flight experiment designed by a DLR\_School\_Lab or a university. One member of each group of students, who must be of age, was given the opportunity to take part in a parabolic flight and perform his own experiment in microgravity. For the future, there are plans to include teachers as passengers occasionally as a way to convey some of the spirit of 'research under space conditions' to the classroom.

Bringen die Wissenschaftler ihre Experimente in die Schwerelosigkeit: Dr. Ulrike Friedrich und Dr. Katrin Stang lösen im Programm „Forschung unter Weltraumbedingungen“ des DLR Raumfahrtmanagements die „Bordkarte“ für die Wissenschaftler. Immer ansprechbar und für alle Fragen und Sorgen offen begleiten sie die Experimente und die klugen Köpfe dahinter von der Idee bis in die Schwerelosigkeit.

These two take scientists on a trip into microgravity: Dr Ulrike Friedrich and Dr Katrin Stang hand out 'boarding passes' to scientists taking part in the DLR Space Administration's 'Research under Space Conditions' programme. Always available for participants' questions and worries, they accompany the experiments and the masterminds behind them from the original idea right through to its implementation in microgravity.





Schneider/DLR

## Von der Idee bis zur Schwerelosigkeit

Vor dem Parabelflug	Aktivität
12 Monate	Einreichen eines Experimentvorschlags
12 – 10 Monate	Begutachtung
6 Monate	Auswahl der Experimente für eine spezielle Flugkampagne
5 Monate	Erstellen einer technischen Beschreibung und ggf. eines medizinischen Versuchsprotokolls
4 Monate	Besuch und Beratung durch Ingenieure der Firma Novespace
4 – 1 Monate	Bau der Experimentanlagen, technische, wissenschaftliche, organisatorische Vorbereitung des Parabelflugexperiments; medizinische Untersuchung aller für den Mitflug vorgesehenen Wissenschaftler

Die Parabelflug-Kampagne	Aktivität
Montag, 1. Woche	Anreise der Wissenschaftler
Mittwoch – Donnerstag, 1. Woche	Aufbau der Experimentanlagen und Einbau in den Airbus
Freitag, 1. Woche	Sicherheitsüberprüfung der Experimentanlagen im Airbus
Montag, 2. Woche	Sicherheitseinweisung für alle Passagiere mit Erläuterung der Flugmanöver und des Experimentalprogramms
Dienstag – Donnerstag, 2. Woche	Drei Flugtage
Freitag, 2. Woche	Reserveflugtag; Ausbau der Experimentanlagen aus dem A310 ZERO-G und Rückreise der Wissenschaftler

## From an Idea to Microgravity

Before the flight	Activity
12 months	Submission of an experiment proposal
12–10 months	Review
6 months	Selection of experiments for a specific flight campaign
5 months	Development of a technical description and, if necessary, a medical test protocol
4 months	Visit and consultation by Novespace engineers
4–1 months	Construction of the experimental apparatus; technical, scientific, and organisational preparations for the parabolic flight experiment; medical examination of all scientists scheduled for the flight

The parabolic flight campaign	Activity
Monday, week 1	Arrivals
Wednesday–Thursday, week 1	Assembly of the experimental apparatus and installation in the Airbus
Friday, week 1	Safety check of the experimental apparatus in the Airbus
Monday, week 2	Safety instructions for all passengers, explanation of flight manoeuvres and the experimental programme
Tuesday to Thursday, week 2	Three flight days
Friday, week 2	Reserve flight day; removal of experimental apparatus from the A310 ZERO-G and departures

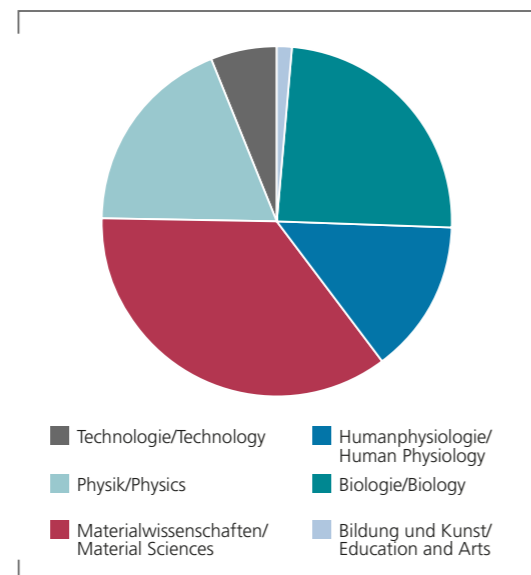
### Ein besonderes Erlebnis?

Wie erleben wir Mars- und Mond-Parabeln? Während der Marsparabel wiegt der Mensch etwas mehr als ein Drittel seines normalen Körpergewichts: Dadurch können Liegestützen leichter und Sprünge ohne Anstrengung absolviert werden – nicht wirklich spektakulär. Das ist bei Mondparabeln schon anders. Hier wiegt man nur noch etwa ein Sechstel des Normalgewichtes. Dieses Gefühl verleitet zum Springen, zum Loopingdrehen und zu einarmigen Liegestützen. Das wirklich große Erlebnis sind die „reinen“ Schwerelosigkeitsparabeln, die das unvergessliche Gefühl des dreidimensionalen Schwebens – der unendlichen Leichtigkeit – bieten.

### A special experience?

*How do we experience Martian and lunar parabolas? During a Martian parabola, a person weighs slightly over one third of their normal body weight. This makes push-ups easier, and jumps can be performed with less effort – so, nothing really spectacular here. Lunar parabolas, however, are a different matter. In this case, people weigh only about one sixth of their normal weight. This feeling induces one to jump, to turn somersaults, and to perform push-ups on one arm. However, the greatest experience is a zero-gravity parabola that offers the unforgettable feeling of floating in three dimensions – infinite lightness.*

Verteilung der Experimente/  
Allocation of the experiments



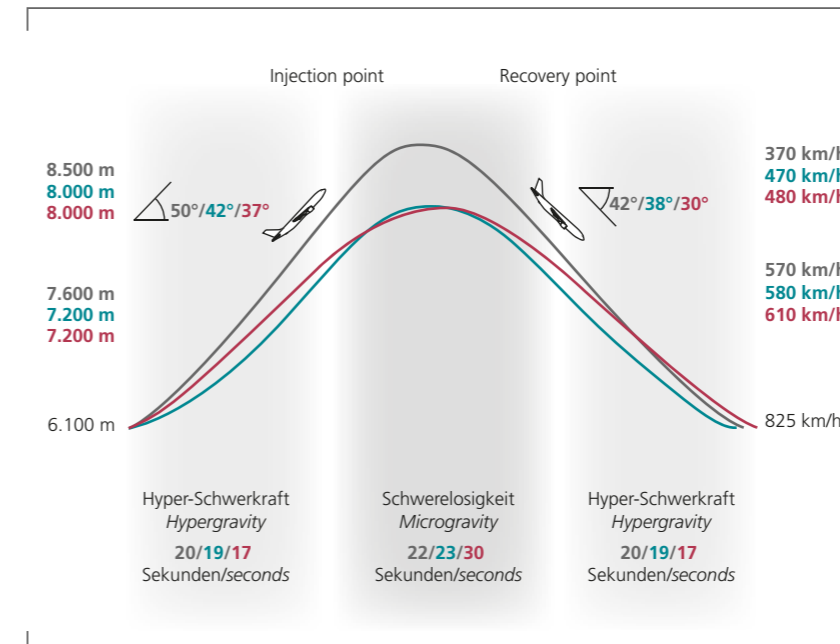
### Ergebnisse aus 25 Parabelflügen mit dem Airbus A300 ZERO-G

Von 1999 bis 2014 wurden 25 Kampagnen unter DLR-Beteiligung geflogen (einschließlich zwei kooperative Kampagnen mit CNES und ESA), bei denen 133 Wissenschaftlergruppen 407 Experimente durchgeführt haben – die meisten in der Materialforschung, zu der insbesondere das Großgerät TEMPUS zur elektromagnetischen Levitation von Metalllegierungen gehört (Verteilung siehe Grafik). Als Verbindung von Wissenschaft und Kultur haben Künstler auf ausgewählten Flügen zudem spezielle Kunstprojekte umgesetzt. Die an den DLR-Kampagnen beteiligten Wissenschaftler haben ihre Ergebnisse in über 250 Publikationen in Fachzeitschriften veröffentlicht und in 180 Kongressbeiträgen vorgestellt. Junge Forscher haben ihre Ergebnisse für 130 Abschlussarbeiten verwendet.

### Minutenlang leicht wie auf Mond und Mars

Der Schwerpunkt der Parabelflüge liegt auf der Forschung in „reiner“ Schwerelosigkeit. Viele Wissenschaftler möchten jedoch auch unter Bedingungen forschen, die zwischen Schwerelosigkeit und der normalen Erdschwerkraft liegen. Deshalb wurden Flugzeug und Piloten dafür ausgebildet, auch Parabeln mit Beschleunigungen wie sie auf dem Mond (0,16 G) und auf dem Mars (0,38 G) herrschen, zu fliegen. Eine „Mondparabel“ bietet die entsprechende Beschleunigung für 23 Sekunden, eine „Marsparabel“ für etwa 30 Sekunden. Wissenschaftler, die bei „partiell G“ forschen wollen, stellen die unterschiedlichsten Fragen: Das Leben auf der Erde ist über Millionen von Jahren unter dem Einfluss der Erdschwerkraft entstanden. Wie reagieren Zellen, Tiere, Pflanzen und der menschliche Körper auf verschiedene Schwerkraftbedingungen unterhalb des Wertes der normalen Erdschwerkraft? Welche ist die geringste Beschleunigung, die noch wahrgenommen wird? Wie regulieren Organismen diese ungewohnte Umgebungsbedingung? Wir senden Raumfahrzeuge zu Monden und anderen Planeten. Die Sonden müssen auch bei unterschiedlicher Schwerkraft verlässlich funktionieren. Dies kann auf partial-G-Parabelflügen getestet werden.

Parameter der 0-G-, Mond- und Marsparabeln/  
Parameters of the 0G, lunar and Martian parabolas



### What 25 parabolic flights on Airbus A300 ZERO-G have achieved

*From 1999 to 2014, 25 campaigns were flown in which DLR was involved, including two campaigns on which DLR co-operated with CNES and ESA. During these campaigns, 133 groups of scientists conducted 407 experiments. Most of them dealt with materials science, with the most remarkable one being the TEMPUS electromagnetic levitator for metal alloys (details illustrated in the graph below). Twinning science with creativity, artists flying on certain campaigns produced a range of extraordinary works of art. The scientists who participated in DLR campaigns presented their results in more than 250 publications in scientific journals and in 180 congress papers. Young researchers evaluated their findings in 130 theses.*

### Feeling as light as on the Moon or on Mars for minutes

*The main purpose of parabolic flights is to permit research in 'pure' microgravity. However, there are many scientists who want to research in conditions that range somewhere between microgravity and normal Earth gravity. This is why the aircraft and its pilots have also been trained to fly parabolas where acceleration resembles that on the Moon (0.16 g) or on Mars (0.38 g). A 'lunar parabola' offers 0.16 g for 23 seconds, while a 'Martian parabola' offers 0.38 g for about 30 seconds. Scientists planning research in 'partial-g' address widely different questions: for millions of years, life on Earth evolved under the influence of terrestrial gravity. How do cells, animals, plants, and the human organism respond to varying gravity conditions below Earth normal? Which is the lowest acceleration that is still perceived? How do organisms adapt to this unaccustomed environment? We are sending spacecraft to other moons and planets. The probes must function reliably even under varying gravity conditions, which can be tested on partial-g parabolic flights.*





Experimentvorbereitung am Boden: Vor jedem Flug gibt es noch viel zu tun. Geräte müssen eingeladen, Proben vorbereitet und Testpersonen verkabelt werden. Deswegen beginnt jeder Flugtag schon sehr früh.

*Preparing the experiments on the ground: in the run-up to a flight plenty of work is left to be done. Hardware must be loaded on board of the aircraft, specimens prepared and test subjects wired up. This explains why each flight day needs to start early.*



## Ablauf eines Flugtags

### Vorbereitung

Parabelflüge sind nichts für Langschläfer. Bereits um 6.00 Uhr beginnen die Vorbereitungen. Während die Forscher in der Basis am Flughafen allmählich zusammen kommen, wird das Flugzeug aktiviert und die Stromversorgung für die Experimente eingeschaltet. Die Wissenschaftler bereiten ihre Experimente nun abschließend vor und führen einen letzten Testlauf am Boden durch. Mediziner legen ihren Testpersonen Elektroden an, mit denen sie während des Fluges die Reaktionen im Körper messen. Nebenbei setzt ein Biologe Pflanzen in seine Apparatur, ein Physiker baut seine Metallprobe in die Experimentalanlage ein. Spätestens um 8.00 Uhr sind alle „Mitflieger“ vor Ort, ziehen ihren Flugoverall an und erhalten ein Medikament gegen Reisekrankheit. Anschließend nehmen alle Mitflieger ihre Plätze im Flugzeug ein. Um 9.30 Uhr wird die Kabinentür geschlossen. Anschließend führen die Piloten alle Checks durch – dann kann der Airbus starten.

### Parabel für die Schwerelosigkeit

Nach dem Start fliegt der Airbus A310 ZERO-G in ein Gebiet, das für den übrigen Luftverkehr gesperrt ist und wegen der geringeren Turbulenzen meistens über dem Meer liegt – beispielsweise über dem Atlantik südwestlich der Bretagne, über dem Mittelmeer bei Sardinien und Korsika oder über der Nordsee. Bis das Parabelflugzeug diesen Flugraum erreicht hat, fahren die Forscher ihre Anlagen hoch und bereiten sich auf die erste Parabel vor. Aus einer Flughöhe von ungefähr 6.100 Metern und bei einer Geschwindigkeit von etwa 825 Kilometern pro Stunde beginnen nun die Manöver. Nach Ankündigung der ersten Parabel durch einen der Piloten folgt ein starker Steigflug (Pull-up). Hierbei wirkt auf Personen und Geräte im Flugzeug das 1,8-Fache der normalen Erdbeschleunigung in Richtung Flugzeugboden – die sogenannte Hyperschwerkraft. Alles ist also 1,8-mal so schwer wie auf der Erde. Nach etwa 20 Sekunden hat das Flugzeug einen Steigungswinkel von etwa 50 Grad erreicht – zum Vergleich: Bei einem normalen Start neigt sich die Flugzeugnase maximal 18 Grad in Richtung Himmel. An diesem Extrempunkt fährt der Pilot den Turbinenschub sehr stark zurück (injection point). Innerhalb weniger Sekunden geht das Flugzeug in den freien Fall über, wobei es der Kurve einer Parabel folgt. Dabei steigt es allerdings aufgrund des zuvor gehaltenen Schwungs zunächst noch etwa 1.000 Meter. Am höchsten Punkt in etwa 8.500 Metern Höhe hat das Flugzeug nur noch eine Geschwindigkeit von circa 370 Kilometern pro Stunde. Von hier aus fällt es wieder hinab. Diese Phase, bei der alle Passagiere und Experimente schwerelos sind, dauert 20 bis 22 Sekunden. Auf diese Zeit haben die Experimentatoren gewartet. Oft werden aber auch die Anflugphase mit „normaler“ Erdanziehung und die Zeit der Hyperschwerkraft beziehungsweise der Wechsel zwischen diesen Phasen für Versuche genutzt. Hier werden die Auswirkungen der Beschleunigungswechsel auf das Untersuchungsobjekt erforscht.

Wenn beim Sinkflug die Nase ungefähr 42 Grad nach unten weist, wird der Airbus mit zuerst geringem, später starkem Schub der Turbinen abgefangen, um ihn wieder in die horizontale Flugrichtung zu bringen. Auch in dieser Phase herrscht für circa 20 Sekunden Hyperschwerkraft von 1,8-facher Erdschwere. Da dieser Zustand für den Menschen nicht besonders angenehm ist, verbringen die meisten Wissenschaftler diese Phase liegend. Im Stehen spürt man fast sein doppeltes Gewicht. Nach knapp zwei Minuten normalem Horizontalflug beginnt die nächste Parabel. Üblicherweise werden sechs Blöcke mit jeweils fünf Parabeln geflogen. Zwischen den Blöcken liegen Pausen

## A Typical Flight Day

### Preparations

*Preparations begin at 6:00 in the morning. While researchers are arriving at the airport base, the aircraft's systems are activated and the power supply for the experiments is switched on. Scientists put the finishing touch to their experiments and give them a last test run on the ground. Physicians attach electrodes to the bodies of their subjects for measuring their physical reactions during the flight. Close by, a biologist inserts plants into his apparatus, and a physicist integrates a metal sample in his experimental rig. By 8:00 at the latest, everyone who is going to fly is present, putting on their flight overalls and receiving medication against air sickness, after which all passengers take their seats on the aircraft. At 9:30, cabin doors are closed, the pilots complete their checks, and the Airbus is ready for take-off.*

### Parabolas for microgravity

*After take-off, the Airbus A310 ZERO-G flies to an area that is off limits to ordinary traffic and is generally located somewhere above the sea because of the less violent turbulences there. Flights take place above the Atlantic southwest of Brittany, for example, above the Mediterranean off the coast of Sardinia and Corsica, or above the North Sea. While the aircraft travels to its designated air space, researchers run up their systems and get ready for the first parabola. Starting from an altitude of about 6,100 metres at a speed of about 825 kilometres per hour, the manoeuvres begin. After the first parabola has been announced by one of the pilots, a steep climb (pull-up) follows during which the people and equipment on board are exposed to 1.8 times normal terrestrial gravity acting in the direction of the cabin floor; this is called hyper-gravity. In other words, everything is 1.8 times as heavy as on Earth. After about 20 seconds, the aircraft's angle of ascent amounts to about 50 degrees. To put that in perspective: during a normal take-off, the nose of the aircraft rears up to the sky at a maximum angle of 18 degrees. At this extreme point, the pilot throttles the engines far back (injection point), and within a few seconds, the aircraft goes into free fall, following the curve of a parabola. However, the momentum it has gathered before keeps it moving upwards for another 1,000 metres or so. At the apex of the curve, at an altitude of about 8,500 metres, the speed of the aircraft is down to about 370 kilometres per hour. From here, it drops back down. This phase, during which all passengers and experiments are weightless, lasts for 20 to 22 seconds. This is the time the research teams have been waiting for. However, many also use the 'normal' horizontal flight and the period of hyper-gravity or the alternation between these phases for experiments to investigate the effects of acceleration changes on objects of study.*

*As soon as the nose points downward at an angle of approximately 42 degrees during the descent, the Airbus is pulled out of the dive, with the engines working at low thrust at first and at high thrust later on to bring it back to level flight. This is another phase of hyper-gravity when gravity reaches 1.8 times its normal value for about 20 seconds. As hyper-gravity is not particularly comfortable, most scientists pass through this phase lying down. While standing, you feel almost double your weight resting on your feet. The next parabola begins after almost two minutes of level flight. A day's flight generally includes six blocks of five parabolas each, interspersed with breaks of between four and eight minutes during which scientists may change the parameters of their experiments, replace samples, or change test subjects. In this way, 31 parabolas are flown on a normal flight day. The sequence begins with a so-called 'zero' parabola*



Löten vor dem Abflug: Ingenieure testen, wie sich Kleinsatelliten am besten von der Rakete lösen. Hierfür gibt es vor dem Flug noch einiges am Boden vorzubereiten.

*A soldering job before take-off: engineers test how a small satellite will best separate from its launch vehicle. This requires some pre-flight preparations on the ground.*



Innenleben vor dem Flug: Die 100 Quadratmeter Experimentfläche werden voll ausgenutzt, um möglichst viele verschiedene Versuche während einer Kampagne in die Schwerelosigkeit zu bringen.

*The inside of the aircraft before take-off: every bit of the 100 square-metre experiment area is utilised to its full capacity, to accommodate as many different experiments as possible during each flight into microgravity.*



Blick aus dem Fenster: Wer es sich zutraut, während einer Parabel aus dem Fenster zu schauen, bekommt ein spannendes Schauspiel geboten. Die Tragflächen zeigen im Verhältnis zum Horizont, dass der Airbus A310 ZERO-G aus der Waagerechten nach oben und dann nach unten „kippt“.

*A view from one of the windows: those who are daring enough to peer out of the window during a parabola get to see a spectacular view. Seen against the horizon, the wings show how the Airbus A310 ZERO-G is 'tilted' from a level flightpath to a steep upward and then downward angle.*

von vier bis acht Minuten, in denen die Wissenschaftler die Parameter der Experimente verändern, Proben wechseln oder Versuchspersonen austauschen können. An einem normalen Flugtag werden so 31 Parabeln geflogen. Zunächst gibt es eine sogenannte „nullte“ Parabel zur Übung für die Crew, anschließend 30 für die Wissenschaft. Nach insgesamt drei bis vier Stunden kehrt das Flugzeug zum Heimatflughafen zurück. Mit 93 Parabeln (3 x 31) bietet eine Standardkampagne aufsummiert 35 Minuten Schwerelosigkeit. Wenn es notwendig ist, kann auch an vier oder fünf Tagen geflogen werden.

#### Erfahrungsaustausch

Gelandet wird zwischen 12.30 und 13.00 Uhr. Dem anschließenden Mittagessen folgt eine Besprechung (Debriefing), bei der ein Pilot den Forschern die äußeren Bedingungen des zurückliegenden Fluges erklärt. War es besonders turbulent? Oder konnten „reine“ Parabeln mit Schwerkraft von hoher Qualität geflogen werden? Das Begleitem berichtet im Anschluss von den Erfahrungen des Fluges und gibt Hinweise für den kommenden Tag. Aus jedem Team berichtet abschließend ein Wissenschaftler, wie das Experiment abgelaufen und was für den Folgetag geplant ist. Eventuelle Wünsche nach einem veränderten Flugablauf werden hierbei diskutiert. Am Nachmittag wird schon der nächste Flugtag vorbereitet, denn bei einer wissenschaftlichen Standardkampagne wird an drei aufeinanderfolgenden Tagen geflogen. So können die Forscher nach jedem Flug eine Zwischenauswertung ihrer Experimente vornehmen, Teile der Versuchsanlage auswechseln und gegebenenfalls überarbeiten sowie Fehlfunktionen beheben.



Wissenschaftler in Warteposition: Auch im A310 ZERO-G müssen die Wissenschaftler Start und Landung im Sitzbereich verbringen. Erst wenn die anvisierte Flughöhe erreicht ist, können sie sich ihren Experimenten widmen.

*Ready for take-off: scientists participating in the first scientific parabolic flight campaign on the new Airbus A310 have to stay in the seat area before take-off and landing. Only when the aircraft has reached its intended altitude, they can begin to work on their experiments.*



*to rehearse the crew, followed by 30 parabolas for science. After a total of three to four hours, the aircraft returns to base. Comprising 93 parabolas (3 x 31), a standard campaign offers a total of 35 minutes of microgravity. If necessary, the duration of a campaign may be extended to four or five days.*

#### Exchange of experience

*Landing is between 12.30 and 13.00 hours. Lunch is followed by a debriefing session at which a pilot explains the outward conditions of the flight. Was it particularly turbulent? Or was it possible to fly 'pure' parabolas of high microgravity quality? Next, the support team reports on the day's experiences and gives information about the coming day. By way of conclusion, one scientist from each team reports on the success of his/her experiment and the plans for the next day. At this point, any requests to change the flight sequence are discussed. As a standard scientific campaign includes three successive flight days, preparations are already made for the next flight day during the afternoon, giving researchers an opportunity to evaluate their experiments after each flight, replace, and, if necessary, rework parts of their test rig, and repair any functional defects.*



Geschafft: Nach rund drei Stunden Flugzeit und elf Minuten Schwerelosigkeit sind die Wissenschaftler und die Crew auf den Boden zurückgekehrt. Sie steigen oft mit einem Gefühlscocktail aus Freude über den schönen Flug, Enttäuschung über die baldige Rückkehr und Müdigkeit von der Anstrengung aus der Maschine. Am Ende dürfte aber die Vorfreude auf den kommenden Flugtag überwiegen.

*Job done for the day: after a flight of approximately three hours flight time and eleven minutes of microgravity, scientists and crew have returned to the ground. They often leave the aircraft with a mixture of feelings ranging from sheer joy about a thrilling flight, disappointment that it is all over so soon, and exhaustion. A feeling that probably outweighs all the others is a happy anticipation of the next flight day.*

## Medizinische Bedingungen für einen Mitflug

Ohne Untersuchung – kein Mitflug: Diese einfache Formel gilt für alle Parabelflugteilnehmer. Sie müssen sich nach einem vorgegebenen Standard medizinisch durchchecken lassen. So werden etwa Patienten mit Diabetes, großen Kreislaufproblemen oder Epilepsie nicht zugelassen, da diese Flüge für den Körper sehr anstrengend sind. Gegen eventuelle Erscheinungen der Reisekrankheit während der Parabelmanöver werden vor dem Start entsprechende Medikamente angeboten. Ein Parabelflugerfahrenes Team und ein Fliegerarzt sowie Mitarbeiter von Novespace unterstützen die Forscher in der Luft.

## Parabelflug – eine ganzkörperliche Erfahrung

### Persönlicher Eindruck eines „Mini-Astronauten“

Nach etwa 30 Minuten Flugdauer kündigt der Kapitän die erste Parabel an. Erst sind es noch fünf, dann nur noch eine Minute, 30 Sekunden, 5, ..., 3, 2, 1 – „Pull up!“, lautet das Kommando aus dem Cockpit – für alle Beteiligten das Signal, dass die Piloten das Flugzeug nun nach oben ziehen. Betrachtet man aus dem Fenster die Tragflächen im Verhältnis zum Horizont, sieht man, dass der Airbus A310 ZERO-G aus der Waagerechten nach oben „kippt“. Das spürt der Mitflieger vor allem am eigenen Körper. Auch wenn man die ersten Parabeln unter Spanngurten auf dem Boden liegend erlebt, wird klar: Die Schwerkraft wirkt plötzlich deutlich stärker und „presst“ alles zu Boden. Selbst das Heben der Arme strengt an. Die meisten Wissenschaftler verbringen diese Flugphase daher sitzend, ruhig und ohne Anstrengung. Angespantes Schweigen erfüllt die Kabine.

Dabei tönen Gradzahlen aus den Lautsprechern. „30“, „40“. Schließlich sind mehr als 50 Grad erreicht. Hier drosselt die Cockpit-Crew die Turbinen und kündigt „Injection“ an. Wie ein losgelassener Ball wird das Flugzeug, nun in den Himmel „geworfen“. Dann setzt die Schwerkraft innerhalb weniger Sekunden aus. Alles ist schwerelos. Schummrig kann einem für einen Augenblick zumute sein. Die Orientierungssinne schwanken. Die optische Wahrnehmung und das Signal des Gleichgewichtssinns passen nicht mehr zusammen. Dennoch: spontanes Gelächter. Der Wechsel in die Schwerelosigkeit wirkt wie eine schlagartig abfallende Last – im physischen aber auch im psychischen Sinne. Schwerelosigkeit berauscht, erzeugt ein übermütiges Freiheitsgefühl. Und dann hebt man einfach ab. Beim Aufschweben spürt man das Blut aus den Waden nach „oben“ strömen. „Oben“ gibt es allerdings für den Moment nicht mehr. Im Freiflug-Netz Käfig schwebt man zum Beispiel etwas unkoordiniert unter der Kabinendecke, prallt kaum merklich wieder ab und steuert wie eine über Bande gespielte Billardkugel auf die Kabinenwand zu – Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel. Man fühlt sich wie ein Fisch im Wasser – nur ohne den Wasserwiderstand. Wie ein frei gelassener, mit leichtem Gas gefüllter Ballon auf seinem Weg in den Himmel. Längere Haare stehen unweigerlich zu Berge. Macht man zunächst noch zu hektische Bewegungen, lehrt Schwerelosigkeit schnell, sich sanft, leicht und vorsichtig zu verhalten. Kraft wird vielfach überflüssig, da die Muskeln nicht mehr der Schwerkraft entgegenwirken müssen. Mikrogravitation führt zur Leichtigkeit des Seins.

Doch dann zählt der Kapitän seinen Countdown „20“ – „30“ – „Pull out“. Alles plumpst, fällt, sackt hinab – die Fesseln der Erde haben die Forscher wieder fest umschlungen. Ein ernüchterndes Gefühl: 20 Sekunden lang wieder doppelt so schwer. Immerhin ist man erleichtert, wenn der Airbus aus einem Winkel von 42 Grad nach unten wieder in die Horizontale abgefangen wird. Dann herrscht wieder normale Schwerkraft – Alltag. Mit nur wenigen Minuten Pause wiederholt sich das Auf und Ab, Schwerkraft – Hyper-Schwerkraft – Schwerelosigkeit – Hyper-Schwerkraft – Schwerkraft. Und damit das Karussell der begleitenden Emotionen: Parabelfliegen ist eine ganzkörperliche Erfahrung.

## Parabolic Flight – a Total-Body Experience

### Personal impressions of a 'mini-astronaut'

About 30 minutes into the flight, the captain announces the first parabola. Five minutes left, then one minute left, then 30 seconds, 5, ..., 3, 2, 1 – „pull up!“ is the command that comes from the cockpit. For everyone on board, this signal indicates that the ascent is beginning. You notice this if you look out of the window and see the angle between the wings and the horizon: the Airbus A310 ZERO-G is 'tilting' away from the horizontal. The effect is the most noticeable in the body. Even if you go through the first few parabolas strapped down on the floor, you notice that gravity is increasing significantly, pressing everything down. Even lifting an arm is a strain. Therefore, most scientists pass this phase of the flight sitting down, quietly, without making any effort. Tense silence reigns in the cabin; everyone has to contend with twice their habitual gravity.

Tilt angles are announced on the intercom: 30, 40. Ultimately, the aircraft reaches more than 50 degrees, at which point the cockpit crew throttles back the engine and announces 'injection'. Like a tennis ball tossed into the air, the aircraft is now 'let loose' into the sky. Then, the weight disappears within a few seconds. Everything is weightless. You may feel woozy for a moment. Your orientation falters, and your visual perception no longer matches your sense of balance. Even so, there is spontaneous laughter. Changing to microgravity feels like abruptly shedding a burden – in a physical as well as in a psychological sense. Microgravity intoxicates, generating an exuberant sense of freedom. And then, you simply lift off. As you float up, you feel the blood flowing 'upwards' from your calves. However, 'upwards' has stopped to exist for the moment. Within the cage of free-flight netting, you float upwards under the cabin roof in somewhat uncoordinated fashion, rebound very softly, and make for the cabin wall like a rail shot at billiards. Angle of incidence equals angle of reflection. You feel like a fish in water but with no resistance to work against. Like a gas-filled balloon released on its way into the sky. Longer hair inevitably rises up into all directions. While your movements are too hasty at first, microgravity teaches you quickly to behave gently, easily, and cautiously. Strength is no longer needed because muscles need not counteract gravity. Microgravity produces a 'lightness of being'.

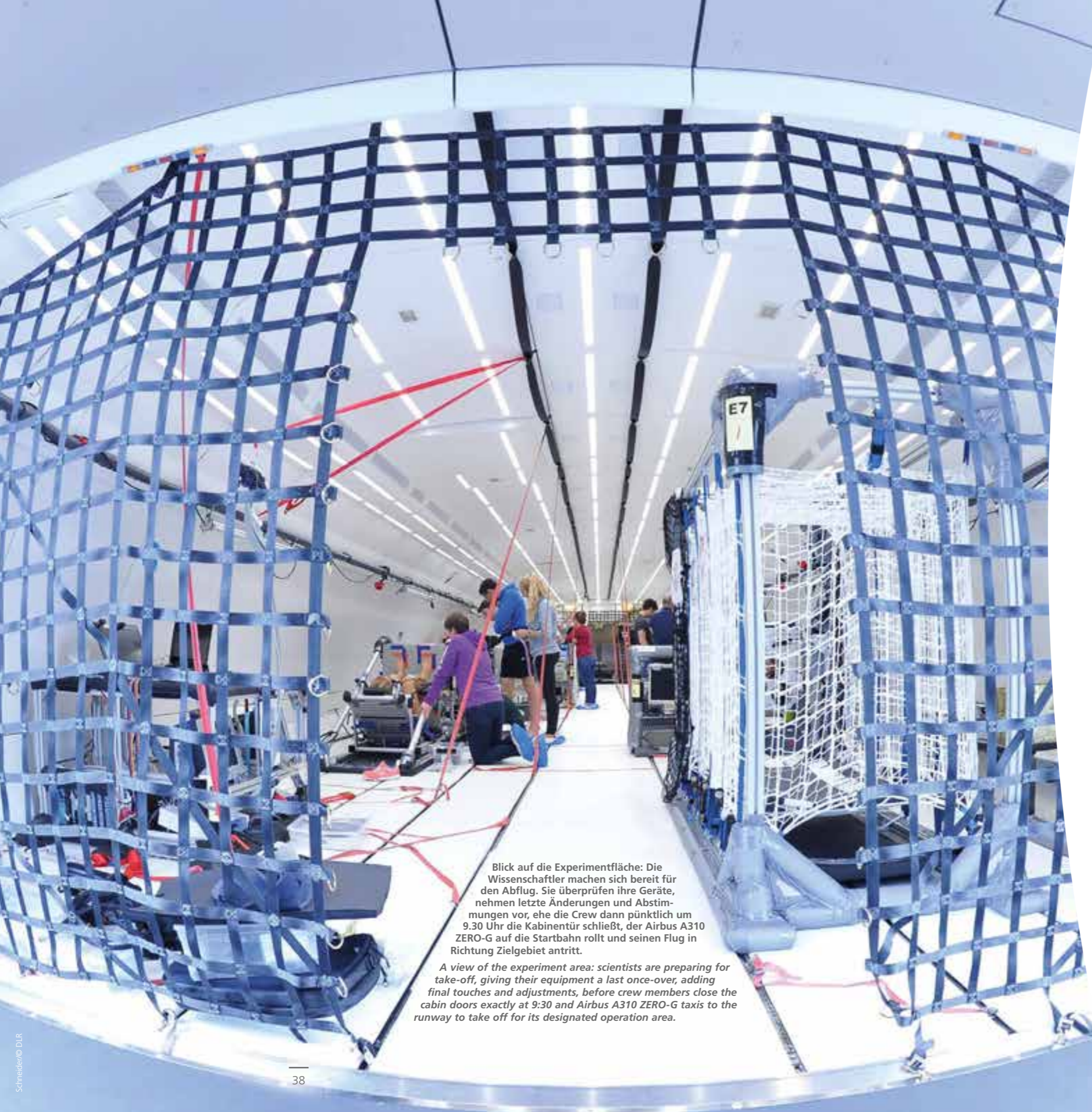
But then, the captain counts down: 20 – 30 – 'pull out'. Everything slumps, drops, sags – researchers are once again held firm by Earth's fetters. A sobering feeling: 20 seconds with double your weight. At least, it is a relief to realise that the Airbus is pulled up from an angle of 42 degrees to the horizontal. Then, normal, everyday gravity rules again. After a break of no more than a few minutes, the cycle of up and down, gravity – hyper-gravity – microgravity – hyper-gravity – gravity repeats itself. And so does the rollercoaster of accompanying emotions: flying parabolas is a total-body experience.

Parabelflüge stecken voller emotionaler Momente. Die allererste geflogene Parabel überhaupt löst zwar das intensivste Gefühl aus. Dennoch sind die Wechsel zwischen den Gefühlsschwankungen bei jedem Flug sehr stark und laufen sehr schnell ab. Denn nur mit wenigen Minuten Pause wiederholt sich das Rauf und Runter: Schwerkraft – Hyper-Schwerkraft – Schwerelosigkeit – Hyper-Schwerkraft – Schwerkraft. Und löst damit ein Karussell begleitender Emotionen aus: Parabelfliegen ist eine ganzkörperliche Erfahrung.

Parabolic flights are full of emotional moments. During one's first-ever parabola, the feeling is the most intense. However, the emotional experience repeats itself on every successive flight, with feelings changing rapidly, because the up and down pattern repeats itself in a matter of minutes: gravity – hypergravity – microgravity – hypergravity – gravity. This sets off a rollercoaster of emotions. Parabolic flights are a total-body experience.

## Medical requirements for joining a flight

No flying without examination – this simple rule applies to all participants in parabolic flights. Everyone has to undergo a thorough medical check conformable with a special standard. Thus, for example, individuals suffering from diabetes, major cardiovascular problems, or epilepsy will not be accepted because such flights impose a very great strain on the body. Before take-off, medication is offered to counteract any manifestation of travel sickness during the parabolas. While airborne, researchers are supported by a team experienced in parabolic flight, an aeromedical physician, and employees of Novespace.



Blick auf die Experimentfläche: Die Wissenschaftler machen sich bereit für den Abflug. Sie überprüfen ihre Geräte, nehmen letzte Änderungen und Abstimmungen vor, ehe die Crew dann pünktlich um 9.30 Uhr die Kabinentür schließt, der Airbus A310 ZERO-G auf die Startbahn rollt und seinen Flug in Richtung Zielgebiet antritt.

*A view of the experiment area: scientists are preparing for take-off, giving their equipment a last once-over, adding final touches and adjustments, before crew members close the cabin doors exactly at 9:30 and Airbus A310 ZERO-G taxis to the runway to take off for its designated operation area.*

## Forschung unter Weltraumbedingungen

Die Schwerkraft oder Gravitation ist auf der Erde allgegenwärtig. Von einfachen physikalischen über chemische bis zu komplexen biologischen Systemen – sie beeinflusst alle Vorgänge auf unserer Erde. Häufig ist dies unübersehbar: Gegenstände fallen zu Boden, Wasser fließt ins Tal und Gasblasen im kochenden Wasser treiben nach oben. Bei anderen Vorgängen in Natur und Technik ist ihr Einfluss jedoch nicht unmittelbar zu erkennen, so dass erst Experimente in Schwerelosigkeit ihre Bedeutung aufdecken. Zudem sind Erdanziehung und Leben in der Evolution auf unserem Planeten seit rund dreieinhalb Milliarden Jahren untrennbar miteinander verbunden: Unser menschliches Leben ist im Grunde ein immerwährender Kampf mit der Schwerkraft: vom Laufenlernen eines Babys bis zu den Gebrechen des alten und kranken Menschen. Wenn Wissenschaftler etwas über die Rolle eines bestimmten Faktors erfahren wollen, verändern sie üblicherweise seine Größe oder schalten ihn sogar ganz aus. Auf der Erde lässt sich die Schwerkraft aber nur für kurze Zeit aufheben. In Deutschland ist dies im Fallturm in Bremen möglich. Mit den TEXUS-Höhenforschungsraketen ist in 250 Kilometern Höhe Schwerelosigkeitsforschung bis zu sechs Minuten möglich. Ist länger andauernde Schwerelosigkeit notwendig, muss die Wissenschaft die Erde verlassen und in den Weltraum gehen. Dort stehen Forschungssatelliten wie FOTON und BION, die Internationale Raumstation ISS oder der „Palast des Himmels“ – die chinesische Raumstation Tiangong – zur Verfügung. Doch nur auf den Parabelflügen können die Forscher beim Experimentieren in der Schwerelosigkeit direkt dabei sein.

## Research under Space Conditions

*Gravity is ubiquitous on Earth. From simple physical or chemical to complex biological systems – it influences everything that happens on our Earth. Frequently, this is more than obvious: objects fall to the ground, water flows downhill, and gas bubbles rise up in boiling water. In other natural and technical processes, however, gravity's influence is not immediately apparent, so that its significance may only be uncovered through experiments in microgravity. Moreover, terrestrial gravity and life have been inseparably linked in the evolution on our planet for around three and a half billion years: human life is basically an everlasting struggle against gravity, from a baby learning to walk to the infirmities of old and sick people. Scientists wishing to learn about the part played by a given factor commonly modify its intensity or eliminate it altogether. On Earth, however, gravity can be nullified only for a short time. In Germany, these experiments will be conducted in the Bremen drop tower. Using sounding rockets like TEXUS weightlessness in a height of 250 kilometres is provided for about six minutes. If longer periods of microgravity are needed, science must leave Earth behind and go to space, using research satellites like FOTON and BION, the International Space Station, or the so-called Heavenly Palace – the Chinese space station Tiangong. However, the only chance for a scientist to be personally present at experiments in microgravity is on a parabolic flight.*

## Schwerelosigkeit

Physikalisch gesehen ist ein Objekt schwerelos, wenn es sich im freien Fall befindet. Ein in die Luft geworfener Ball befindet sich ebenfalls im freien Fall – ist also schwerelos. Er fliegt auf einer sogenannten Wurfparabel. Allgemein sind alle Zustände der Schwerelosigkeit Formen des freien Falls.

In Deutschland werden im Bremer Fallturm Kapseln in einer luftleeren Röhre aus 110 Metern Höhe in einen Auffangbehälter fallen gelassen. Während des Falls herrscht in der Kapsel Schwerelosigkeit. Auf Parabelflügen vollführt das Flugzeug nach dem Drosseln der Triebwerke eine Wurfparabel. Während dieser antriebslosen Flugphase herrscht Schwerelosigkeit in der Maschine. Die Umlaufbahn einer Raumstation um die Erde kann man sich als „Wurfparabel“ vorstellen, die einmal um die Erde reicht. In der Umlaufbahn gleicht die Trägheitskraft der Bewegung die Erdanziehungskraft, die auch in 400 Kilometern Höhe nur wenig abgenommen hat, aus. Das Ergebnis: Alle Gegenstände sind schwerelos. Astronauten schweben frei herum.

Der freie Fall ist jedoch ein Idealzustand, der in der Realität so gut wie nie vorkommt. Denn alle fallenden Körper erfahren noch unterschiedlich starke Störbeschleunigungen, etwa aufgrund des Luftwiderstandes und von Eigenschwingungen. Deshalb spricht man anstatt von Schwerelosigkeit oft auch von Mikrogravitation. Dieser Begriff hat sich für äußerst geringfügige Schwerkraft eingebürgert.

### Erforschung grundlegender Lebensfunktionen

Da das Leben auf der Erde unter dem Einfluss der Schwerkraft abläuft, lässt sich deren Bedeutung für viele Funktionen des Lebens nur in Schwerelosigkeit erforschen. Dabei beobachten Wissenschaftler, wie Organismen reagieren und wie biologische Vorgänge unter diesen Bedingungen ablaufen. Aus den Schwerelosigkeitsexperimenten gewinnen Forscher Erkenntnisse über die Mechanismen der Wahrnehmung und Verarbeitung von Schwerkraft vom Einzeller bis zum Menschen. Diese sind nicht nur für die Grundlagenforschung wichtig. Denn Schwerelosigkeitsexperimente helfen, die Entstehung, Verbreitung und Entwicklung des Lebens auf unserem Heimatplaneten besser zu verstehen.

### Neue Diagnostikmethoden und Therapien für die Medizin

Die Forschung in Schwerelosigkeit ist für die Medizin interessant: Sie liefert neue Erkenntnisse über das Zusammenspiel der verschiedenen Systeme des menschlichen Körpers – etwa der Muskeln und Knochen, des Herzens und des Kreislaufs sowie des Immunsystems. So konnten beispielsweise neue Therapien für die Behandlung von Osteoporose oder Instrumente zur Messung des Augeninnendrucks und der Augenbewegungen entwickelt werden. Beide Ziele – die Erforschung grundlegender Lebensfunktionen und die Entwicklung neuer Diagnostik- und Therapiemethoden für die Medizin – werden auch eine entscheidende Rolle spielen, um die Voraussetzungen für künftige Langzeitmissionen etwa zum Mond oder anderen Zielen zu schaffen.

### Innovative Materialforschung

Metallische und halbleitende Werkstoffe werden überwiegend aus dem flüssigen Zustand mittels schmelztechnischer Verfahren hergestellt. Schwerelosigkeit bietet durch das Ausschalten von Störkräften in der Schmelze entscheidende Vorteile, um die Wechselbeziehung zwischen Erstarrungsbedingungen, Werkstoffgefüge und den Eigenschaften eines Werkstoffs zu erforschen. Weiterhin lassen sich durch behälterfreie Verfahren in Schwerelosigkeit wichtige schmelzflüssige Eigenschaften wie zum Beispiel Oberflächenspannung und Zähigkeit wesentlich genauer als in irdischen Labors bestimmen. Solch präzise Daten sind für realitätsnahe Computersimulationen wichtig, die in der Industrie stetig an Bedeutung gewinnen und eine energieeffiziente und damit umweltschonende Entwicklung neuer Werkstoffe ermöglichen.

### Erweiterung der Horizonte in der Physik

Mit Experimenten unter Schwerelosigkeit lassen sich fundamentale Erkenntnisse gewinnen, die ansonsten nicht erreichbar wären. Dies trifft etwa bei sogenannten Plasmakristallen zu. Aufgrund der Schwerkraft lassen sich diese auf der Erde nur zweidimensional erzeugen. Unter Schwerelosigkeit können die Forscher auch dreidimensionale Kristalle untersuchen. Hierfür zeichnen sich langfristig auch praktische Anwendungen ab – etwa zur Beschichtung von Mikrochips. Weitere Beispiele sind die Erkundung gewisser Quantenphänomene oder die Erforschung von Frühphasen der Planetenentstehung.

### Exploration of basic vital functions

*As life on Earth is subject to the influence of gravity, its significance for many vital functions can be explored only in microgravity. Scientists observe how organisms react and how biological processes change under these conditions. From their experiments in microgravity, researchers learn about the mechanisms by which living beings, from protozoa to humans, perceive and respond to gravity. Reaching beyond basic biology, these experiments in microgravity also permit conclusions as to the origin, spread, and development of life on our home planet.*

### New methods in medical diagnosis and treatment

*Medicine, too, benefits from research in microgravity: it provides new insights into the interplay between the various systems of the human body, e.g. between muscles and bones, the heart and the circulatory system, and the immune system. Thus, for example, new methods have been developed for the treatment of osteoporosis, as well as new instruments for measuring intraocular pressure and eye movements. Both these lines of research – the exploration of basic vital functions and the development of new methods of diagnosis and treatment in medicine – will also play a crucial role in preparing for future long-term missions to the Moon or to other destinations.*

### Innovative materials research

*Metallic and semi-conducting materials are mostly produced from the liquid state by melting technologies. Eliminating the influence of disturbing forces on the melt, microgravity offers crucial advantages in exploring the interaction between solidification conditions and the microstructure and properties of a material. Moreover, containerless processing in microgravity permits measuring important melt properties, such as, for example, surface tension and viscosity, with much higher precision than in terrestrial laboratories. Such precise data are important for realistic computer simulations, the use of which is increasing rapidly in the industry as they permit developing new materials in an energy-efficient and thus environmentally-friendly way.*

### New horizons in physics

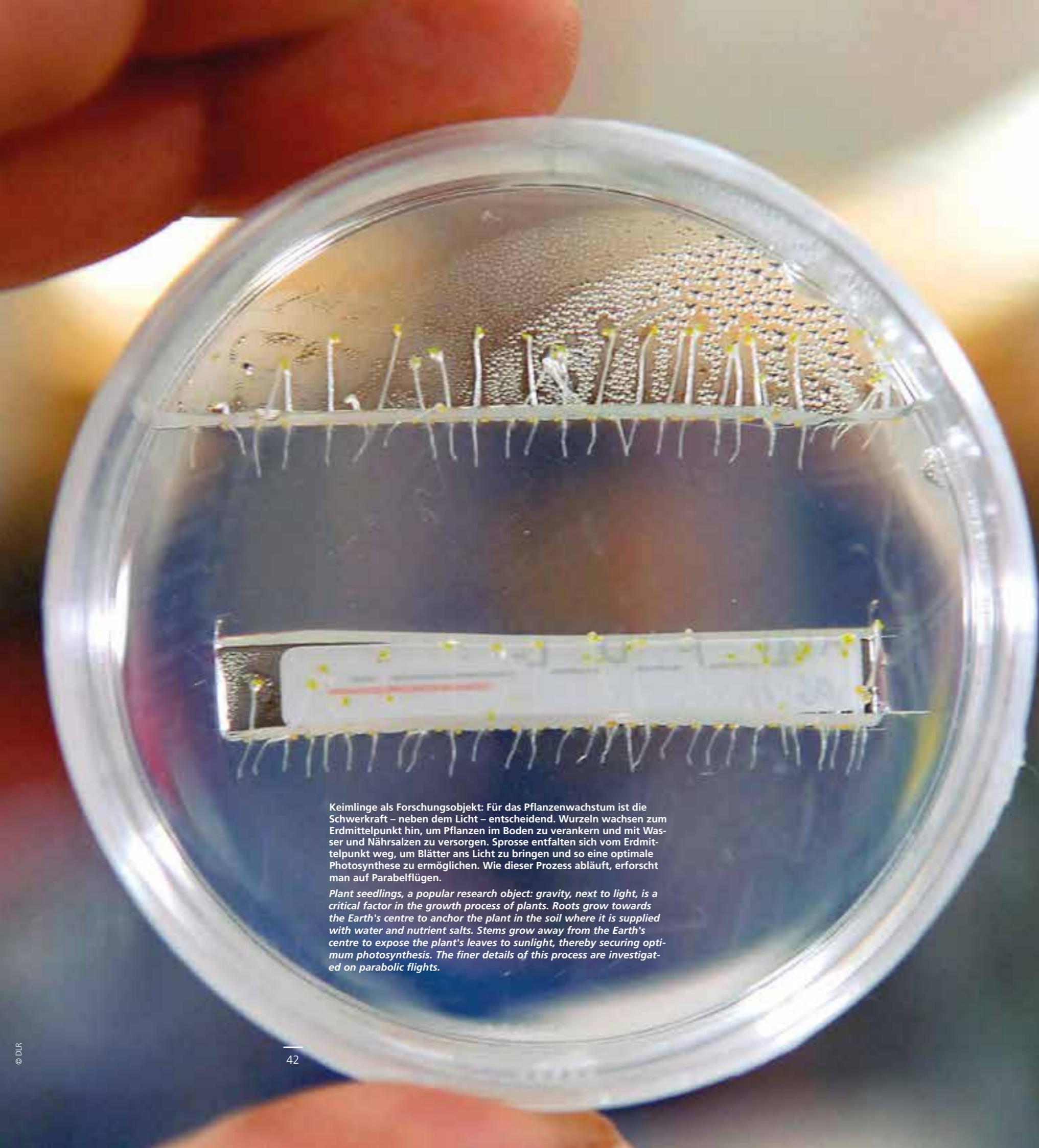
*Experiments in microgravity produce fundamental discoveries that could not be obtained in any other way. This applies, for example, to so-called plasma crystals. On Earth, because of the influence of gravity, such crystals can only be grown in a two-dimensional version. Microgravity permits researchers to study three-dimensional crystals for which practical applications are already emerging, in coating micro-chips, for instance. Further examples include the exploration of certain phenomena in quantum physics, and research into the early phases of planetary evolution.*

## Weightlessness

*In physical terms, an object is weightless when it is in free fall. A ball thrown into the air is similarly in a state of free fall, meaning that it is weightless. It is flying along a so-called ballistic trajectory. Generally, all states of weightlessness represent forms of free fall.*

*In Germany, in the Bremen drop tower, capsules are dropped from a height of 110 metres through an airless tube into a deceleration container. During the fall, microgravity reigns within the capsule. On parabolic flights, the aircraft follows a ballistic trajectory after the engines have been throttled back. During this 'idling' part of the flight, microgravity reigns in the aircraft. The orbit of a space station around the Earth can be visualised as a 'parabolic trajectory' that encircles the Earth. In orbit, momentum equalises the gravitational pull of the Earth, which is still practically undiminished even at an altitude of 400 kilometres. The result: all objects are weightless. Astronauts float freely in space.*

*However, free fall is an ideal condition that is almost never found in reality. All falling bodies are exposed to spurious accelerations of different intensity caused by, for instance, air drag and natural vibrations. This is why, instead of weightlessness, the term 'microgravity' has come to be used to describe extremely low gravity.*



Keimlinge als Forschungsobjekt: Für das Pflanzenwachstum ist die Schwerkraft – neben dem Licht – entscheidend. Wurzeln wachsen zum Erdmittelpunkt hin, um Pflanzen im Boden zu verankern und mit Wasser und Nährsalzen zu versorgen. Sprosse entfalten sich vom Erdmittelpunkt weg, um Blätter ans Licht zu bringen und so eine optimale Photosynthese zu ermöglichen. Wie dieser Prozess abläuft, erforscht man auf Parabelflügen.

*Plant seedlings, a popular research object: gravity, next to light, is a critical factor in the growth process of plants. Roots grow towards the Earth's centre to anchor the plant in the soil where it is supplied with water and nutrient salts. Stems grow away from the Earth's centre to expose the plant's leaves to sunlight, thereby securing optimum photosynthesis. The finer details of this process are investigated on parabolic flights.*

## Biowissenschaftliche Forschung

Biowissenschaftler versuchen mit der Forschung auf Parabelflügen in den letzten Jahren drei Hauptfragen zu beantworten: Gravitationsbiologen interessieren sich dafür, wie sich die Schwerkraft auf Einzeller, Pflanzen und Tiere auswirkt. Immunologen forschen am Menschen und an Zellkulturen, um herauszufinden, warum unser körpereigenes Abwehrsystem in Schwerelosigkeit geschwächt ist. Außerdem versuchen viele verschiedene Wissenschaftler interdisziplinär eine Antwort auf die Frage zu finden, wie sich unser Körper an die Bedingungen der Schwerelosigkeit anpasst. Sie analysieren hier vor allem Reaktionen des Gleichgewichtssystems sowie die Bewegungskoordination und die kognitive Leistungsfähigkeit des Menschen. Für das Pflanzenwachstum ist die Schwerkraft – neben dem Licht – entscheidend: Wurzeln wachsen zum Erdmittelpunkt hin, um Pflanzen im Boden zu verankern und mit Wasser und Nährsalzen zu versorgen. Sprosse entfalten sich vom Erdmittelpunkt weg, um Blätter ans Licht zu bringen und so eine optimale Photosynthese zu ermöglichen. Diese gerichtete Entwicklung nennt man Gravitropismus. Aber auch Einzeller wie das Augentierchen Euglena oder das Pantoffeltierchen Paramecium orientieren sich im Wasser an der Schwerkraft und suchen so optimale Wachstums- und Lebensbedingungen auf. Dieses Verhalten wird als Gravitaxis bezeichnet. Wegen der großen Bedeutung dieser Prozesse und der zentralen Rolle der Schwerkraft versuchen Wissenschaftler seit vielen Jahren, den Rätseln der Schwerkraftwahrnehmung und -verarbeitung auf die Spur zu kommen. Und in der Tat wurden gerade durch Schwerelosigkeitsexperimente – nicht zuletzt auf Parabelflügen – in den letzten Jahren Fortschritte erzielt.

## Research in Life Sciences

*Three key questions have dominated life science research on parabolic flights in recent years: gravitational biologists are interested to study how gravity affects single-cell organisms, plants and animals. Immunologists have been investigating the human organism and cell cultures to find out why microgravity weakens our body's immune system. Other scientists, working in interdisciplinary teams, seek to answer the question how human body systems manage to adapt to microgravity conditions, analysing in particular the reactions of the vestibular system as well as muscular coordination and cognitive performance. Gravity, next to light, is a critical factor in the growth process of plants. Roots tend to grow towards the Earth's centre to anchor the plant in the soil where it is supplied with water and nutrient salts. Shoots and stems grow away from the Earth's centre to expose the plant's leaves to sunlight, thereby securing optimum photosynthesis. This gravity-directed growth behaviour is called gravitropism. But even single-cell organisms that float in water, such as 'eye animalcules', Euglena, or 'slipper animalcules', Paramecium, use gravity for orientation and can thus choose the place offering the best possible conditions for their growth and survival. This behaviour is called gravitaxis. Given the great significance of these processes and the key role gravity plays in them, scientists have tried to unravel the mystery of gravity perception and gravity transduction for many years. Microgravity research has achieved considerable progress over the past few decades, not least thanks to parabolic-flight experiments.*



Fische als Modelltiere für die Gleichgewichtsforschung

*Fish as model organisms for vestibular research*

## Gravitationsbiologie: oben oder unten?

### Gravitaxis beim Augentierchen: 100-jährige Diskussion beendet

Viele Mikroorganismen orientieren sich im Wasser mittels Schwerkraft und versuchen so, einen für Photosynthese, Ernährung und Fortpflanzung optimalen Lebensraum zu finden. Jahrzehntlang gab es Streit unter den Wissenschaftlern, ob die Schwerkraftreaktion dieser Organismen rein physikalisch sei oder ob physiologische Prozesse zugrunde liegen. Mit Ergebnissen aus Experimenten auf Parabelflügen und TEXUS-Höhenforschungsraketen konnten Wissenschaftler des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin sowie der Universität Erlangen die Frage nun beantworten: Auch Mikroorganismen besitzen einen physiologischen Mechanismus zur Schwerkraftwahrnehmung. Im Zuge der Evolution wurden sogar zwei verschiedene Systeme entwickelt. Das Geißeltierchen „Loxodes“ nimmt die Schwerkraft über spezielle Organelle – die sogenannten Müller-Vesikel wahr. Das Augentierchen Euglena und das Pantoffeltierchen Paramecium erkennen dagegen die Schwerkraftrichtung über den Dichteunterschied zwischen der Zellflüssigkeit und dem umgebenden Medium.

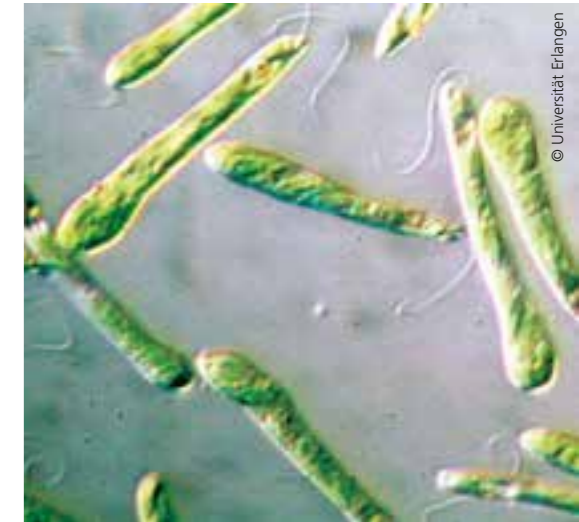
Auch die einzelnen Schritte dieser Orientierungsreaktion von der Reizwahrnehmung über seine Umwandlung in ein zelleigenes Signal bis zur eigentlichen Reaktion für die Gravitaxis ist bei Euglena dank der Schwerelosigkeitsexperimente kein Geheimnis mehr. Durch speziell angeordnete mechanosensitive Kanäle in der Zellmembran strömt Calcium in die Zelle ein, wenn die Lage der Zelle im Raum bestimmte Bedingungen erfüllt. Das Calcium aktiviert dann in der Zelle über eine Reihe von Proteinen – wie beispielsweise Calmodulin – Enzyme. Einer dieser Biokatalysatoren der Zelle stellt aus Adenosintriphosphat (ATP) – der Energiewährung der Zelle – cyclisches Adenosinmonophosphat (cAMP) her. Dieses Molekül ist ein verbreiteter Botenstoff, der seinerseits Proteine oder Ionenkanäle regulieren kann. Wie das cAMP dann auf den Geißelschlag wirkt und damit für die richtige räumliche Orientierung im Lebensraum Wasser sorgt, ist allerdings noch unklar. Neuere Befunde zeigen, dass auch die Phosphorylierung von Proteinen – ein sehr verbreiteter Mechanismus in Zellen, um die Proteinaktivität zu steuern – durch wechselnde Schwerkraftbedingungen beeinflusst wird. Das von den Erlanger Forschern zur Analyse des Bewegungsverhaltens von Euglena entwickelte Bildverarbeitungssystem wird heute in vielen Ländern der Erde zur Qualitätskontrolle von Frischwasser eingesetzt, da die Veränderung des Bewegungsverhaltens von Euglena streng mit der Konzentration von Schadstoffen in Gewässern verbunden ist.

## Gravitational Biology: Up or Down?

### Gravitaxis in Euglena: a 100-year argument settled

Many microorganisms that live in water use gravity for their orientation in their search for the best possible habitat in terms of photosynthesis, nutrition, and reproduction. For many decades, there has been disagreement among scientists as to whether the response of these organisms to gravity is a result of simple physics, or whether any physiological processes are involved. It has now been established by a series of experiments performed by research teams from the DLR Institute of Aerospace Medicine and from Erlangen University on parabolic flights and TEXUS sounding rockets that microorganisms possess a physiological mechanism for the perception of gravity. Evolution has produced two different systems: one is to be found in Loxodes flagellates, which have a special organelle – called the Mueller vesicle - with which they perceive gravity. Euglena, or eye animalcules, and the slipper animalcule Paramecium, by contrast, recognise the direction of gravitational pull from the difference in density between cell fluid and the surrounding medium.

Thanks to experiments in microgravity, even the individual steps of the gravity-directed response process, i.e. the perception of the original stimulus, its transformation into a signal within the cell and the eventual physical response mechanism, are now no longer a secret. Passing through a specially located mechanosensitive channel in the cell membrane, calcium enters the cell every time the cell's orientation in space changes in a certain way. Once inside the cell, the calcium passes through a series of proteins such as calmodulin and activates several enzymes. One of these biological catalysts converts adenosine triphosphate (ATP) – the cell's 'energy currency' – into cyclical adenosine monophosphate (cAMP). Acting as a second messenger, this molecule is a messenger protein abundantly present in cells and regulates protein synthesis and the formation of ion channels. However, the exact way in which cAMP influences flagellar motility and thus ensures the organism's correct orientation in the water is as yet unknown. Recent findings suggest that the phosphorylation of proteins, a widely observed cellular mechanism that controls protein activity, is influenced by changed gravity conditions, too. Incidentally, the image processing system that was developed by scientists of Erlangen University to study the motional behaviour of Euglena has meanwhile been introduced in many countries to a device for fresh-water quality control, since a change in motional behaviour of Euglena is a powerful indicator of increased pollutant concentrations.



Das Augentierchen Euglena gracilis – ein Modelleinzeller für die Forschung

*Euglena gracilis – a model single-cell organism for science*

Die meisten Pharmaka funktionieren in unserem Körper nach einem bestimmten Wirkmechanismus: Ein Bestandteil des Arzneimittels – die sogenannten Liganden – docken an einem Rezeptor einer Membran an, blockieren ihn gegenüber den körpereigenen Botenstoffen – den sogenannten Neurotransmittern – und verändern so die Durchlässigkeit dieser Körperbarriere gegenüber dem Wirkstoff des Arzneimittels. Auch Schwerelosigkeit macht sie fluid. Doch ist dieses Wechselspiel zwischen Rezeptor und Ligand auch von einer Veränderung der Schwerkraftbedingungen betroffen? Parabelflüge sollen darüber Aufschluss geben.

*Most pharmaceuticals work according to the same active mechanism. One ingredient, called ligand, attaches to a specific receptor on a cell membrane, blocking this cell from responding to the human body's own messenger substances – called neurotransmitters – and increasing the permeability of this physical barrier for the active substance of the pharmaceutical. Microgravity, too, increases the permeability of the barrier. But does a change in gravity also affect the interaction between the receptor and the ligand? Scientists hope to find the answer through parabolic flight experiments.*





### Wurzel und Spross kennen die Wachstumsrichtung

Pflanzen richten ihr Wachstum an der Schwerkraft aus. Doch wie wird sie wahrgenommen und verarbeitet? Wenn zum Beispiel ein Getreidehalm durch Wind zu Boden gedrückt wurde, nehmen Organismen oder Pflanzenorgane diesen Reiz wahr und eine Signalleitung setzt eine Wachstumsreaktion in Gang, die den Halm wieder aufrichtet. Die eigentliche Reizerkennung findet in spezialisierten Zellen statt, die jede Lageänderung eines Pflanzenorgans in Bezug zur Schwerkraftrichtung erkennen. Gemäß der Stärke-Statolithen-Hypothese nutzen höher entwickelte Pflanzen stärkegefüllte Organellen in diesen Zellen als Statolithen, die die Schwerkraftrichtung „messen“. Zwei Arbeitsgruppen der Universität Bonn haben in den letzten Jahren mit der einzelligen Grünalge Chara und Pflanzen wie Kresse oder der Ackerschmalwand (Arabidopsis) experimentiert, um ihre Schwerkraftwahrnehmung und Signalverarbeitung besser zu verstehen. Schwerelosigkeitsexperimente trugen maßgeblich zu der Erkenntnis bei, dass ein hochdynamisches Proteinsystem, das sogenannte Aktomyosin, für die Lage der Statolithen verantwortlich ist und zudem ihre Verlagerung bei geänderter Schwerkraftrichtung kontrolliert. Aktomyosin ist bei Tieren und Menschen für die Funktion der Muskeln zuständig.

Dieses Eiweiß und die Schwerkraft halten die Statolithen in einer stabilen Gleichgewichtsposition, die gestört wird, wenn die Pflanze zum Beispiel geknickt oder durch starken Wind und Regen geneigt wird. Dann sinken die Statolithen der Schwerkraftrichtung folgend auf die untere Zellflanke. Das Aktomyosin bringt die Statolithen mit den eigentlichen Sensoren in Kontakt. Diese Rezeptorproteine werden durch den Kontakt mit den Statolithen aktiviert und erzeugen ein physiologisches Signal, das in die Wachstumssteuerung eingreift und so die Rückführung des Pflanzenorgans in die ursprüngliche Wachstumsrichtung einleitet. Ergebnisse aus den letzten Parabellflugexperimenten zeigen, dass die Schwerkraftrezeptoren sowohl bei Chara als auch bei höheren Pflanzen durch Wechselwirkungen zwischen Proteinen auf der Statolithenoberfläche und den Rezeptoren aktiviert werden. Diese Ergebnisse unterstützen die Stärke-Statolithen-Hypothese. Forscher untersuchen nun mit modernsten molekularbiologischen Methoden die von der Schwerkraft ausgelösten genetischen, proteinbiochemischen und stoffwechselphysiologischen Veränderungen.

Hier hat eine Arbeitsgruppe aus Tübingen in den letzten Jahren Fortschritte erzielt. In zahlreichen Experimenten auf Parabellflügen, Höhenforschungsraketen und Satelliten wurden pflanzliche Zellkulturen – meist Arabidopsis – wechselnden Schwerkraftbedingungen ausgesetzt. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass in diesen nicht-spezialisierten Zellen Schwerkrafteffekte und entsprechende stoffwechselphysiologische Änderungen auftreten. Bei einer molekularen Analyse konnten die Wissenschaftler nachweisen, dass verringerte Schwerkraft einen Einstrom von Calciumionen und mittels einer Enzymaktivierung (NADPH-Oxidase) eine erhöhte Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)-Produktion auslöst. Beide Botenstoffe greifen in die Regulation der Gen- und Proteinexpression ein und können über Proteinaktivierung (Proteinphosphorylierung) die biologische Zellfunktion verändern. Mit diesen Ergebnissen kommen die Wissenschaftler der Lösung des Rätsels, wie Zellen auf äußere Reize reagieren, einen Schritt näher. Experimente von Freiburger Wissenschaftlern mit Arabidopsis-Keimlingen weisen in dieselbe Richtung. Sie konnten zeigen, dass unter wechselnden Schwerkraftbedingungen zelluläre Regulationsnetzwerke massiv umprogrammiert werden. Hierbei spielt der von dem Gen AtPIN3 kodierte Transport des Wachstumshormons Auxin eine Rolle. Die Wissenschaftler stellten ein systembiologisches Arbeitsmodell auf, das nun in weiteren Experimenten überprüft werden muss.

Pflanzen sind fest an ihren Standort gebunden und können sich ändernden Umweltbedingungen (Trockenheit, Hitze, Kälte, Fressfeinde) nicht ausweichen. Um überleben zu können, müssen sie daher mögliche Gefahren schnell erkennen und Abwehrmaßnahmen ergreifen wie zum Beispiel die Verstärkung der Zellwände oder die Produktion von giftigen Stoffen. Im Parabellflugexperiment wollen Tübinger Wissenschaftler die Reaktion von Pflanzenzellkulturen auf Schwerkraftänderungen über die Änderung wichtiger Parameter im Zellinneren untersuchen.

*Plants are tied to a fixed habitat and are unable to evade adverse environmental conditions (drought, heat, cold, and herbivorous animals). In order to survive, they must therefore recognise a potential hazard and take remedial action against it by, for instance, thickening their cell walls or by producing toxic substances. In a parabolic flight experiment, scientists from Tübingen intend to study the response of plants to changes in gravity by looking at important parameter changes in the interior of plant cells.*

### Roots and stems know which way to grow

*Plants grow along the lines of gravity. But how is gravity perceived and transduced? If, for instance, a grain plant is blown over and pressed to the ground by a strong wind, an organ within the plant perceives this stimulus and triggers a growth reaction so that the stalk eventually resumes its vertical position. The stimulus itself is identified by specialised cells that recognise any directional change of a plant organ relative to the pull of gravity. According to the starch statolith hypothesis, plants use a starch-filled organelle in these cells as a statolith that 'measures' the direction of gravity. Two research teams at Bonn University have over the past few years experimented with Chara, a single-celled green alga, as well as plants like cress and mouse-ear cress (Arabidopsis) to understand their graviperception and signal transduction mechanisms. Microgravity experiments have considerably improved our understanding of how a highly dynamic protein system called actomyosin effects the orientation of the statolith and also controls its displacement when the direction of gravity changes. In animals and humans, actomyosin is responsible for the way our muscles work.*

*It is this protein and gravity that keep the statoliths in a stable equilibrium position. The equilibrium is upset if, for instance, a plant is kinked or depressed by strong wind and rain. In that case, the statoliths sink to the bottom flank of the cell, following the pull of gravity. The actomyosin brings the statoliths in contact with the receptor proteins which act as the plant's proper 'sensors'. Once activated, these will generate a physiological signal that intervenes in the growth process and thus triggers a return of the plant to its original direction of growth. Results of recent parabolic flight experiments have shown that both in Chara and in higher-order plants gravity receptors are activated by their interaction with proteins on the statolith's surface. These results support the starch-statolith hypothesis. Thanks to advanced methods in molecular biology, researchers can now study the genetic, protein-biochemical and metabolic changes triggered by gravity in detail.*

*A group of Tübingen scientists has recently made major progress in the matter. In a large series of experiments on parabolic flights, sounding rockets and satellites, cultures of plant cells, mostly from the Arabidopsis plant, were exposed to altered gravity conditions. The results clearly indicate that even in these non-specialised cells, gravity effects and the corresponding metabolic changes occurred. The scientists were able to demonstrate by means of a molecular analysis that a drop in gravity causes an increased influx of calcium ions, which, as a result of enzyme activation (NADPH oxidase), also leads to an increased production of hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Both these messenger substances intervene in the regulation of gene and protein expression and can, via protein activation (protein phosphorylation), modify the biological function of a cell. These results bring scientists one step closer towards solving the mystery of how cells respond to external stimuli. Experiments carried out by a group of Freiburg scientists with Arabidopsis seedlings point in the same direction. They were able to show that changed gravitational conditions massively re-programme cellular regulation networks. One key mechanism involved appears to be the transport of the growth hormone auxin encoded by the AtPIN3 gene. The systems biologists created a working model which now needs to be validated in further experiments.*



Die Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*) ist die Modellpflanze der Botaniker und ideal für die Forschung in Schwerelosigkeit geeignet.

The mouse-ear cress (*Arabidopsis thaliana*) is a model plant for botanists and an ideal object for research under space conditions.



Verringerte Schwerkraft stört die Bewegungs- und Gleichgewichtskontrolle, da die relevanten sensorischen Informationssysteme gestört sind. Am stärksten ist dieser Effekt, wenn nach der Schwerelosigkeit die Schwerkraft wieder auf den Menschen wirkt. Astronauten sind nach ihrer Rückkehr aus dem All besonders beim Gehen und Stehen beeinträchtigt, was teilweise nicht mehr ohne Hilfe möglich ist. Deshalb brauchen Astronauten für Langzeitmissionen ein spezielles Gleichgewichtstraining. Bei Parabelflugexperimenten werden die neuronalen Anpassungen unter Schwerelosigkeit an verschiedene Gleichgewichtsaufgaben untersucht.

*Reduced gravity upsets motion control and vestibular control in humans because our relevant sensory information systems are thrown out of balance. This effect is the most noticeable in the human body when gravity returns after a period of microgravity. In astronauts, the ability to walk and stand upright is impaired after longterm missions, and sometimes completely absent without physical support. Astronauts therefore require a special kind of equilibrium training. On parabolic flights, scientists can study neuronal adaptation to microgravity during various equilibrium exercises.*



## Humanphysiologische Forschung

Astronauten im Weltraum haben mit ganz ähnlichen Gesundheitsproblemen wie der alternde Mensch auf der Erde zu kämpfen: Die fehlende Schwerkraft und die mangelnde Bewegung und Belastung des Körpers lösen einen Leistungsabfall im Herz-Kreislauf-System, Störungen des Gleichgewichts, der Bewegungskoordination und des Immunsystems sowie Muskelschwund und Knochenabbau (Osteoporose) aus. Zwar sind Muskel- und Knochenabbau erst nach Tagen oder Wochen in Schwerelosigkeit nachweisbar, andere Veränderungen zeigen sich jedoch unmittelbar nach Eintritt in die Schwerelosigkeit und können daher auf Parabelflügen untersucht werden. Für manche Prozesse ist gerade der Wechsel der Schwerkraftbedingungen während der Parabeln interessant. In den letzten Jahren bildeten Forschungen zum Immunsystem sowie zur Bewegungskoordination in Zusammenhang mit der kognitiven Leistungsfähigkeit zwei Schwerpunkte auf Parabelflügen.

## *Research in Human Physiology*

*Astronauts in space struggle with health problems that are quite similar to those of ageing people on Earth: lack of gravity and deficient physical exercise cause the performance of the cardiovascular system to deteriorate, impair the sense of equilibrium as well as muscular coordination and the immune system, and lead to muscular atrophy and bone degradation (osteoporosis). Compared to the terrestrial ageing process, these changes are accelerated in astronauts but are reversible after their return to Earth, providing excellent conditions for studying these adaptation processes. While the degradation of muscles and bones becomes evident only after days or weeks, other changes emerge immediately after the onset of microgravity so that they can be investigated on parabolic flights. Some adaptation processes can be studied particularly well during alternating gravity conditions between parabolas. In recent years, human-physiology research on parabolic flights has been focusing on exploring the immune system, muscular coordination, and cognitive performance.*



Atemanalyse im Einsatz auf der Intensivstation der Ludwig-Maximilians-Universität München

*Clinical application of a breath analyser in the intensive care unit of the Munich university hospital (Ludwig-Maximilians-Universität)*

## Immunsystem

Der Aufenthalt des Menschen im Weltraum führt im Organismus zu vielfältigen Anpassungsvorgängen. Dabei können auch schwerwiegende, gesundheitsgefährdende Veränderungen auftreten, die mit Reaktionen von intensiv-medizinisch behandelten Patienten vergleichbar sind. So erfahren sowohl Astronauten als auch Schwerstkranke ausgeprägte psychische und physische Stresssituationen. In Folge fehlender Bewegung, Störung der Schlaf-Wach-Zyklen und der Belastung durch den Weltraumaufenthalt beziehungsweise durch die Lebensgefahr beim Patienten auf der Intensivstation kommt es in beiden Situationen zu ausgeprägten, mitunter lebensgefährlichen Veränderungen der Immunabwehr. So wird durch den Weltraumaufenthalt das Immunsystem von Astronauten beeinträchtigt. Ursachen und Mechanismen liegen jedoch weitgehend im Dunkeln, was eine Prävention nahezu unmöglich macht. Somit ist diese Forschung nicht nur für die Raumfahrt, sondern auch für den Menschen auf der Erde von Bedeutung. Parabelflüge bieten hier ausgezeichnete Möglichkeiten, den Einfluss veränderter Schwerkraftbedingungen und anderer Stressfaktoren zu untersuchen. Wissenschaftler versuchen in diesen Projekten, das komplexe Netzwerk der Immunreaktionen mit innovativen Methoden zu entwirren – von der molekularen und zellulären Ebene bis zum Menschen.

### Probleme der Immunabwehr im Weltraum und auf der Intensivstation

Stressfaktoren wie Isolation, Arbeitsbelastung und Störungen des Schlafrhythmus schwächen das Immunsystem bei Astronauten. Aber auch die besonderen Bedingungen des Weltraums wie Schwerelosigkeit und Strahlung tragen zu dieser Beeinträchtigung bei. Mit vergleichbaren Problemen haben Schwerkranke auf der Erde zu kämpfen. In beiden Fällen sollte einerseits eine ausreichende Abwehrkraft zum Schutz vor Krankheitskeimen vorhanden sein, andererseits das Immunsystem nicht überbeansprucht werden. Der ganze Mensch steht im Mittelpunkt der Immunforschung einer Arbeitsgruppe der Ludwig-Maximilians-Universität München. Begleitend zum Immuno-Experiment auf der Internationalen Raumstation ISS wurden auf Parabelflügen verschiedene Komponenten des Abwehrsystems gemessen. Hierzu wurden zu bestimmten Zeiten vor, während und nach dem Parabelflug Blut-, Speichel- und Urinproben genommen sowie psychologische Tests zur Stressanalyse durchgeführt. Zusätzlich wurde für dieses Projekt eine neue Atemgasanalytik entwickelt. Mit deren Hilfe kann man nicht-invasiv bestimmte Substanzen direkt in der ausgeatmeten Luft erfassen, um Anpassungsphänomene oder krankheitsbedingte Veränderungen des Organismus in ihrem Verlauf online zu verfolgen. Dieses Verfahren wurde kürzlich an Patienten mit Lungenentzündung oder Lungenversagen in der Klinik erfolgreich getestet. Die bisherigen Ergebnisse haben bereits unser Verständnis stressabhängiger, immunologischer Anpassungsvorgänge erweitert. Zukünftige Experimente auf Parabelflügen und im ISS-Projekt „Immuno-2“ werden dieses Wissen abrunden und vielleicht zu neuen vorbeugenden oder therapeutischen Maßnahmen für den Einsatz gleichermaßen beim Astronauten wie beim Schwerkranken in der Intensivmedizin führen.

## Immune System

*The human organism changes in many different ways during a stay in space. Possibly grave enough to constitute a health risk, these changes may be compared to the reactions of patients under intensive medical care. Thus, astronauts as well as seriously ill people experience significant mental and physical stress situations. In either of the two situations, lack of exercise, a disturbed circadian rhythm, and the stress caused by a stay in space and/or the mortal danger threatening intensive care patients lead to marked, occasionally life-threatening changes in the immune system. However, the causes and mechanisms of these impairments are still largely in the dark, which renders prevention almost impossible. Consequently, this field of research is important not only for astronauts but also for people on Earth. In this context, parabolic flights offer excellent opportunities to investigate the influence of changing gravity conditions and other stressors. The aim of these projects is to unravel the complex network of immune reactions with innovative methods – from the molecular and cellular level to the entire human organism.*

### Immune defence problems in space and in intensive care

*In astronauts, stressors like isolation, a heavy workload, and a disturbed circadian rhythm weaken the immune system. However, the special conditions prevailing in space, such as microgravity and radiation, also contribute towards this impairment. Critically ill people on Earth struggle with comparable problems. In both cases, the body's defences should be strong enough to protect it from pathogens while the immune system should not be overburdened. A research team of the Ludwig Maximilian University of Munich works on the human organism as a whole. In a parallel study to support the Immuno experiment on the International Space Station, various components of the human defence system were measured on parabolic flights. Blood, saliva, and urine samples were taken at specified times before, during, and after a parabolic flight, and psychological tests were carried out to analyse stress. In addition, they developed a new method of respiratory gas analysis, a non-invasive method which permits detecting certain volatile substances in exhaled air so that the cause of adaptation issues or illness-related changes in the human organism can now be tracked online. Recently, the method has successfully passed a clinical test involving patients with pneumonia or lung failure. The results obtained so far have already added to our understanding of stress-related immunological adaptation processes. Future experiments on parabolic flights and under the Immuno-2 ISS project will complement this knowledge, possibly leading to the development of new methods of prevention or therapy for astronauts as well as for critically ill people in intensive care.*

Wissenschaftler haben unter anderem bei Schilddrüsenkrebszellen beobachtet, dass schon der Reiz einer einzigen Parabel mit 22 Sekunden langer Schwerelosigkeit ausreicht, die Struktur des Zytoskeletts zu ändern sowie die Gen- und Proteinexpression zu beeinflussen.

*By studying various specimens such as thyroid cancer cells, scientists have found that the stimulus exerted by a single parabola with 22 seconds of microgravity is sufficient to alter the cytoskeleton and influence the expression of genes and proteins.*

### Verhalten von Immunzellen in der Schwerelosigkeit

Im Unterschied zur physiologischen Forschung am „ganzen“ Menschen – der sogenannten integrativen Physiologie – untersuchen zwei Arbeitsgruppen der Universität Magdeburg menschliche Zellen, um die Mechanismen für die Beeinträchtigung des Immunsystems in Schwerelosigkeit aufzuklären. Immunzellen patrouillieren ständig durch alle Gewebe und Organe unseres Körpers, um Gefahren wie eingedrungene Keime entgegenzutreten. Dabei legen sie Tag für Tag enorme Distanzen zurück. Sie bewegen sich nicht nur frei innerhalb von Geweben, sondern müssen auch andauernd Barrieren überwinden, um beispielsweise aus dem zirkulierenden Blut in die Gewebe zu gelangen. Auch heften sich verschiedene Zelltypen des Immunsystems ständig aneinander an, wobei sie wichtige Informationen austauschen und sich gegenseitig aktivieren. Dies alles ist für die Abwehr von Fremdkörpern notwendig.

Was wäre, wenn Schwerelosigkeit die Bewegung oder das Anheften der Immunzellen nachhaltig stören würde? Dieser Frage sind Wissenschaftler nachgegangen, indem sie Moleküle und Mechanismen in Zellen des Immunsystems untersuchten, die für diese Anheftung, Wanderung und das Durchbrechen von Gewebearrängen notwendig sind. Erste Ergebnisse der Universitäten Magdeburg/Zürich zeigen, dass verschiedene Zelltypen des Immunsystems sehr unterschiedlich auf den Wegfall der Schwerkraft reagieren. So kommt es in menschlichen Endothelzellen zu einer verstärkten Bildung von ICAM-1 – einem für die Zellanheftung wichtigen Oberflächenmolekül. Andererseits antworten monozytäre Zellen mit einer Herunterregulation des ICAM-1. Da diese Zellen der angeborenen Immunabwehr körperfremde Eindringlinge attackieren, ist so ein wichtiger Mechanismus gestört, der für ihr Anheften an Oberflächen und an anderen Immunzellen unverzichtbar ist.

Dieser Befund könnte sogar erklären, warum die spezifischen Immunzellen in Schwerelosigkeit nicht mehr richtig funktionieren. Diese sogenannten T-Lymphocyten müssen eng und andauernd an den monozytären Zellen anheften, um sich vollständig zu aktivieren und zu teilen – ein Prozess, der in Schwerelosigkeit nicht funktioniert. Anzunehmen, dass diese Veränderungen die alleinige Erklärung für die Immunschwäche der Astronauten sind, wäre aber sicher zu einfach. Neuere Parabelflugergebnisse zeigen, dass auch der sogenannte IL-2-Rezeptor auf der Oberfläche der T-Lymphocyten herunterreguliert wird. Dieser Rezeptor vermittelt das wesentliche Signal zur Vermehrung der aktivierten Lymphocyten. In einem anderen Projekt haben Forscher der Universitäten Magdeburg/Aarhus begonnen, menschliche Endothel- und Krebszellen veränderten Schwerkraftbedingungen auszusetzen, um schnelle Änderungen im Cytoskelett sowie im Expressionsmuster der Zellen – also Reaktionen auf der genetischen und molekularbiologischen Ebene – zu erkennen. Erste Versuche ergaben bereits, dass sich in Schwerelosigkeit die genetischen Abläufe umfangreich verändern. Die Konsequenzen hieraus müssen in weiteren Experimenten noch geklärt werden.

In einem Experiment haben Forscher der Universitäten Magdeburg/Aarhus begonnen, menschliche Endothel- und Krebszellen veränderten Schwerkraftbedingungen auszusetzen, um schnelle Änderungen im Cytoskelett sowie im Expressionsmuster der Zellen – also Reaktionen auf der genetischen und molekularbiologischen Ebene – zu erkennen.

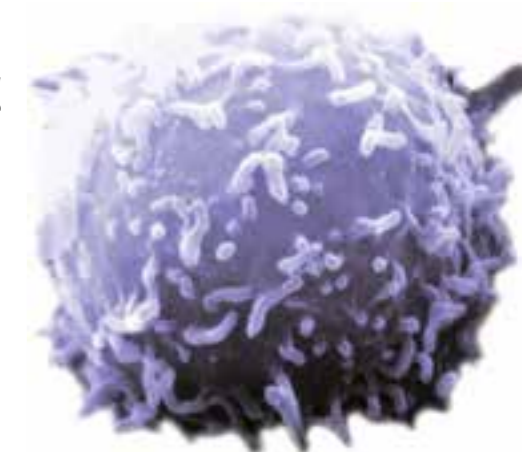
In an experiment, researchers from the universities of Magdeburg and Aarhus have begun to expose human endothelium and cancer cells to altered gravity to detect certain fast alterations of the cytoskeleton and of the cells' expression patterns, i.e. cell reactions at the genetic and molecular level.

### Behaviour of immune cells in microgravity

In contrast to physiological research dealing with 'entire' humans, also known as integrative physiology, human cells are being studied by two research teams at Magdeburg University to shed a light on the mechanisms that cause the impairment of the immune system in microgravity. Immune cells constantly patrol all tissues and all organs in our body to defend it against dangers like infiltration by germs. In the process, they cover enormous distances day after day. They do not simply float around freely in tissue but constantly have to jump barriers to move from the circulating blood into the surrounding tissue, for example. Moreover, different immune cell types frequently attach to one another to exchange important information and activate each other. All this is necessary to repel foreign bodies.

What if microgravity were to interfere sustainably with the movement or mutual attachment of immune cells? To pursue this question, scientists investigated the molecules and mechanisms which enable immune system cells to attach to one another, to migrate, and to break through tissue barriers. Tentative results of projects run by the universities of Magdeburg and Zurich show that different cell types of the immune system react to the onset of microgravity in very different ways. Thus, human endothelial cells step up the production of ICAM-1, a surface molecule that is important for cell attachment. Conversely, monocytic cells react by reducing the production of ICAM-1. Since these cells, which are part of our innate immune defence system, attack exogenous intruders, microgravity interferes with an important mechanism that is indispensable for the monocytes' ability to attach themselves to surfaces and to other immune cells.

This finding might explain why specific immune cells no longer function properly in microgravity. These so-called T-lymphocytes must remain attached closely and permanently to the monocytic cells so that they can divide and become completely activated – a process that does not work in microgravity. On the other hand, it would certainly be too simple to assume that these changes constitute the sole explanation for the astronauts' immune-system weakness. More recent results from parabolic flights show that the so-called IL-2 receptor at the surface of T-lymphocytes is toned down as well. This receptor mediates the signal that is essential for the reproduction of the activated lymphocytes. Under another project, researchers from the universities of Magdeburg and Aarhus have begun to expose human endothelium and cancer cells to modified gravity conditions in order to identify rapid changes in the cytoskeleton and the expression pattern of the cells, i.e. reactions at the genetic and molecular-biology level. Initial experiments suggest that genetic processes undergo comprehensive changes in microgravity. The implications of this will have to be clarified in further experiments.



Tiriche© National Cancer Institute

T-Lymphocyten müssen eng und andauernd an den monozytären Zellen anheften, um sich vollständig zu aktivieren und zu teilen – ein Prozess, der in Schwerelosigkeit nicht funktioniert.

T-lymphocytes need to attach themselves closely and permanently to monocytes for their own activation and proliferation – a process that does not work under microgravity conditions.



## Beeinträchtigte Leistungsfähigkeit

Aus früheren Parabelflug-, Shuttle- und ISS-Experimenten ist bekannt, dass das Zusammenspiel von Muskel- und Nervensystem – die sogenannte sensorimotorische Koordination – bei Astronauten im Weltraum gestört ist. So sind Zeige- oder Greifbewegungen in Schwerelosigkeit unpräziser oder bei gleicher Genauigkeit geistig anstrengender. Auch die kognitiven Fähigkeiten sollen in Schwerelosigkeit Einbußen erfahren. Es wurde jedoch bislang nicht zwischen primären Einflüssen veränderter Schwerkraftbedingungen und sekundären Einflüssen wie Stress unterschieden. Zudem wies man bislang diese psycho-physiologischen Defizite immer in typischen Laboraufgaben nach. Daher ist unklar, ob sie bei alltagsähnlichen Handlungen unverändert auftreten. In Parabelflugexperimenten haben zwei Arbeitsgruppen der Deutschen Sporthochschule Köln versucht, diese Probleme zu lösen. Ein Vergleich der menschlichen Feinmotorik unter Alltags- und Laborbedingungen im Parabelflug zeigt, dass sich der Einfluss der Schwerelosigkeit auf das Greifen unter typischen Laborbedingungen deutlich von alltäglichen Bedingungen unterscheidet. Laborbefunde erlauben daher nur sehr begrenzte Voraussagen über das Verhalten im Alltag. In einem Folgeprojekt versuchen die Wissenschaftler, die Einflüsse von Schwerelosigkeit, Stress und Motivation voneinander zu trennen – konkret bei der Bedienung von Instrumenten während des Parabelflugs.

### Stress oder Schwerelosigkeit als Auslöser?

Vorbereitung eines humanphysiologischen Experiments für den Test im Parabelflug: Ein Forscher bringt Kontaktgel auf die Kopfhaut des Probanden auf, damit die Elektroden der EEG-Kappe die Gehirnströme aufzeichnen können. Das hier im Parabelflug zu testende Teil-Experiment soll ab 2016 auf der Internationalen Raumstation ISS durchgeführt werden.

*Preparing for a human physiology experiment during a parabolic flight. A scientist applies contact gel to the scalp of a subject so that the electrodes in the Electroencephalography (EEG) cap can record their brainwaves. The experiment being tested here is scheduled to go on the ISS from 2016.*

Ähnlich Ziele, aber mit einer anderen Methodik und mehr auf die kognitive Leistungsfähigkeit ausgerichtet, verfolgt ein zweites Projekt der Deutschen Sporthochschule Köln. Neben der Messung von Stresshormonen im Blut und der Erfassung von psychologischen Parametern war in dieser Studie erstmals ein aktives, mobiles EEG-System im Einsatz. Dadurch konnten zum ersten Mal dynamische Vorgänge im Gehirn während veränderter Schwerkraftbedingungen erfasst werden. Demnach führt weniger die fehlende Schwerkraft als vielmehr der allgemeine Stress eines Parabelflugs zu schlechteren kognitiven Leistungen, und dies war auch noch durch die Auswahl der Probanden beeinflusst: Bei Erstfliegern werden mögliche Effekte der Schwerelosigkeit durch Stressreaktionen überlagert, die sich bei erfahrenen Parabelfliegern nicht mehr zeigen. Die kognitiven Fähigkeiten verbesserten sich bei dieser Gruppe in Schwerelosigkeit sogar noch. Die detaillierte Analyse der EEG-Messungen zeigte weitere Ergebnisse: So weist die Hirnaktivität während der 1-g- und 1,8-g-Phasen beim Parabelflug auf eine flugbedingte Stresssituation hin, während Schwerelosigkeit positiv wahrgenommen wird. Ob Schwerelosigkeit die sensorimotorische Kontrolle verändert oder gar solche Fähigkeiten einschränkt, muss nun neu untersucht werden. Damit ziehen diese Parabelflugergebnisse Konsequenzen für die Entwicklung neuer astronautischer Trainingskonzepte nach sich.

## Impaired Performance

From earlier parabolic flight, shuttle, and ISS experiments, we know that the interaction between the muscular and the nervous system, also known as sensorimotor coordination, is disturbed in astronauts in space. Thus, pointing or gripping movements are less precise in microgravity, or, if equally precise, they are mentally more strenuous. It is assumed that cognitive skills, too, deteriorate in microgravity. So far, however, no distinction has been made between primary influences, such as modified gravity conditions, and secondary influences, such as stress. To demonstrate these psycho-physiological deficits, moreover, only typical laboratory tasks have been used so far, which is why it is not clear whether these deficits occur unchanged in quasi-everyday activities. Two research teams from the German Sports University in Cologne have been trying to solve these problems in parabolic flight experiments. If we compare human fine motor skills under everyday and laboratory conditions on parabolic flights, we find that the influence of microgravity on prehension under typical laboratory conditions differs markedly from that under everyday conditions. Therefore, the capability of laboratory findings to predict everyday behaviour is highly restricted. In a follow-up project, scientists will study the operation of instruments during parabolic flights to segregate the influences of microgravity, stress, and motivation.

### Triggered by stress or microgravity?

Another project of the German Sports University in Cologne pursues similar objectives while using a different methodology and focusing rather more on cognitive performance. Besides measuring stress hormone levels in the blood and surveying psychological parameters, this study is the first to make use of an active mobile EEG system, which enables scientists for the first time to observe dynamic processes in the brain in changing gravity conditions. It emerged that it is not so much the lack of gravity and more the general stress of a parabolic flight that causes cognitive performance to deteriorate, an added influence being the selection of subjects: in novices, stress reactions eclipse the effects of microgravity, a phenomenon that no longer applies to experienced parabola flyers. The latter group even showed improvements in cognitive performance in microgravity. A detailed analysis of the EEG records produces further results: during the 1-g and 1.8-g phases of a parabolic flight, cerebral activity indicates flight-related stress, whereas microgravity is perceived positively. Whether microgravity modifies or merely restricts sensorimotor control will have to be investigated next. Thus, these parabolic flight results may have implications for the development of new training concepts for astronauts.



Der Erfolg von Weltraummissionen hängt maßgeblich davon ab, ob Raumfahrer die ihnen gestellten, feinmotorischen Aufgaben wie etwa das Bedienen von Schaltern und Kontrollknüppeln im Cockpit und an wissenschaftlichen Instrumenten in angemessener Zeit korrekt ausführen können. Auf Parabelflügen werden diese Situationen simuliert und die Reaktionen der Probanden getestet.

*The success of space missions crucially depends on the ability of astronauts to perform their various jobs accurately and in a timely manner. Some of these involve highly fine motor skills, such as operating switches and control sticks in the cockpit, and performing scientific experiments. Parabolic flights serve to simulate such situations and test the reactions of test subjects.*



### Neuromuskuläre Anpassung an Vibrationstraining – Therapiemöglichkeit für Spastiker

Längere Aufenthalte im All führen bei Astronauten zu Muskel- und Knochenabbau. Spezielle Trainingsmaßnahmen reduzieren diese Abbauprozesse. Betruhestudien belegen eindeutig, dass Vibrationstraining dem Muskel- und Knochenschwund effektiv entgegenwirkt. Doch welche neurophysiologischen Mechanismen verhindern den Abbau? Hier setzt ein Projekt der Universität Freiburg an, das das Zusammenspiel von Nerv und Muskel aufdecken will. Vibrationstraining verringert die spinale Erregbarkeit stark, die sich aber nach etwa zehn Minuten wieder normalisiert. Wechselnde Schwerkraftbedingungen beim Parabelflug führen nicht zu unterschiedlicher spinaler Erregbarkeit. Die auf der Erde beobachteten positiven Anpassungen an das Vibrationstraining sind also auf den Weltraum übertragbar, das somit für das Astronautentraining in Schwerelosigkeit geeignet ist. Durch diese Erkenntnisse hat das Vibrationstraining seinen Weg in die klinische Rehabilitation gefunden: Bei Spastikern ist die Alltagsmotorik wie Gehen und Stehen stark eingeschränkt, weil sie unter einer erhöhten Reflexaktivität leiden. Sie können mit Hilfe des Vibrationstrainings nun wirkungsvoller therapiert werden. Inzwischen wird es auch in vielen Fitnessstudios ergänzend zu anderen Methoden angeboten.

Die Universität Freiburg untersucht außerdem, ob Gleichgewichtstraining mit nur 38 Prozent des Körpergewichts – entsprechend der Schwerkraft auf dem Mars – einen vergleichbaren Effekt auf die Körperhaltung, Standstabilität und die Bewegungsmotorik wie das Training mit vollem Körpergewicht hat. Erste Daten aus Parabelflugstudien und Messungen am Boden legen dies nahe. Inzwischen wird Training unter Teilbelastung bereits erfolgreich in der klinischen Rehabilitation angewendet: Nach Verletzungen oder Operationen der unteren Extremitäten kann dem Patienten nicht sofort das volle Körpergewicht aufgebürdet werden. Ein Seilzugsystem verringert hier die Belastung. So können Gangtherapie und Gleichgewichtstraining viel früher als sonst beginnen. Für diese Erfolge, von denen jetzt Patienten auf der Erde profitieren, wurde die Freiburger Arbeitsgruppe mit dem renommierten „Clinical Award“ des American College of Sports Medicine ausgezeichnet.

### Neuromuscular adaptation to vibration training – a therapy option for people with cerebral palsy

Prolonged stays in space cause the muscles and bones of astronauts to degrade. Special training methods have been developed to at least mitigate these degradation processes. Studies on patients confined to bedrest clearly document that vibration training effectively counteracts muscle and bone attenuation. But what are the neuro-physiological mechanisms that are causing this effect? This is being investigated by scientists at Freiburg University in a project that aims to uncover the interaction between nerve and muscle. Scientists were able to show that vibration training greatly reduces spinal excitability which, however, returns to normal after about ten minutes. This result is not affected by the changing gravity conditions of a parabolic flight. Therefore, the positive adaptation to vibration training observed on Earth applies in space as well, which makes the method suitable for use by astronauts in microgravity. Based on these discoveries, vibration training found its way into clinical rehabilitation as well: in humans with cerebral palsy, everyday motor skills like walking or standing are greatly impaired because they suffer from increased reflex activity. Now that this activity can be reduced more effectively by vibration training, CP may be treated more successfully.


Moreover, the scientists from Freiburg University pursue the question of whether the effect of vestibular training on posture, stance, and the motor system at no more than 38 percent of the ordinary body weight is comparable to that at full body weight. This is suggested by initial data from parabolic flight studies and measurements on the ground. By now, training under partial load is being used successfully in clinical rehabilitation: after injuries in or surgery on the lower extremities, patients are unable to bear the full weight of their body. In such cases, the load is reduced by a pulley system so that walking therapy and equilibrium training may begin much earlier. For this success, which now benefits hospital patients on Earth, the Freiburg working group was honoured with the renowned Clinical Award of the American College of Sports Medicine.



Forscher untersuchen, ob Gleichgewichtstraining mit nur 38 Prozent des Körpergewichts – entsprechend der Schwerkraft auf dem Mars – einen vergleichbaren Effekt auf die Körperhaltung, Standstabilität und die Bewegungsmotorik wie das Training mit vollem Körpergewicht hat.

Scientists try to find out if equilibrium training at 38 percent of Earth's gravity – which corresponds to Martian gravity – has a similar effect on posture, stance, and motor function as it does under normal gravity conditions.





Lebenserhaltungssysteme können Raumschiffe und ihre Astronauten effektiv und ohne Verlust mit Frischwasser, Atemluft und Nahrung versorgen. Ohne diese Systeme könnte selbst unser Nachbarplanet Mars unerreichbar sein. Für das sogenannte ModuLES-Konzept wird gerade ein Algenbioreaktor entwickelt. Er soll maximale Effizienz in Bezug auf Sauerstoff- und Biomasseproduktion mit minimalem Aufwand an Energie und Masse erzielen.

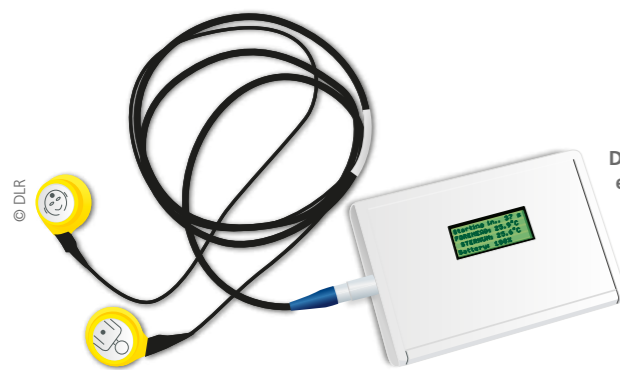
*Life support systems can supply spacecraft and astronauts with water, breathing air, and food effectively and without losing any resources. Without these systems, even our next-door neighbour in space, planet Mars, might remain out of reach. Under the so-called ModuLES scheme, an algae bioreactor is currently being developed. It is hoped that it will achieve maximum efficiency in terms of oxygen and biomass production based on a minimum of energy and mass.*

## Medizintechnik und biotechnologische Forschung

Aufgrund der Randbedingungen stellt die biomedizinische Forschung im Weltraum an Geräte und Experimentanlagen bestimmte Anforderungen: Klein, leicht, kompakt sollten sie sein und – wenn es um Forschung am Astronauten geht – sind nicht-invasive Mess- und Diagnosemethoden klar von Vorteil. Von daher ist es nicht verwunderlich, dass in den letzten Jahren im deutschen biowissenschaftlichen Programm eine ganze Reihe von neuen Methoden und Geräten zur nicht-invasiven medizinischen Diagnostik entwickelt worden sind. Nicht selten wurden sie auf Parabelflügen getestet und verbessert, um später dann beispielsweise auf der Internationalen Raumstation ISS, aber auch am Patienten auf der Erde angewendet zu werden. Auch bei der Entwicklung weiterer Analyseverfahren sowie von Geräten und Anlagen für die biotechnologische Forschung spielen Tests auf Parabelflügen eine wichtige Rolle.

## *Research in Medical Engineering and Biotechnology*

*Given the special conditions prevailing in space, space-borne biomedical research comes with specific requirements as regards the design of devices and experimenting apparatus. They need to be small, light, compact, and where experiments involve measurements and tests taken on an astronaut's body, they should preferably use non-invasive methods. It is therefore not surprising that the German space life-science programme has produced a whole range of new methods and devices for non-invasive diagnostics. Not infrequently, trials of these procedures were carried out on parabolic flights to optimise the equipment for later use on the International Space Station ISS on astronauts but also on patients on Earth. Tests on parabolic flights have played an important role in the development of entirely new analytical methods and devices and biotechnological research apparatus, as the following sections show.*



Der in der Berliner Charité entwickelte Thermosensor  
The thermal sensor developed by the Charité in Berlin



**Nicht-invasiver Thermosensor misst Körperkerntemperatur beim Menschen**

Beim Eintritt in die Schwerelosigkeit werden beim Menschen Flüssigkeiten wie Blut und Lymphe sehr schnell von der unteren in die obere Körperhälfte verschoben. Damit sind auch Veränderungen im Wärmehaushalt verknüpft: Astronauten klagen oft über kalte Füße und Finger. Bei Einsätzen außerhalb der Raumstation sind Astronauten zudem extremen Temperaturbedingungen ausgesetzt: +200 °Celsius in der Sonne, -180 °Celsius im Schatten. Außerdem ist die Arbeit in den Raumzügen körperlich sehr anstrengend, wobei sich der Körper stark erhitzt. Dies kann innerhalb kürzester Zeit die Körperkerntemperatur auf über 39 °Celsius gefährlich ansteigen lassen. Allerdings sind die üblichen Verfahren aus messtechnischen oder hygienischen Gründen nicht für den alltäglichen Einsatz beim Astronauten geeignet. Seit 2001 hat deshalb eine Arbeitsgruppe an der Charité Berlin in enger Zusammenarbeit mit der Drägerwerk AG ein neuartiges, nicht-invasives Messverfahren entwickelt und erprobt. 2003 und 2006 wurde der sogenannte Doppelsensor patentiert. Er erfasst am Kopf oder auf dem Brustbein den Wärmefluss, der über spezielle Algorithmen in Körperkerntemperaturen umgerechnet wird und zusammen mit Herz-Kreislauf-Daten der Beurteilung des Erschöpfungsstatus (Physiological Strain Index, PSI) dient. So können bei Astronauten oder Personen in besonderen Arbeitssituationen Gefährdungen frühzeitig erkannt und entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Beim Eintritt in die Schwerelosigkeit werden beim Menschen Flüssigkeiten wie Blut und Lymphe sehr schnell von der unteren in die obere Körperhälfte verschoben. Damit sind auch Veränderungen im Wärmehaushalt verknüpft: Auf Parabelflügen wurde diese Wärmeregulation untersucht.

Upon the onset of microgravity, fluids in the human body such as blood and lymph are rapidly displaced from the lower to the upper body half. This also causes a change in the body's heat balance: parabolic flight experiments have been carried out to understand this heat regulation process.

Auf Parabelflügen wurde der Thermosensor, der seit 2009 auch auf der Internationalen Raumstation ISS im Einsatz ist, getestet. Zusätzlich erfassen die Wissenschaftler mit einer Wärmebildkamera die Temperaturverteilung. Weitere moderne Verfahren messen rasche Flüssigkeitsverschiebungen bei wechselnden Schwerkraftbedingungen. Unmittelbar nach Wegfall der Schwerkraft steigt mehr als ein halber Liter Blut von den Beinen aus in Richtung Kopf. Die Wärmeabstrahlung, die schon normalerweise zu rund 30 Prozent über den Kopf erfolgt, erhöht sich in der Schwerelosigkeit deutlich. Weitere Messungen auf der ISS deuten auf dauerhaft erhöhte Körpertemperaturen bei den Astronauten vor allem nach dem Fitnessstraining hin. Zurzeit wird in einem Folgeexperiment die Tagesrhythmik der Temperatur untersucht. Auch auf der Erde wird gerade der Einsatz des Doppelsensors bei thermisch gefährdeten Berufsgruppen wie Feuerwehr, Polizei und Sondereinsatzkräften oder auch im klinischen Alltag bei Operationen und im Neugeborenen-Brutkasten vorbereitet. In Zusammenarbeit mit dem Berliner Herz-Zentrum wurde er bei Herztransplantationen bereits erfolgreich eingesetzt. Die Firma Dräger denkt derzeit über die Markteinführung einer kommerziellen Version nach.

Kopf einer Testperson, aufgenommen mit einer Wärmebildkamera (rot = warm, blau = kalt)

Head of a test subject recorded with a thermal imaging camera (red = warm, blue = cold)



**Non-invasive thermosensor measures the human core body temperature**

In humans, body fluids like blood and lymph move very quickly from the lower to the upper half of the body upon the onset of microgravity. At the same time, the heat balance changes as well: astronauts often complain of cold feet and fingers. When astronauts leave the space station, moreover, they are exposed to extreme temperature conditions: +200 °Celsius in sunlight, -180 °Celsius in shadow. In addition, working in a space suit is physically very strenuous and the body heats up, so much that the core body temperature may rise to a dangerous 39° Celsius and more within a very short time. Thus, continuous core body temperature measurements become imperative. At the same time, the usual methods are not suitable for the astronauts' daily routine for metrological or hygienic reasons. Since 2001, therefore, a research group at the Berlin Charité has been developing and testing an innovative non-invasive measurement method in close co-operation with Drägerwerk AG. The so-called double sensor was patented in 2003 and 2006. Attached to the head or the breastbone, it measures heat flow which is converted into core body temperatures with the aid of special algorithms and serves, together with cardiovascular data, to determine the physiological strain index (PSI). In this way, hazards threatening astronauts or workers exposed to extreme workplace conditions may be identified and appropriate countermeasures taken.

The thermal sensor, which has been used on the International Space Station since 2009, was initially tested on parabolic flights. In addition, scientists used a thermal imaging camera to register temperature distribution as well as other modern methods to detect rapid movements of liquid under changing gravity conditions. Immediately after the onset of microgravity, more than half a litre of blood rises from the legs towards the head. Heat radiation, around 30 per cent of which is emitted by the head even under normal conditions, increases remarkably in microgravity. Further measurements on the ISS suggest permanently increased body temperatures in astronauts, particularly after their fitness training. At present, the diurnal temperature rhythm is being investigated in a follow-up experiment. On Earth, too, preparations are underway for using the double sensor on people who are professionally exposed to thermal hazards, such as firemen, police officers, and special force members, as well as in everyday clinical settings, during surgery and in incubators for neonates, for example. In co-operation with the Berlin Heart Centre, the device has already been used successfully in heart transplants. The Dräger company is now considering launching a commercial version on the market.



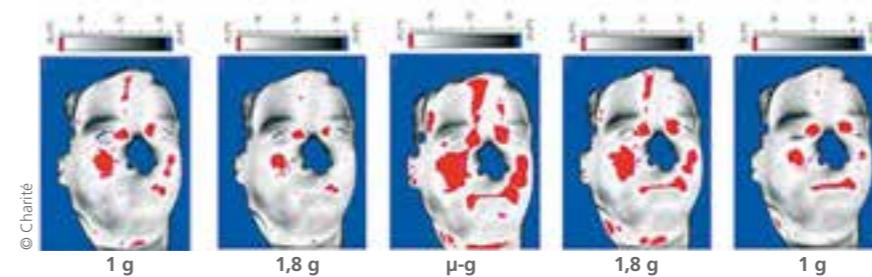
Wärmebildkamera dokumentiert die Wärmeverteilung bei einer Testperson

Thermal imaging camera showing the distribution of body heat in a test subject



Forscher interessieren sich für den Biorhythmus der Astronauten. Die Körperkerntemperatur ist ein guter Indikator, wenn sich dieser circadiane Rhythmus verschiebt – die innere Uhr anders tickt. Der deutsche ESA-Astronaut Alexander Gerst hat auf der Stirn einen nicht-invasiven Thermosensor aufgezichnet hat.

Scientists are interested in the astronauts' biorhythm. The core body temperature is a good indicator to show if a subject's circadian rhythm shifts – i.e. if their body clock starts to tick differently. The German ESA astronaut Alexander Gerst has worn a non-invasive thermosensor at his forehead to record his core body temperature.



Veränderte Wärmeverteilung im menschlichen Gesicht bei verschiedenen Beschleunigungen  
Changes in heat distribution in a human face at different rates of acceleration



Hoffmann/DLR

### Lungendurchlüftung und künstliche Beatmung

Aufgrund theoretischer Überlegungen hatten Wissenschaftler lange angenommen, dass die Lungendurchlüftung nach einem Wegfall der Schwerkraft völlig homogen sein müsse. Frühere Weltraumexperimente zum Beispiel während der deutschen D-2-Mission auf dem Space Shuttle hatten jedoch gezeigt, dass weitere Faktoren dabei eine Rolle spielen müssen. Mit einer neuen Methodik versucht nun eine Arbeitsgruppe aus Göttingen seit einigen Jahren, dieses Problem zu lösen. Die bislang in der Klinik etablierten Verfahren zur Untersuchung der Lungenfunktion weisen alle gewisse Nachteile auf. Die Göttinger Forscher haben sich nun die elektrischen Eigenschaften von Zellen zunutze gemacht: Um den Brustkorb gelegte Elektroden erfassen diese Signale. Nach einer aufwendigen, aber schnellen Analyse mit bildgebender Datenverarbeitung kann man dann auf die regionale Lungendurchlüftung schließen. Auch das Blut- und Flüssigkeitsvolumen der Lunge und ihre Durchblutung lassen sich mit der Methode, der sogenannten Elektrischen Impedanz-Tomographie (EIT), analysieren. Dabei ist die „neue Mathematik“ der Schlüssel zum Erfolg – die Methode an sich ist schon länger bekannt. Auf Parabelflügen brachte die EIT-Methode Ergebnisse, wie die Lunge unter veränderten Schwerkraftbedingungen funktioniert. Erstmals wurden gravitationsbedingte regionale Veränderungen der Lungenfunktion und Verschiebungen des Blut- und Flüssigkeitsvolumens im Brustkorb erfasst. Zudem stellte sich bei den Parabelflugexperimenten und begleitenden Bodenstudien heraus, dass das in Lehrbüchern beschriebene Verteilungsmuster von Luft und Blut in der Lunge offenbar nicht auf alle Menschen zutrifft. Da der Einfluss der Schwerkraft auf diese Verteilung gerade in der kranken Lunge eine wichtige Rolle spielt, sind diese Erkenntnisse beispielsweise bei der Therapiesteuerung der künstlichen Beatmung, der Diagnose frühkindlichen Lungenversagens und des sogenannten Adult Respiratory Distress Syndrome (ARDS) von klinischer Bedeutung. Auf der Basis dieser Vorarbeiten hat die Firma Dräger Medizintechnik in Lübeck ein kommerzielles Gerät entwickelt und 2011 als Pulmovista500 auf den Markt gebracht. Der Werbeslogan „Atmung wird sichtbar“ beschreibt die Vorteile der aus der Weltraumforschung stammenden neuen Technologie.

Aus Parabelflugergebnissen könnte ein neuartiger Ansatz zur Früherkennung krankhafter Lungenveränderungen entstehen. Zurzeit werden in Kooperation mit Experten aus dem Bereich der Arbeitsmedizin technische Entwicklungen und klinische Studien durchgeführt, um ein neues Verfahren, das Anzahl und Größe feinsten Aerosoltröpfchen in den Lungenkapillaren ermittelt, im Klinikalltag einzuführen.

*Knowledge that has emerged from studies carried out on parabolic flights might lead to a new approach to the early diagnosis of pulmonary disorders. Collaborating with experts in industrial medicine, technology development and clinical studies are underway to introduce a new method into clinical practice that determines the number of aerosol droplets inside a patient's lung capillaries.*

### Lungenkrankheiten mittels nicht-invasiver Atemgas-Diagnostik auf der Spur

Im Atem eines Menschen befinden sich feinste Aerosoltröpfchen, die in den Lungenkapillaren gebildet werden. Die Größe dieser Partikel hängt von verschiedenen Faktoren ab. So zeigen sich beispielsweise Unterschiede zwischen Gesunden, gesunden Rauchern und Patienten mit milder Chronisch obstruktiver Lungenerkrankung (COPD). Dies brachte Wissenschaftler des Fraunhofer-Instituts für Toxikologie und Experimentelle Medizin (ITEM, Hannover) auf die Idee, über Partikelanzahl und -größe auf krankhafte Veränderungen der Lungenstruktur zu schließen. Die Aussagekraft dieser Methode bleibt jedoch solange unklar, bis geklärt ist, ob diese Anzahl- und Größenunterschiede auf eine lungenmorphologisch veränderte Wiederanlagerung der Partikel in den Atemwegsstrukturen zurückzuführen ist, oder ob sich die Größenverteilungen der Partikel zwischen den betrachteten Aerosolkollektiven wirklich unterscheiden. Da die Wiederanlagerung schwerkraftbedingt ist, kann diese Frage nur durch Partikelmessung in der Schwerelosigkeit geklärt werden. Auf Parabelflügen zeigte sich, dass das Tröpfchengrößenspektrum nicht vom Gesundheitszustand der Probanden abhängt. Die unter Bedingungen auf der Erde gemessenen Unterschiede müssen also auf sedimentationsbedingte Partikelverluste in den Lungenstrukturen oder auf unterschiedliche Atemwegsdurchmesser in den feinen Lungenstrukturen zurückzuführen sein. Aus diesen Parabelflugergebnissen könnte also ein neuartiger Ansatz zur Früherkennung krankhafter Lungenveränderungen entstehen. Zurzeit werden deshalb in Kooperation mit der Arbeitsmedizin weitere technische Entwicklungen und klinische Studien durchgeführt, um dieses neue Verfahren im Klinikalltag einzuführen. Patienten mit COPD, Lungenemphysem, Lungenfibrose und auch Asthma bronchiale könnten von der Früherkennung profitieren.

### Pulmonary ventilation and artificial respiration

*Based on theoretical considerations, scientists had assumed for a long time that pulmonary ventilation had to be completely homogeneous in microgravity. However, previous experiments in space – during the German D-2 mission on the Space Shuttle, for example – had shown that this is not quite correct. A research team from Goettingen has been addressing this problem for some years, using a new research methodology. So far, all clinically established methods for examining pulmonary functions have had certain drawbacks. Now, the Goettingen researchers are making use of the cells' electrical properties: cell signals are received by electrodes arranged around the chest. A complex but rapid analysis involving image data processing offers instant conclusions regarding regional pulmonary ventilation. Called electrical impedance tomography (EIT), the method also permits monitoring blood supply and liquid perfusion of the lungs. What makes the method successful is its use of 'new mathematics'; the EIT method itself has been known for some time. On parabolic flights, the results obtained by EIT showed how the lungs work in changing gravity. For the first time, researchers were able to identify gravity-related regional changes in the function of the lungs as well as shifts of the volume of blood and liquid in the chest. Moreover, experiments on parabolic flights as well as accompanying studies on the ground revealed that the pattern of air and blood distribution in the lungs that is described in textbooks does not apply to all people. Because the influence of gravity on this distribution plays an important part particularly in diseased lungs, these discoveries acquire clinical significance in controlling artificial respiration as well as in diagnosing neonatal respiratory failure and the so-called adult respiratory distress syndrome (ARDS). Based on this preliminary spadework, Dräger Medizintechnik of Luebeck has developed a commercial device which it marketed in 2011 under the name of Pulmovista500. The advertising slogan 'Breathing made visible' describes the advantages of this new technology that was born from space research.*

### Identifying pulmonary diseases by non-invasive respiratory gas diagnostics

*The breath of a human being contains ultra-fine aerosol droplets that are formed in the capillaries of the lungs. The size of these particles depends on a variety of factors. Thus, for example, there are differences between healthy persons, healthy smokers, and patients with a mild form of chronic obstructive pulmonary disease (COPD). To scientists from the Fraunhofer Institute of Toxicology and Experimental Medicine (ITEM, Hannover), this suggested that the number and size of these particles might indicate pathological changes in the structure of the lungs. However, the validity of this method will remain unclear until we know whether these differences in number and size are due to the re-deposition of morphologically changed particles in the airway structures, or the size distribution of the particles really differs between the aerosol collectives under consideration. Since re-deposition is gravity-related, this question can only be answered by particle measurements in microgravity. On parabolic flights, it was found that the spectrum of droplet sizes does not depend on a subject's health. Therefore, the differences measured under terrestrial conditions must be due either to sedimentation-related particle losses in the pulmonary structures or to differences in the airway diameters in the finer structures of the lungs. Consequently, these results of parabolic flight experiments might give birth to an innovative approach to the early identification of pathological changes in the lungs. This is why further technical developments and clinical studies are currently being carried out in co-operation with occupational medicine experts in order to introduce this new method in everyday clinical practice. Patients with COPD, lung emphysema, pulmonary fibrosis, and asthma might benefit from an early diagnosis.*





### Neue Geräteentwicklungen für die ISS-Forschung

Parabelflüge bieten zusätzlich zu ihren wissenschaftlichen Forschungsmöglichkeiten auch eine hervorragende Möglichkeit, neue Entwicklungen für die Raumfahrt zu testen. So wurden in den letzten Jahren drei neue, im Auftrag des DLR Raumfahrtmanagements von der deutschen Industrie entwickelte Geräte für die biowissenschaftliche Weltraumforschung bei Parabelflügen erfolgreich auf verschiedene Funktionsaspekte hin überprüft: FLUMIAS, ModuLES und ImmunoLab.

Mit dem Fluoreszenz-mikroskopischen Analysesystem FLUMIAS (Auftragnehmer: Airbus Defence & Space) werden physiologische Vorgänge in lebenden Zellen – also beispielsweise Reaktionen auf Schwerkraftveränderungen – dreidimensional sichtbar gemacht. Aufgrund der erfolgreichen Tests auf Parabelflügen ist nun als nächster Schritt ein Modul für die Höhenforschungsraketen TEXUS entwickelt worden, das bei TEXUS-52 im April 2015 zum ersten Mal erfolgreich zum Einsatz kam. Eine Weiterentwicklung für die Internationale Raumstation ISS oder ihr chinesisches Pendant ist angedacht.

Mit dem ModuLES-Photobioreaktor auf Algenbasis als erste Komponente (Auftragnehmer: OHB System AG) soll die Erfolgsgeschichte des Programms zur Entwicklung aquatischer, bioregenerativer Lebenserhaltungssysteme fortgeschrieben werden. Erste Tests auf Parabelflügen verliefen erfolgreich. Ein Einsatz auf einem Wiedereintrittsatelliten ist das nächste Ziel.

Auch die Entwicklung des nicht-invasiven ImmunoLab-Labors zur on-Bord Analytik des Immunsystems von Astronauten profitierte von Parabelflugtests verschiedener Teilkomponenten. ImmunoLab wird in Kooperation mit dem Institut für Biomedizinische Probleme (IBMP Moskau) entwickelt (Auftragnehmer: Airbus Defence & Space mit OHB System AG) und soll 2017 für die gemeinsame Forschung zur ISS gebracht werden.

### Development of new equipment for research on the ISS

*In addition to scientific research opportunities, parabolic flights provide an outstanding platform for testing new research equipment for space. In the last few years, for example, three new devices for life-sciences research in space that were developed by German manufacturers by order of the DLR Space Administration were successfully tested with regard to various functional aspects during parabolic flights: FLUMIAS, ModuLES, and ImmunoLab.*

*The fluorescence microscopy analysis system FLUMIAS (contractor: Airbus Defence & Space) serves to visualise in three dimensions physiological changes in living cells, including reactions to gravity changes. Based on successful parabolic flight tests, a module for the TEXUS high-altitude research rockets was developed as a next step, which was first tested successfully on the TEXUS-52 flight in April 2015. Developing the device further for use on the International Space Station or its Chinese counterpart is being considered.*


*Based on algae as the initial component, the ModuLES photo-bioreactor (contractor: OHB System AG) is intended to continue the success story of the programme to develop aquatic bioregenerative life support systems. Initial tests on parabolic flights ended in success. A flight on a re-entry satellite is the next objective.*

*The development of ImmunoLab, a laboratory for analysing the immune systems of astronauts on board, similarly benefited from parabolic flight tests of some of its components. ImmunoLab is being developed in co-operation with the Institute of Biomedical Problems (IBMP, Moscow) (contractor: Airbus Defence & Space with OHB System AG) and is scheduled to fly to the ISS, to be used by German and Russian scientists in joint research projects.*

Bioreaktor im Test: Im September 2013 und im Februar 2014 wurde auf Parabelflügen unter wechselnden Schwerkraftbedingungen das Design des ModuLES-Bioreaktors überprüft, wichtige physiologische Aspekte wie Photosyntheserate und molekulargenetische Anpassungsmechanismen analysiert sowie der Algenfilter getestet. Danach soll dann das endgültige Design für ein Photobioreaktor-Modul vorgestellt werden, das für eine Kopplung mit weiteren Modulen zu funktionellen Subsystemen geeignet ist und auf der Internationalen Raumstation ISS, auf FOTON- und BION-Satelliten sowie auf der chinesischen Raumstation und dem Shenzhou-Raumschiff eingesetzt werden kann.

*A bioreactor on trial: the design of the ModuLES bioreactor was tested under changing gravity conditions on parabolic flights in September 2013 and February 2014, studying important aspects such as the rate of photosynthesis, molecular mechanisms of genetic adaptation, and the function of algae filtration. After these tests, the final design of a bioreactor module is to be presented, which is suitable for coupling with other modules to form functional subsystems to be used on the International Space Station ISS, FOTON and BION satellites as well as on the Chinese space station and the Shenzhou spacecraft.*





Präzisionsarbeit: Behutsam werden kugelförmige Legierungsproben in sogenannte Käfige eingesetzt, die dann wiederum in eine Probenkammer eingelassen werden. Damit die Probe später in Schwerelosigkeit nur von einer elektromagnetischen Spule im Feld gehalten und berührungsfrei geschmolzen und erstarrt werden kann, müssen zunächst im Labor die Käfige genau ausgerichtet werden.

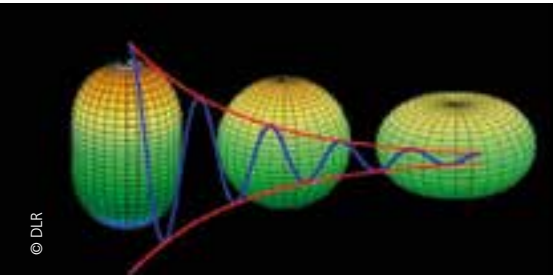
*A delicate touch: carefully, the operator inserts spherical alloy samples into so-called cages, which are subsequently placed in the specimen chamber. To ensure that under microgravity the specimen can be held in the field solely by an electromagnetic coil, and be melted and solidified in a contactless process, first of all the cages need to be accurately aligned in the laboratory.*

## Materialwissenschaftliche und physikalische Forschung

Experimente aus den Materialwissenschaften, der Fluidphysik, der Verbrennungsforschung und der Fundamentalphysik sind sehr häufig „Passagiere“ auf Parabelflügen des DLR. Da feste Materie durch Schwerelosigkeit nicht verändert wird, befinden sich die Versuchsobjekte, die der Schwerelosigkeit ausgesetzt werden, immer in einem flüssigen (zum Beispiel als Schmelze) oder gasförmigen (zum Beispiel als Dampf) Zustand. Die kurze Dauer der Schwerelosigkeit auf Parabelflügen lässt bei komplexen Experimenten oft nur die Untersuchung bestimmter Aspekte zu. Trotz dieser Einschränkungen haben sich Parabelflüge für Experimente bestens bewährt, die später auf längeren Weltraummissionen gestartet sind und noch starten werden.

## Research in Materials Science and Physics

*Experiments in materials science, fluid physics, combustion research, and fundamental physics very frequently fly along as 'passengers' on DLR's parabolic flights. Given that microgravity will not influence solid matter, scientists work with test specimens that are in a liquid (e.g. melt) or gaseous (e.g. vapour) state. Since the experiments are complex and the duration of microgravity on parabolic flights is short, investigations are often limited to certain aspects. Despite these restrictions, parabolic flights have proven to be an excellent choice for experiments which have since taken off or will soon take off on longer space missions.*



Die in TEMPUS geschmolzenen Proben können durch eine kurzzeitige Erhöhung des Heizfelds leicht zusammengepresst und wieder entspannt werden. Dadurch erfährt die Metallkugel charakteristische Schwingungen. Aus deren Frequenz und Dämpfung lassen sich die Oberflächenspannung und Zähigkeit der Schmelze ableiten.

While being melted in the TEMPUS apparatus, metal samples can be slightly compressed by a brief pressure increase in the heat field, and released again. This excites certain characteristic oscillations in the metal sphere. From the frequency and damping of these oscillations, researchers can derive surface tension and toughness of a melt.

## Innovative Materialforschung

### Die DLR-Anlage TEMPUS

Um die Eigenschaften von Werkstoffen zu verbessern, muss man zunächst die Vorgänge verstehen, die beim Erstarren von Schmelzen ablaufen. Das gelingt vor allem dann, wenn im Experiment Beeinträchtigungen durch die Schwerkraft, wie etwa turbulente Strömungen in einer Metallschmelze oder Ablagerungen von Zusatzstoffen im oberen oder unteren Bereich der Schmelze, unterbunden sind – das ist typisch bei Schwerelosigkeitsexperimenten. Immer häufiger werden darüber hinaus Erstarrungsvorgänge am Computer simuliert und die Werkstoffe so verbessert. Voraussetzung dafür ist ein genauer Datensatz der thermophysikalischen Eigenschaften der Schmelze. Die dafür erforderliche Präzision der Daten wird häufig erst durch eine „ungestörte“ Messung unter Schwerelosigkeit erreicht. Hierfür wurde im DLR die Parabelfluganlage „Tiegelfreies elektromagnetisches Positionieren unter Schwerelosigkeit“ (TEMPUS) entwickelt. Das bedeutet: Eine Metallprobe wird mithilfe elektromagnetischer Felder in der Schwebelage gehalten und erhitzt. Die auf diese Weise geschmolzenen Proben können in der TEMPUS-Anlage leicht zusammengepresst und wieder entspannt und damit in Schwingung versetzt werden. Aus dieser Schwingung und deren Dämpfung sind die Oberflächenspannung und Zähigkeit (Viskosität) der Schmelze ableitbar. Diese Werte bilden dann einen Teil des Datensatzes der thermophysikalischen Eigenschaften für diese Schmelze.

Eine frei schwebende, flüssige Metallprobe lässt sich aber auch gezielt in der TEMPUS-Anlage erstarren. Dabei kann die Erstarrungsgeschwindigkeit hochgenau gemessen werden. Denn störende, durch die Schwerkraft bedingte Strömungen in der Flüssigkeit (Konvektion), können in den Schwerelosigkeitsphasen eines Parabelfluges unterdrückt werden. Da die Proben in TEMPUS mit keiner Tiegelwand in Kontakt stehen, neigen sie dazu, auch unterhalb ihres Schmelzpunkts noch flüssig zu bleiben. Sobald aber die unterkühlte Schmelze erstarrt, wird erhebliche Wärme freigesetzt, die die relativ kalte Probe kurzzeitig aufleuchten lässt. Dieser schnelle Vorgang kann nur durch eine Hochgeschwindigkeitskamera erfasst werden und liefert wichtige Daten über das Erstarrungsmuster. Flüssige und bereits feste Teile werden voneinander getrennt. Auf Video-Aufzeichnungen mit mehr als 10.000 Bildern pro Sekunde ist die Struktur dieser Trennlinie erkennbar. Mit einem Computerprogramm kann man den erstarrenden Schmelztropfen nachbilden. Durch eine Analyse der Wachstumsgeschwindigkeit bei verschiedenen Unterkühlungsgraden der Schmelze konnte die generelle Anwendbarkeit eines Modells zum Kristallwachstum in unterkühlten Metallschmelzen erfolgreich nachgewiesen werden.



Vielflieger: Die TEMPUS-Anlage kam bislang bei vielen Parabelflugkampagnen zum Einsatz.

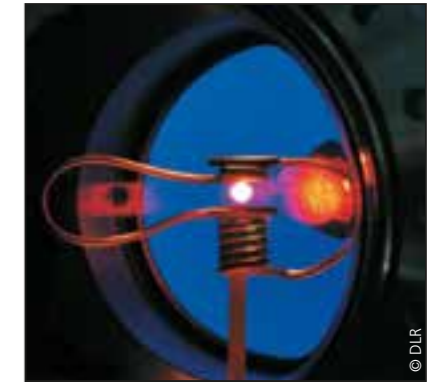
A frequent flyer: the TEMPUS apparatus has been used on many parabolic flight campaigns.

## Innovative Materials Research

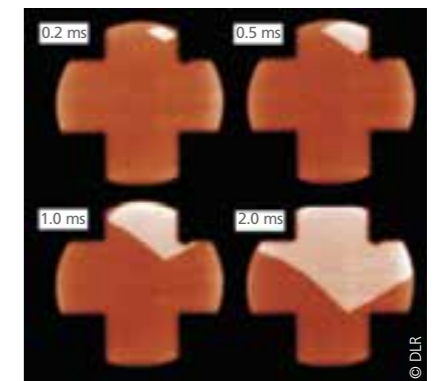
### DLR's TEMPUS apparatus

To improve the properties of a material, one must first understand the processes that are going on when they solidify from a molten state. Experiments are most likely to succeed in this if one eliminates any interference by gravity, such as turbulent flows in a metal melt or the agglomeration of additives at its top or bottom – which is typically achieved by experimenting in microgravity. An increasingly popular way to improve materials is to study solidification processes in computer simulations. This is predicated on the availability of an exact data record describing the thermophysical properties of the melt. Frequently, the requisite degree of data precision can be attained only by 'undisturbed' measurements in microgravity. For this purpose, DLR has developed a parabolic-flight apparatus called 'crucible-free electromagnetic positioning in microgravity' (TEMPUS). This means that a metal sample is heated and held in suspension by electromagnetic fields. In the TEMPUS rig, samples melted in this way can be compressed slightly and released again, thus inducing oscillation. It is from this oscillation and its damping that researchers can derive the surface tension and toughness (viscosity) of the melt. The results form part of the data record of thermophysical properties for this particular melt.

The TEMPUS apparatus also permits levitated samples of liquid metal to solidify under controlled conditions as well as measuring the speed of solidification with maximum precision. This is possible because disturbing gravity-related flows in the liquid (convection) can be suppressed in the zero-g phases of a parabolic flight. Since the samples held in TEMPUS are not in contact with any crucible wall, they tend to remain liquid even below their melting point. However, as soon as the undercooled melt solidifies, a considerable amount of heat is released, which makes the relatively cold sample glow for a brief period. This rapid event, which can only be registered with a high-speed camera, provides important data about the pattern of solidification. Liquid parts separate from those that are already solid. The structure of the dividing line between the two phases shows up on video records made at more than 10,000 frames per second. A computer programme permits modelling a melt drop as it solidifies. By analysing growth rates at various degrees of undercooling in the melt it was possible to demonstrate the general validity of a model describing crystal growth in undercooled metal melts.



Bodenlevitation einer metallischen Legierung während des Schmelzens  
Ground levitation of a metal alloy sample during melting



Die Erstarrungsfront einer Metalllegierung breitet sich von einem Punkt aus.  
The solidification front of a metal alloy propagates from one single point.



Wassertropfen treffen auf eine beheizte Oberfläche in Schwerelosigkeit und ...  
*Water droplets hitting a hot surface in microgravity and...*



... bei zweifacher Erdbeschleunigung  
*...at double gravitational acceleration*

## Fluidphysik

### Verhalten von Wasserspray auf beheizten Oberflächen

Bei der Sprühbeschichtung in der Materialbehandlung oder bei der Kühlung von hochleistungsfähigen Elektronikbauteilen treffen Flüssigkeiten als fein dosierte Sprays auf eine heiße Oberfläche. Das Spray erzeugt einen dünnen, schwankenden Flüssigkeitsfilm auf der Oberfläche, wodurch diese durch Verdampfung, Wärmeleitung und Konvektion sehr effektiv gekühlt wird – eine Eigenschaft, die auch bei künftigen Raumfahrtanwendungen wichtig ist. Doch welchen Einfluss nehmen veränderte Schwerkraftbedingungen auf einen solchen Kühlprozess? Wie ändern sich unter diesen Bedingungen Dicke und Stabilität des Films und der Wärmetransport?

In Experimentserien auf DLR-Parabelflügen wurde eine beheizte Kupferoberfläche sowohl in der Schwerelosigkeit (0 g) als auch unter doppelter Schwerkraft (1,8 g) mit Wasser besprüht. Die Leistung zur Heizung der Kupferoberfläche und die Eigenschaft des Sprays wurden in den Versuchen variiert. Das Ergebnis: In der 1,8-g-Phase entsteht ein dünner Film und der Wärmetransport nimmt zu, während in der 0-g-Phase ein mehr als doppelt so dicker Film entsteht und der Wärmetransport abnimmt. Wie sich Sprays nach ihrem Aufprall an Oberflächen verhalten, ist also klar vom Gravitationslevel abhängig. Die Forscher wollen diese Hydrodynamik und die Wärmeübertragung beim Auftreffen von Spray auf eine beheizte Oberfläche genauer verstehen und so technische Spraykühlungsprozesse verbessern.

### Besonders stabile Seifenblasen

Struktur und Dynamik sehr dünner Filme von Flüssigkristallen (smektische Filme) bilden heute einen der Schwerpunkte in der Forschung an Flüssigkeiten mit richtungsabhängigen Eigenschaften – den sogenannten anisotropen Flüssigkeiten. Werden zwei Oberflächen gegeneinander bewegt, richten sich die Flüssigkristallmoleküle dazwischen so aus, dass der Reibungswiderstand extrem gering und ein nahezu reibungsloses Gleiten möglich ist. Heute werden Fernschirme auf Basis dieser Kristalle hergestellt. In naher Zukunft könnten sie zum Beispiel auch als Schmierstoffe in Motoren, Produktionsmaschinen, Getrieben und Ventilen zum Einsatz kommen. In der Grundlagenforschung dienen solche dünnen, ebenen oder gekrümmten Filme als ideale Modelle, um physikalische Phänomene in „zweidimensionalen“ Flüssigkeiten zu untersuchen. Diese Filme können in gleichmäßigen Dicken von wenigen Nanometern (zwei bis drei Molekülschichten) bis zu einigen Mikrometern (circa 1.000 Molekülschichten) hergestellt werden. Man kann sich diese Filme in gekrümmter Form etwa wie besonders stabile Seifenblasen vorstellen.

Das Experiment Optical Analysis of Smectic Islands in Space (OASIS) untersucht seit Juli 2015 auf der Internationalen Raumstation ISS das Verhalten dieser Filme. Bevor OASIS zur Raumstation aufgebrochen ist, wurden auf Parabelflügen die Komponenten des Experimentaufbaus und des Prototyps der ISS-Versuchsanordnung getestet sowie wissenschaftliche Voruntersuchungen gemacht. So wurde zur Erforschung der „Selbstorganisation“ von kleinsten Tröpfchen auf solchen Filmen eine Technik entwickelt, um reproduzierbar Tröpfchen in Pikoliter-Größe auf diese Filme zu schießen. Erste wissenschaftliche Ergebnisse zur Schwingungsdynamik dieser frei schwebenden flüssigkristallinen Blasen unter Schwerelosigkeit wurden bereits in internationalen Zeitschriften publiziert.



Der kanadische Astronaut Robert Thirsk installiert die SODI-Apparatur in der Microgravity Science Glovebox (MSG) im Columbus-Modul der ISS. Der deutsche ESA-Astronaut Alexander Gerst hat in dieser Anlage das Verhalten von Fluiden in Schwerelosigkeit untersucht.

*The Canadian astronaut Robert Thirsk, installing the SODI apparatus inside the microgravity science glovebox (MSG) in the Columbus module on the ISS. On this equipment, the German ESA astronaut Alexander Gerst studied the behaviour of fluids under microgravity conditions.*

## Fluid Physics

### Behaviour of water sprayed on heated surfaces

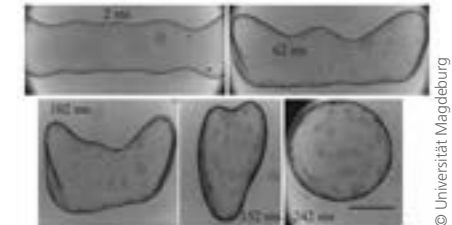
When material is spray-coated or when high-performance electronic components are cooled, a liquid impinges on a hot surface in the form of a finely atomised spray. This spray forms a thin, wavering film of liquid on the surface which it cools very effectively by evaporation, heat conduction, and convection – a characteristic that is important also in future space applications. But how is such a cooling process influenced by changed gravity conditions? How do these conditions affect the thickness and stability of the film and the transfer of heat?

In several series of experiments conducted on DLR parabolic flights, a heated copper surface was sprayed with water in microgravity (0 g) as well as in double gravity (1,8 g). During the experiments, the power input for heating the copper surface and the properties of the spray were varied. The result: in the 1,8-g phase, a thin film forms and heat transfer increases, whereas in the 0-g phase, the film that forms is more than twice as thick, while heat transfer decreases. So, the behaviour of a spray after its impact on a surface clearly depends on the level of gravity. Researchers want to know more about this hydrodynamism and the transfer of heat when a spray impacts a heated surface, hoping to improve industrial spray-cooling processes.

### Particularly robust soap bubbles

Today, the structure and dynamics of very thin films of liquid crystals (smectic films) form one of the key items in the research into liquids with direction-dependent properties, also known as anisotropic liquids. When two surfaces move against each other, the liquid-crystal molecules between them align themselves so that frictional resistance is sharply reduced, and almost frictionless sliding becomes possible. Today, television screens are made based on these crystals. In the near future, they might be used, for example, as lubricants in engines, production machines, transmissions, and valves. In basic science, these thin, plane or curved films serve as ideal models for investigating physical phenomena in 'two-dimensional' fluids. Such films can be produced in uniform thicknesses ranging from a few nanometres (2 to 3 molecular layers) to a few micrometres (appr. 1,000 molecular layers). In the curved variant, these films may be visualised as particularly robust soap bubbles.

Scientists began to study the behaviour of these films on the International Space Station in July 2015, in an experiment called OASIS (Optical Analysis of Smectic Islands in Space). Before OASIS set out for the space station, the components of the rig and the prototype of the ISS experimental setup were tested and preliminary scientific studies conducted on parabolic flights. To explore the 'self-organisation' of extremely small droplets on such films, for example, a method has been developed to shoot picolitre-sized droplets reproducibly onto these films. The first scientific findings regarding the vibrational dynamics of these liquid-crystal bubbles freely floating in microgravity have already been published in international journals.



© Universität Magdeburg



© Novespace

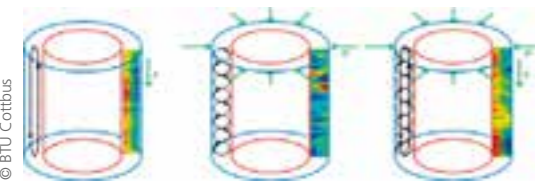
Zwischen zwei Stempeln liegt ein dünner Film eines Flüssigkristalls. Er wird so weit gedehnt, bis er abreißt. Es bildet sich eine frei schwebende und schwingende Blase, die letztendlich in einen kugelförmigen Gleichgewichtszustand übergeht. Diese Forschung findet in der OASIS-Anlagen auf Parabelflügen statt.

*A thin liquid-crystal film is held between two plates. It is extended until it separates, forming a freely floating, vibrating bubble which finally enters a state of spherical equilibrium. This experiment is conducted on the OASIS apparatus during parabolic flights.*

### Neue Erkenntnisse über Mikrofluide

Lässt sich eine Flüssigkeitsströmung durch ein elektrisches Feld verändern? Welche Auswirkungen hat das auf den Flüssigkeitstransport? Eine Antwort auf diese Fragen kann helfen, die Strömung bei Mikrofluiden besser zu kontrollieren und so zum Beispiel für die Weiterentwicklung von Mikropumpen oder Mikromischern genutzt werden. Im Parabelflugexperiment Convection in a Cylinder (CIC) wird daher ein sogenanntes elektrohydrodynamisches Kraftfeld angelegt, um den Wärme- und Stofftransport in einem Zylinderspalt genauer zu untersuchen. Der Spalt ist mit einem Öl gefüllt, dessen Zähigkeit nur wenig über der von Wasser liegt. Das System wird im Inneren beheizt und von außen gekühlt, so dass der Temperaturunterschied senkrecht zum gravitationsbedingten Auftriebsfeld entsteht. So bildet sich eine sogenannte Konvektionszelle, die den gesamten Untersuchungsraum erfasst. Dabei steigt erwärmte, leichtere Flüssigkeit am beheizten Innenzylinder auf und sinkt am gekühlten Außenzylinder ab. An der Boden- und der Deckplatte des Zylinders verläuft die Strömung horizontal. Wird der Temperaturunterschied erhöht und somit der thermische Antrieb verstärkt bleibt die konvektive Grundströmung nicht stabil, sondern nimmt neue Strömungsformen an. Zum Beispiel könnten weitere Konvektionszellen aus der Mitte der Zylinderhöhe heraus entstehen. Dies war vor den Parabelflugexperimenten noch nicht erforscht worden.

Die Wissenschaftler untersuchten, wie die Strömungen in dem Zylinderspalt zusätzlich durch Wechselspannung beeinflusst werden können. So führt die Temperaturabhängigkeit der dielektrischen Leitfähigkeit des Öls zu einem Auftrieb. Dieser Effekt verstärkt sich einerseits mit der Amplitude der Hochspannung und andererseits mit abnehmenden Zylinderradien. Außerdem erhöht sich der Wärmetransport schon bei sehr niedrigen Temperaturgradienten. Auf der Erde stört das künstliche Kraftfeld lediglich die Stabilität der temperaturgetriebenen Strömung. Unter Mikrogravitationsbedingungen auf einem Parabelflug hingegen löst das zentrale Hochspannungskraftfeld allein die Konvektionsbewegung aus. Im Parabelflugexperiment wird einerseits die Strömung sichtbar gemacht, andererseits der Wärmetransport gemessen. Das Experiment liefert damit einen wichtigen Beitrag, um die Wirksamkeit des künstlichen Kraftfeldes zu untersuchen und technische Anwendungen voranzutreiben.



Schematische Darstellung der konvektiven Strömungen im Zylinderspalt (v. l.): natürliche Auftriebskonvektion unter Schwerkraft, thermische Konvektion unter Mikrogravitation, Überlagerung von thermischer und Auftriebskonvektion unter Erdschwerebedingungen

Diagram showing convective fluid flow in a cylinder gap (from left): natural buoyancy-induced convection under standard gravity, thermal convection under microgravity, combined pattern of thermal and buoyancy-induced convection under terrestrial gravity conditions

### New discoveries in microfluidics

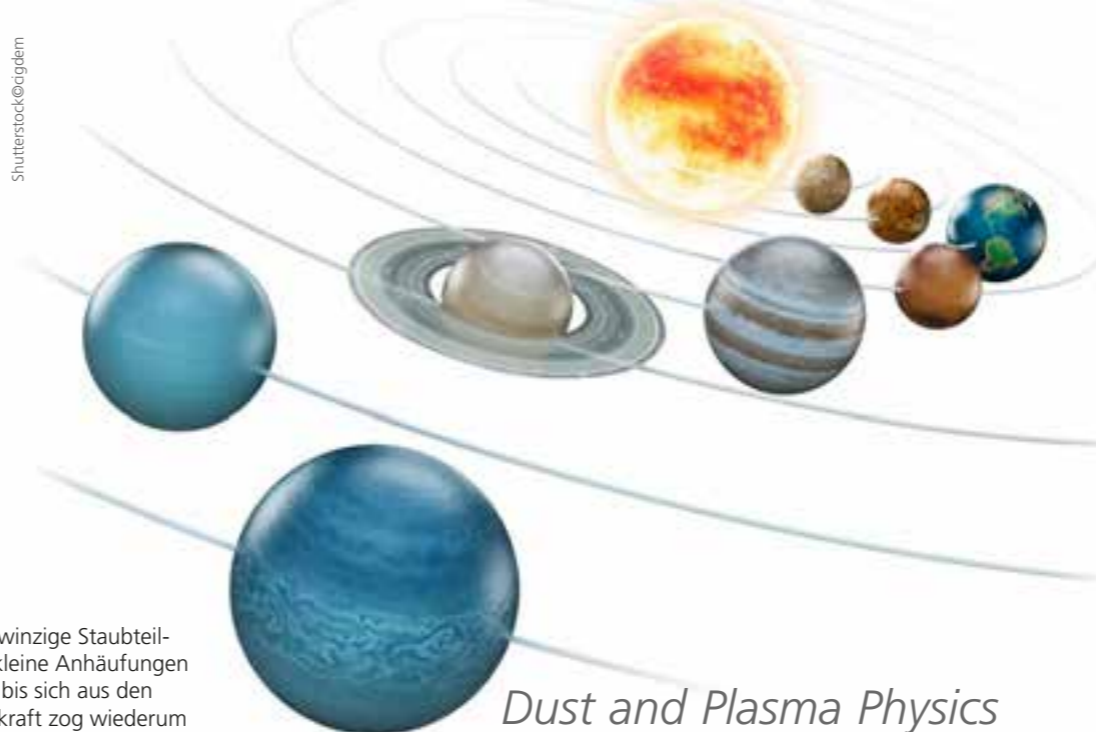
Can the flow of a liquid be modified by an electrical field? How would this impact the transport of fluid? Answers to these questions may help to improve our control of microfluid flows and, for example, to advance the development of micropumps or micromixers. In a parabolic flight experiment called convection in a cylinder (CIC), therefore, a so-called electrohydrodynamic force field is applied to investigate more closely the transfer of heat and mass in a cylindrical gap. The gap is filled with oil whose viscosity is only slightly higher than that of water. The system is heated from the inside and cooled from the outside, so that the difference in temperature develops vertically to the gravity-related buoyancy field. In this way, a so-called convection cell forms which includes the entire test space. In it, warm, lighter fluid rises along the heated inner cylinder and falls along the cooled outer cylinder. Along the bottom and top ends of the cylinder, the oil flows horizontally. If the temperature difference increases, strengthening the thermal drive effect, the basic convective flow does not remain stable but assumes new forms. Thus, for example, additional convection cells might develop at mid-cylinder level. These aspects had not been explored before the parabolic flight experiments.

Scientists studied how flows in the cylindrical gap can be additionally influenced by an alternating current. It was found that the temperature dependence of the oil's dielectric conductivity causes convection. This effect intensifies as the amplitude of the high-voltage current increases and the radius of the cylinder decreases. In addition, heat transfer increases even at very low temperature gradients. On the ground, the artificial force field will merely interfere with the stability of the temperature-driven flow. Under microgravity conditions prevailing on a parabolic flight, on the other hand, the convective movement will be initiated by the central high-voltage force field alone. Parabolic flight experiments serve to visualise flows and measure heat transfer. Thus, they significantly contribute towards the investigation of the effectiveness of the artificial force field and the development of technical applications.

Auf Parabelflügen untersuchen Wissenschaftler, wie sich Flüssigkeiten in einem Zylinderspalt unter Schwerelosigkeit verhalten.

Scientists on parabolic flights, studying the behaviour of fluids in a cylinder gap under microgravity conditions.





Shutterstock.com

## Staub- und Plasmaphysik

### Frühphasen der Planetenentstehung

Die heutige Theorie der Planetenentstehung geht davon aus, dass winzige Staubteilchen im All zusammenprallten, aneinander haften blieben und so kleine Anhäufungen (Agglomerate) bildeten. Dieser Vorgang wiederholte sich so lange, bis sich aus den Agglomeraten kilometergroße Felsbrocken formten. Deren Schwerkraft zog wiederum weitere Partikel an, schließlich bildeten sich Planeten. Dieses Szenario ist jedoch noch sehr lückenhaft. Offen ist insbesondere, wie schnell Staubagglomerate wachsen können.

Auf der Erde lässt sich eine langsame planetare Staubagglomeration nicht nachstellen, weil die Schwerkraft große Staubklumpen schnell zu Boden fallen lässt. Ihr Anwachsen lässt sich dagegen in Schwerelosigkeit erforschen, wenn sie durch Lichteinwirkung aufeinander zu bewegt werden und zusammenstoßen. Dabei erwärmen sich nicht nur die Partikel, sondern auch die Gasmoleküle der mit intensivem Licht bestrahlten Seite. Diese bewegen sich dann heftiger und stoßen die Staubagglomerate langsam von der Lichtquelle weg. Dieser Effekt wird als Thermophorese bezeichnet. Im Parabelflugexperiment simulieren Wissenschaftler die Sonnenstrahlung durch Halogenlampen und verfolgen die Bewegung der Staubpartikel mit einer hochauflösenden Kamera. Interessant ist dabei vor allem der Zusammenhang zwischen Partikelgröße, Gasdruck, Lichtintensität und der Geschwindigkeit der Partikel. Bislang konnte ein deutlicher Einfluss der Partikelgröße auf die Transportgeschwindigkeit nachgewiesen werden. Was geschieht aber, wenn bereits angewachsene Staub- oder Eisagglomerate aufeinander stoßen oder ein Agglomerat auf die staubige Oberfläche eines größeren Objektes trifft? Bei welchen Geschwindigkeiten haften sie, prallen ganz oder teilweise ab, oder werden gar zerstört? Auch das sind wichtige Fragen zur Planetenentstehung, die auf Parabelflügen systematisch untersucht werden.

Eine andere Frage ist: Wie gelangen große Staubmengen in die Mars-Atmosphäre und wie entstehen die sogenannten Staubteufel? Im Parabelflug wurde ein im Labor entdeckter Mechanismus untersucht, der hierfür mitverantwortlich sein könnte. Ausgelöst wird er durch die Bestrahlung einer Stauboberfläche mit intensivem Licht – zum Beispiel Sonnenlicht. Die Schicht erwärmt sich, wobei der wärmste Bereich nicht auf, sondern dicht unterhalb der Oberfläche liegt. Das Licht kann die obere Staubschicht leicht durchdringen, die darunter entstehende Wärme aber nur schwer entweichen – Staub ist für Wärmestrahlung undurchlässiger. Dieser Effekt ist als Treibhauseffekt allgemein bekannt. Die oben erwähnte Thermophorese sorgt zudem dafür, dass in dem entstandenen Temperaturgefälle weiter unten liegende Staubteilchen durch die Oberfläche hindurch in einen kälteren Bereich geschleudert werden können. Dies geschieht explosionsartig in kleinen Eruptionen, solange der Gasdruck oberhalb der Staubschicht nur wenige Millibar beträgt – eine Atmosphäre, wie sie auf dem Mars vorherrscht. Bei Parabelflügen wurde der Einfluss von Lichtintensität und Schwerkraft auf den Erosionsmechanismus untersucht. Die ersten Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Sonneneinstrahlung auf dem Mars den bodennahen Staub in dessen Atmosphäre transportieren kann.

## Dust and Plasma Physics

### Early phases in the evolution of planets

Today, the theory of planetary evolution assumes that tiny dust particles collided in space, adhering to each other and thus forming small agglomerates. This process was repeated until the agglomerates coalesced to form mile-sized boulders whose gravity attracted further particles until planets eventually formed. However, this scenario is still full of gaps, one particularly important question being how fast dust agglomerates can grow.

On Earth, it is impossible to emulate the slow planetary agglomeration of dust because gravity soon causes large lumps of dust to fall to the ground. In microgravity, on the other hand, their growth may be explored as they move towards each other and collide under the influence of light. In the process, not only the particles themselves are warmed but also the gas molecules on the side that is irradiated by intense light. Moving more quickly under this influence, the molecules slowly push the dust agglomerates away from the source of light. This effect is called thermophoresis. In parabolic flight experiments, scientists simulate the rays of the Sun with halogen lights and track the movements of the dust particles with a high-resolution camera. What is most interesting in this context is the interaction between particle size, gas pressure, light intensity, and particle velocity. So far, it has been demonstrated that particle size markedly influences transport velocity. But what happens if large agglomerates of dust or ice collide or one of these agglomerates impacts the dusty surface of a larger object? At what velocities will they adhere, rebound entirely or partially, or even be destroyed? These, too, are important questions relating to the origin of planets which are being systematically investigated on parabolic flights.

Another question is this: how do large quantities of dust enter the Martian atmosphere, and how do the so-called dust devils originate? On parabolic flights, a mechanism discovered in a laboratory was investigated which might be partially responsible for this. It is triggered when a dusty surface is irradiated by intense light – sunlight, for example. The layer warms up, with the warmer region being located not on top but closely below the surface. Light can easily penetrate the upper layer of dust, but the heat that develops underneath can escape only with difficulty – dust is less permeable to heat radiation. This phenomenon is generally known under the name of greenhouse effect. Because of the aforementioned thermophoresis, moreover, dust particles originally located farther down in the temperature gradient may be ejected through the surface into a colder region. This happens explosively in minor eruptions, provided the gas pressure above the dust layer is no higher than a few millibars – an atmosphere such as that which prevails on Mars. The influence of light intensity and gravity on this erosion mechanism has been investigated during parabolic flights. Initial results indicate that on Mars, solar radiation may transport dust from the ground into the atmosphere.

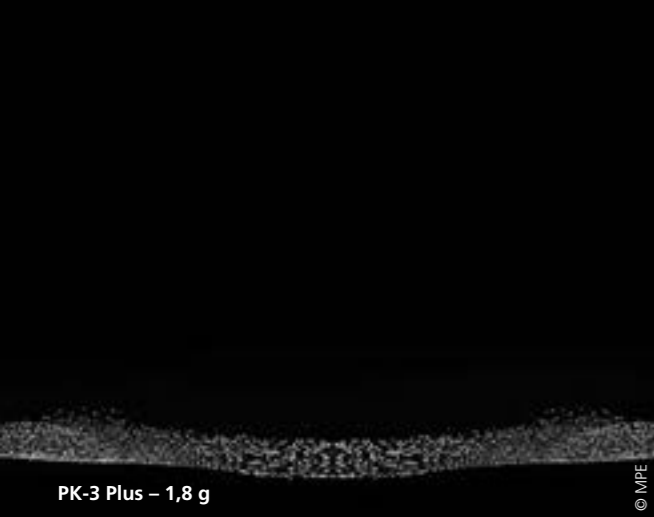
**Kosmos in einer Box:** Das Verhalten von Staubteilchen in Schwerelosigkeit soll erklären, wie Planeten entstanden sein könnten.

*Cosmos in a box: watching the behaviour of dust particles in microgravity might explain how planets have formed.*



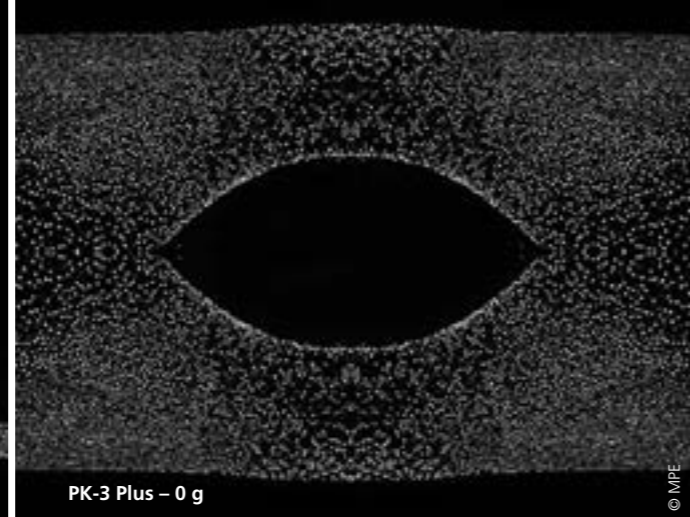
Wie entstehen Staubstürme und sogenannte Staubteufel auf dem Mars? Auf Parabelflügen wird untersucht, wie sich bestimmte Staubpartikel unter Schwerelosigkeit verhalten.

*What causes dust storms and so-called dust devils on Mars? Scientists on parabolic flights study how certain dust particles behave in microgravity.*



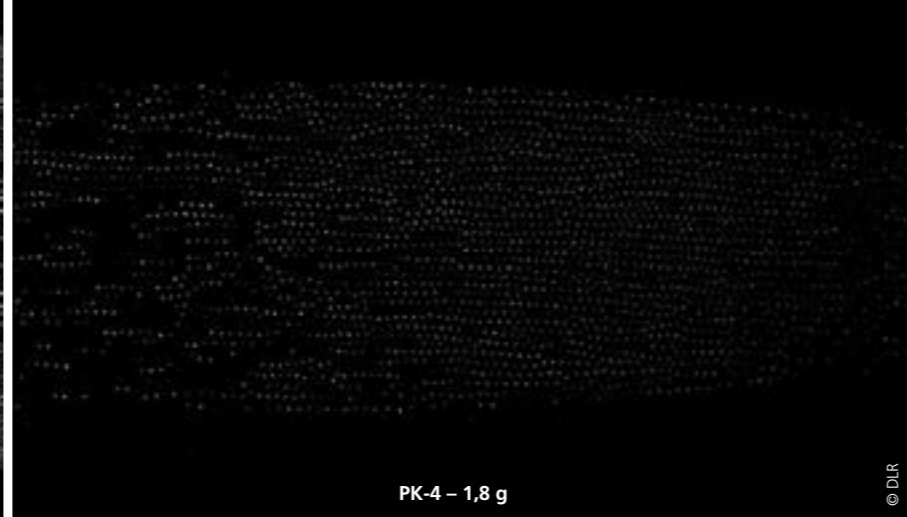
PK-3 Plus – 1,8 g

© MPE



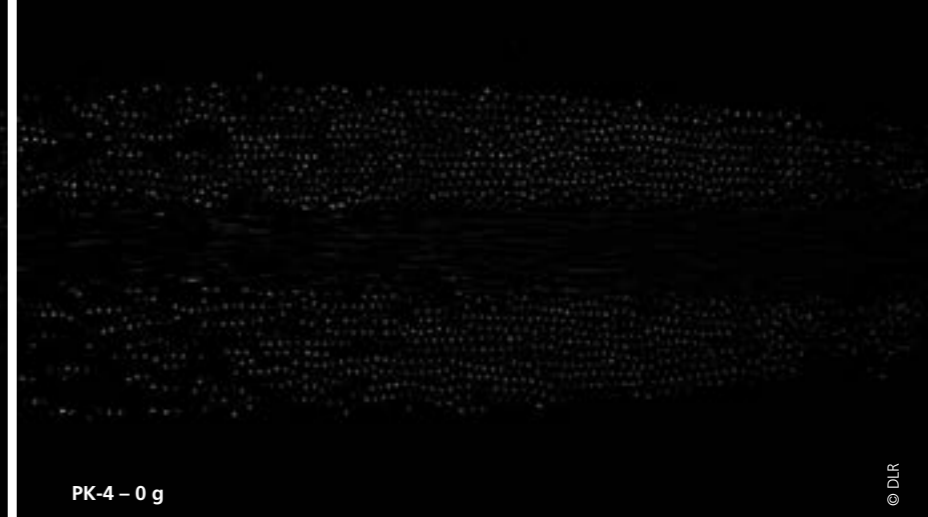
PK-3 Plus – 0 g

© MPE



PK-4 – 1,8 g

© DLR



PK-4 – 0 g

© DLR



© MPE



© NASA

Plasmaforschung auf der ISS: Das Experiment PK-4 wurde auf Parabelflügen getestet und ist seit Ende 2014 auf der Internationalen Raumstation ISS angekommen.

Plasma research on the ISS: the PK-4 experiment was tested on parabolic flights and has been on the International Space Station ISS since the end of 2014.

## Komplexe Plasmen

Mehr als 99 Prozent der sichtbaren Materie im Universum befindet sich im Plasma-Zustand. Plasmen sind Gase, die durch Energiezufuhr – zum Beispiel durch ein elektrisches Feld oder UV-Einstrahlung – teilweise oder vollständig in Ionen und Elektronen aufgespalten werden. Sie gelten allgemein als der chaotischste Materiezustand. Die Ionosphäre der Erde, Blitze, Nordlichter oder das leuchtende Medium in Energiesparlampen und in Plasmabildschirmen bestehen daraus. Von komplexen Plasmen spricht man dann, wenn im Plasma zusätzlich kleine Staubpartikel enthalten sind. Die Oberflächen dieser Teilchen laden sich elektrisch auf und – wenn ihre Dichte hoch genug ist – reagieren sie miteinander wie die Atome in einem „normalen“ Stoff. Das bedeutet, dass sich solche komplexen Plasmen in Abhängigkeit von Gasdruck, der Stärke des Energiefelds und der Teilchendichte wie Gase, Flüssigkeiten oder Feststoffe verhalten können. Plasmen, die Partikel von Submikrometer-Größe enthalten, werden für die Herstellung von Nanopulvern, Computerchips oder neuartigen Solarzellen gebraucht. In der Natur treten sie in interstellaren Wolken, planetaren Ringsystemen wie beim Saturn oder in Kometenschweiften auf. Für die Laboruntersuchungen werden meist die Edelgase Argon oder Neon durch elektrische Felder aufgeladen und mit Melamin-Teilchen im Größenbereich von ein bis zwanzig Nanometern versetzt.

## Wie funktioniert ein Plasmakristall?

Ein Kristall ist ein fester Stoff, bei dem Atome, Ionen oder Moleküle regelmäßig angeordnet sind und durch anziehende Wechselwirkungen zusammengehalten. Elektrisch gleichartig geladene Staubpartikel stoßen sich dagegen gegenseitig ab. Dadurch nehmen sie in dem Plasma, in dem sie eingeschlossen sind, untereinander die größtmöglichen Abstände ein. Es kann sich allerdings ebenfalls eine hochsymmetrische und periodische Struktur bilden – ein Plasmakristall. Da dieser transparent ist, kann die Bewegung jedes einzelnen Partikels beobachtet werden. In echten Festkörpern ist das unmöglich. Die Untersuchung von Plasmakristallen ist im Labor auf der Erde auf nahezu zweidimensionale Gebilde beschränkt, weil die Wolke aus Staubpartikeln unter dem Einfluss der Schwerkraft zusammengedrückt wird. Nur unter Schwerelosigkeit kann man dreidimensional ausgedehnte Plasmakristalle erzeugen.

## Tests für die ISS

Seit dem Beginn der physikalischen Forschung auf der Internationalen Raumstation ISS im Jahr 2001 werden bis heute kristalline, komplexe Plasmen in bilateraler Zusammenarbeit von deutschen und russischen Wissenschaftlern untersucht. Bei zahlreichen Parabelflugexperimenten des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik (seit 2014 die DLR-Forschungsgruppe Komplexe Plasmen) wurden vorab die Entwicklung, der Bau und der Betrieb der beiden deutschen Forschungsanlagen PK-3 und PK-3 Plus getestet und verbessert. In der jüngeren Vergangenheit wurden auf Parabelflügen gemeinsam mit der ESA Kernkomponenten der Ende 2014 auf der ISS installierten Anlage PK-4 erprobt, mit der das bisher erfolgreich in bilateraler Kooperation stattgefundene intensive Forschungsprogramm nun international weiter ausgebaut wird. PK-4 untersucht vor allem den „flüssigen“ Zustand komplexer Plasmen. Auch künftig werden auf Parabelflügen Parametersätze für die ISS-Experimente getestet oder komplementäre Untersuchungen durchgeführt. Die nächste Generation von Experimentkammern für die Raumstation nach PK-4, die den Parameterraum erheblich erweitern soll, steht bereits auf der Liste der Flugexperimente für die nächsten Jahre.

## Complex plasmas

The state of more than 99 per cent of all the visible matter in the universe is that of plasma. Plasmas are gases that are split partially or entirely into ions and electrons by energy induced, for example, by an electric field or UV radiation. They are generally regarded as the most chaotic state of matter. They are the substance of which the Earth's ionosphere, bolts of lightning, northern light, or the light-emitting medium in energy-saving lamps and plasma screens consist. The term complex plasma is used to describe a plasma that contains small dust particles. The surfaces of these particles become electrically charged and, if their density is high enough, they react with each other like atoms in a 'normal' substance. This means that such complex plasmas may behave like gases, liquids, or solids, depending on gas pressure, the strength of the energy field, and particle density. Plasmas containing sub-micrometre-sized particles are used to make nanopowders, computer chips, or innovative solar cells. Naturally they occur in interstellar clouds, planetary ring systems like that of Saturn, or in the tails of comets. In most laboratory tests, the inert gases argon or neon are ionised by electrical fields and melamine particles ranging in size between one and twenty nanometres are injected.

## How does a plasma crystal work?

A crystal is a solid substance in which atoms, ions, or molecules are arranged regularly and held together by mutual attraction. On the other hand, dust particles of equal electric charge repel each other, keeping the maximum distance possible from each other in the plasma in which they are enclosed. However, it is also possible for a highly symmetrical and periodic structure to form – a plasma crystal. As it is transparent, the movement of every single particle may be observed. In genuine solid bodies, this cannot be done. In laboratories on Earth, the examination of plasma crystals is restricted to objects that are almost two-dimensional because the cloud of dust particles is compressed by the influence of gravity. Plasma crystals that extend in three dimensions can be generated only in microgravity.

## Tests for the ISS

From the beginning of physical research on the International Space Station in 2001 to this day, crystalline, complex plasmas have been studied by German and Russian scientists in bilateral co-operation. In the run-up, the development, construction, and operation of the two German research installations PK-3 and PK-3 Plus were tested and improved in numerous parabolic flight experiments run by the Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics (since 2014: DLR research group on complex plasmas). In the recent past, core components of the PK-4 apparatus were tested on parabolic flights by DLR and ESA. Installed on the ISS late in 2014, PK-4 will be instrumental in extending internationally a research programme that has so far being conducted successfully in bilateral co-operation. PK-4 investigates mostly the 'liquid' state of complex plasmas. In the future, sets of parameters for ISS experiments will be tested and complementary investigations carried out on parabolic flights as well. The next generation of experimental chambers that will follow PK-4 to the space station, considerably expanding the available range of parameters, has already been put on the list of flight experiments for the next few years.

Ein komplexes Plasma wird unter dem Einfluss der Schwerkraft in Richtung Erdmittelpunkt gestaucht. In Schwerelosigkeit hingegen kann ein homogenes, dreidimensionales komplexes Plasma entstehen.

Under the influence of gravity, a complex plasma is compressed into the direction of the Earth's centre. Microgravity permits the formation of a homogeneous, three-dimensional, complex plasma.

### Plasmaphysik auf Parabelflügen

Mit einer Kombination aus optischen und elektrischen Messungen wurden Dichte und Temperatur der Plasmen sowie die elektrischen Felder in deren Innerem und die sich daraus ergebende Anordnung der Mikropartikel erforscht. Den Forschern gelang erstmals, die Staubteilchen mit einem Manipulationslaser gezielt zu verschieben und so die Kräfte, die auf die Staubwolke und somit auf die Partikel im Plasmakristall wirken, direkt zu messen.

Außerdem werden auf Parabelflügen Staubbichtewellen in komplexen Plasmen untersucht. Diese Experimente dienen dazu, den Transport von Staub zu erklären, der auf atmosphärefreien Himmelskörpern wie zum Beispiel dem Mond stattfindet.

Ein anderer Effekt: Der Staub in einem dreidimensionalen komplexen Plasma zwischen zwei Elektroden füllt nicht das gesamte Volumen aus. In der Regel bildet sich ein zentraler staubfreier Raum. Bei hoher Staubbichte und niedrigem Gasdruck entstehen spontan sogenannte selbstangeregte Staubbichtewellen, die sich von dem staubfreien Raum radial nach außen, aber nicht notwendigerweise parallel zum elektrischen Feld ausbreiten. Die Frequenz dieser Staubbichtewellen nimmt vom Inneren des Volumens zum Rand hin ab.

### Plasma physics on parabolic flights

A combination of optical and electrical measurements was used to explore the density and temperature of plasmas as well as the electrical fields in their interior and the resultant arrangement of microparticles. For the first time, researchers succeeded in selectively moving dust particles with a manipulation laser so that the forces acting on the dust cloud and, consequently, on the particles within the plasma crystal could be measured directly.

Another subject investigated on parabolic flights is dust density waves in complex plasmas. These experiments serve to explain the transport of dust that is taking place on heavenly bodies without an atmosphere, like the Moon, for example.

Another effect: the dust contained in a three-dimensional complex plasma between two electrodes does not fill the entire volume. As a general rule, a dust-free space forms at the centre. When dust density is high and gas pressure is low, so-called self-excited dust density waves develop spontaneously, spreading radially outward from the dust-free space but not necessarily running parallel to the electric field. The frequency of these dust density waves declines from the interior of the volume towards its boundaries.



Auf Parabelflügen wird oft mit staubigen Plasmen experimentiert. Die Versuchsanlagen hierfür sind sehr komplex aufgebaut. On parabolic flights, scientists often experiment with dusty plasmas. The apparatus features a very complex design.







Das Aussetzen von Satelliten im Zielorbit durch kontrollierte Trennung von der Trägerrakete ist eine technische Herausforderung. Ingenieure und Wissenschaftler testen auf Parabelflügen neue Separationsmechanismen von Nanosatelliten unter Mikrogravitationsbedingungen.

*Delivering a satellite into its target orbit by controlled separation from its launcher is a technical challenge. On parabolic flights, engineers and scientists test new separation mechanisms for nanosatellites under microgravity conditions.*

## Raumfahrttechnologie

Bevor Technik im Weltraum eingesetzt werden kann, muss sie umfangreich getestet werden – und das am besten unter möglichst realen Umgebungsbedingungen. Parabelflüge bieten hier eine ideale Möglichkeit, einzelne Raumfahrttechnologie-Aspekte direkt in Schwerelosigkeit zu testen. Wie entfaltet sich eine Antenne am besten? Wie koppeln sich Satelliten ideal von einer Raketenstufe ab? Wie können Weltraumschrottrümmer eingefangen werden? Wie landet man am geschicktesten auf einem Kometen? Solche und weitere Fragen haben Wissenschaftler gestellt, um sie auf Parabelflügen zu beantworten.

## Space Technology

*Before any technology can be used in space, it must be tested extensively – and under environmental conditions that are as realistic as possible. In this regard, parabolic flights offer ideal opportunities for testing individual aspects of space technologies in microgravity. What is the best way for an antenna to deploy? How should a satellite ideally separate from a rocket stage? How to capture fragments of space debris? What is the most skilful way to land on a comet? These and other questions have been asked by scientists to be answered on parabolic flights.*



Der Platz auf Trägerraketen ist begrenzt: Nur Nutzlasten mit bis zu 4,5 Metern Durchmesser können ins All befördert werden. Daher müssen vor allem Antennen sehr platzsparend zusammenklappbar sein. Im Weltraum entfaltet sich die Antenne dann zu ihrer endgültigen Größe von bis zu 20 Metern Länge. Vor dem Weltraum-einsatz wird auf Parabelflügen getestet.

*A launcher's storage capacity is limited. The maximum diameter of an object carried into space is 4.5 metres. During transport, components such as antennas therefore have to be folded away. Once in orbit, antennas unfold to their final length, which can be up to 20 metres. The procedure is tested on parabolic flights before being deployed in space.*

## Entfalten

Moderne Satelliten werden immer leistungsfähiger und vielseitiger. Gleichzeitig müssen sie immer größere Datenmengen empfangen und wieder in Richtung Erde senden. Die Parabolantenne dafür kann im Weltall bis zu 20 Meter groß sein – sollte dabei allerdings auch möglichst wenig wiegen. Denn der Platz auf Trägerraketen ist begrenzt und der Transport in den Weltraum sehr teuer. Da die Träger nur Nutzlasten bis zu etwa 4,5 Metern Durchmesser ins All befördern können, müssen sich diese Anlagen platzsparend zusammenklappen lassen. Im Weltraum entfaltet sich die Antenne dann zu ihrer endgültigen Größe, wobei sich zwangsläufig Abweichungen von der Idealform ergeben. Diese Anomalien sollten so klein wie möglich gehalten werden, damit es zu nicht zu Störungen in der Datenübertragung kommt. Forscher entwickeln und testen neue Strukturkonzepte und Materialien für große, hochpräzise Antennen. Eines dieser Konzepte sieht die Kombination einer Struktur mit zwölf klappbaren Armen und einem neuartigen Oberflächenmaterial aus Kohlefaser-Silikon-Verbundwerkstoff vor. Im Parabelflug wurde diese Antenne im Rahmen des OOV-Programms („On Orbit Verification von neuen Techniken“) des DLR Raumfahrtmanagements erfolgreich erprobt und damit die Grundlage für ihren Einsatz bei zukünftigen Satellitenmissionen geschaffen.

## Abkoppeln

Wir leben in einer Welt der stetigen Miniaturisierung. So versuchen Ingenieure, Satelliten auch zunehmend kleiner und leichter zu bauen. Seit einigen Jahren werden neben den großen Satelliten, die vor allem für Kommunikations-, Wetter- und Erdbeobachtungsaufgaben eingesetzt werden, sogenannte Nano-, Pico- und Mikrosatelliten auf ihre Umlaufbahnen gebracht. Eine der technischen Herausforderungen bei diesen 20- bis 150-Kilogramm-Leichtgewichten ist die kontrollierte Trennung von Satellit und Trägerrakete. Als mechanische Schnittstelle kommen hier sogenannte Separationssysteme zum Einsatz. Sie halten den Satelliten bis zu seinem Aussetzen zuverlässig an der Trägerraketenstruktur fest und „stoßen“ ihn dann zu einem bestimmten Zeitpunkt mit einer exakten Geschwindigkeit ab. Bei Parabelflügen wird ein spezieller, elektromechanisch auslösender Auswurfmechanismus für Nanosatelliten in der Schwerelosigkeit mit einem 20 Kilogramm schweren Dummy-Satelliten getestet, der horizontal ausgestoßen und von einem Sicherheitsnetz aufgefangen wird. Dabei wird der Satellit aus verschiedenen Perspektiven gleichzeitig gefilmt, um daraus Rückschlüsse auf die Qualität der Separation sowie der optimalen Auswurfgeschwindigkeit des Satelliten zu ziehen.

## Unfolding

*Modern satellites are growing steadily more efficient and versatile. At the same time, they need to be capable of receiving ever greater volumes of data and transmit them back to Earth. The dish antennas used in space for this purpose may be up to 20 metres in size but should be as light as possible nevertheless. Stowage space is limited on launchers, and transport into orbit is very expensive. Because launchers are incapable of transporting payloads measuring more than about 4.5 metres in diameter, any subsystem must be collapsible to save space. In orbit, the antenna will unfold to its final size, with its shape necessarily deviating somewhat from the ideal. Such anomalies should be kept as small as possible to avoid any malfunction in data communication. Researchers are developing and testing new structural concepts and materials for large high-precision antennas. One of these concepts envisages combining a structure of twelve collapsible arms with an innovative surface material consisting of a carbon-silicon composite. This antenna was successfully tested on parabolic flights under the DLR Space Administration's OOV programme (On Orbit Verification of new technologies), thus establishing a basis for its use on future satellite missions.*

## Undocking

*We live in a world of permanent miniaturisation. Consequently, engineers attempt to build ever smaller and lighter satellites. Besides the big satellites that are mainly used for functions of communication, meteorology, and Earth observation, so-called nano, pico, and micro-satellites have been shot into orbit for some years. One of the technical challenges presented by these lightweights of between 20 and 150 kilogrammes is their controlled separation from the launcher. The mechanical device used for this purpose is called a separation system. It will firmly hold a satellite in place in launcher's payload bay until the time comes for it to be released, when it will need to be 'pushed' away at a precisely determined velocity. A special, electromechanically actuated ejection mechanism for nano-satellites was tested in microgravity during parabolic flights when a 20-kilogramme dummy satellite was ejected horizontally and caught in a safety net. During the test, the satellite was filmed simultaneously from various perspectives to permit drawing conclusions on the quality of the separation and the optimum ejection velocity of the satellite.*

**Basteln für den Weltrauminsatz:** In der heutigen Zeit werden auch Satelliten immer kleiner. Die TU Berlin hat bereits mehrere sogenannte Cubesats im Orbit im Einsatz. Damit diese kleinen Würfel mit einer Kantenlänge von jeweils zehn Zentimetern sicher von ihrer Trägerrakete getrennt werden können, wird der Separationsmechanismus in Schwerelosigkeit vorab auf Parabelflügen getestet.

**Constructing for space:** today, satellites come in smaller and smaller sizes. TU Berlin is already operating several so-called cubesats in space. To ensure that these small cubes, a side of which measures no more than ten centimetres, can be released safely from their launch vehicle, the separation mechanism is previously tested under microgravity on parabolic flights.



Weltraumschrott „fischen“: Auf Parabelflügen wird getestet, wie sich Weltraumschrott wieder einfangen lassen könnte.

*‘Fishing’ for space debris: tests on parabolic flights help develop a way of re-capturing space debris.*

## Fangen

Nach dem Ende ihrer aktiven Zeit werden Satelliten und Raketenstufen im erdnahen Orbit zu einem Problem, da sie mit anderen Satelliten oder gar der Internationalen Raumstation ISS zusammenstoßen und diese beschädigen könnten. Darüber hinaus entstehen durch einen Aufprall sehr viele neue, kleinere Trümmerteile. Das gefährdet andere Satelliten – besonders auf den polaren Umlaufbahnen in 600 bis 1.000 Kilometern Höhe. Um die Gefahr zu verringern, sollen zukünftig spezielle Satelliten Weltraumschrott aus den Orbits entfernen. Sie fliegen die ausrangierten Raumfahrtobjekte an, fangen sie zum Beispiel mit einem Netz ein und entfernen sie aus der Gefahrenzone. Diese Variante eignet sich insbesondere für rotierende Satelliten oder für Objekte ohne Angriffspunkt für mechanische Greifer. Nach dem erfolgreichen „Fischen“ wird das Ensemble soweit gebremst, dass es schließlich kontrolliert in Richtung Erde steuert und beim Eintritt in die Atmosphäre verglüht. Dieser Einfangmechanismus kann nur in Schwerelosigkeit realitätsnah getestet werden. Hierzu wurde das Netz-Einfang-Experiment auf einem Parabelflug durchgeführt.

## Landen

MASCOT (Mobile Asteroid Surface Scout) ist ein Asteroiden-Landegerät, das im DLR entwickelt wurde und als Teil der japanischen Hayabusa-II-Sonde im Dezember 2014 gestartet ist. Wenn es nach seiner vierjährigen Reise im Jahr 2018 auf dem Asteroiden 1999JU3 angekommen ist, soll es dort über den Boden „hüpfen“ und den uralten Gesteinsbrocken untersuchen. Doch damit diese Fortbewegungsart funktioniert, musste der Lander unter realitätsnahen Bedingungen auf Parabelflügen getestet werden. Denn die größten Herausforderungen sind die sehr geringe Anziehungskraft eines Asteroiden und die weitgehend unbekanntes Bodeneigenschaften. Da die Gravitation des Zielasteroiden etwa nur ein sechzigtausendstel der Schwerkraft auf der Erde ausmacht, ist Hüpfen energetisch sinnvoll. Es besteht dennoch die Gefahr, dass eine zu hohe Bewegungsenergie beim Hüpfen dazu führt, dass MASCOT Fluchtgeschwindigkeit erreicht und wieder in den Weltraum hinaus fliegt. Andererseits muss das System genug energetische Reserven haben, um auf weichem Untergrund abspringen zu können. Beides wird mit einem sogenannten Exzenterarm erreicht, der im Inneren der etwa 30 x 30 x 20 Zentimeter großen, quaderförmigen MASCOT-Struktur rotiert. Dieser Arm kann je nach Anforderung beschleunigt und abgebremst werden. Durch das an seinem Ende befestigte Gewicht werden Kräfte auf den insgesamt rund acht Kilogramm schweren Lander übertragen. Diese Kräfte reichen für eine Drehung oder einen Sprung auf dem Asteroiden aus. Die durchgeführten Parabelflugtests haben nachgewiesen, dass das mit Hilfe von Simulationen entwickelte Exzenterarm-System auch in der Realität funktionieren wird.

## Capturing

*When their active period is over, satellites and rocket stages in a near-Earth orbit become a problem because they might collide with and damage other satellites or even the International Space Station. Moreover, any impact will produce lots of new and smaller fragments which endanger other satellites, particularly those on polar orbits at altitudes between 600 and 1,000 kilometres. To mitigate that danger, special satellites will have to be deployed in the future to remove space debris from orbit. Their job will be to approach a decommissioned space object, capture it with a net, for example, and remove it from the danger zone. This variant is particularly suitable for rotating satellites and for objects without protruding features where a mechanical gripper could take hold. Once the ‘fishing’ part is over, the tandem will be slowed down enough for a controlled fall towards Earth, where it will burn up as it enters the atmosphere. This capturing mechanism can only be tested realistically in microgravity. Consequently, a net capturing experiment was carried out on a parabolic flight.*

## Landing

*MASCOT (Mobile Asteroid Surface Scout) is an asteroid lander that was developed by DLR and launched in December 2014 as part of the Japanese Hayabusa II probe. In 2018, having arrived on the asteroid 1999JU3 after a journey of four years, it will ‘hop’ across the surface and examine the ancient lump of rock. For this method of locomotion to work, however, the lander needs to be tested on parabolic flights under realistic conditions, for the biggest problems involved are the very low gravity of an asteroid and the largely unknown properties of its surface. As the gravity of the target asteroid amounts to only one sixty-thousandth of the Earth’s gravity, hopping makes energetic sense. There is a danger that an excess of hopping energy may cause MASCOT to reach escape velocity and fly back into space. On the other hand, the system’s energy reserve must be sufficient to permit hopping on soft ground. Both these purposes are served by a so-called eccentric arm that rotates in the interior of MASCOT’s box-shaped structure which measures about 30 x 30 x 20 centimetres. Depending on requirements, this arm may be either accelerated or decelerated. The weight attached to its end transmits forces to the lander, which weighs around eight kilogrammes in total. These forces are sufficient for turning or jumping on the asteroid. Past tests on parabolic flights have furnished proof that the eccentric system that was developed with the aid of simulations will also work in reality.*



Landen auf einem Asteroiden: Die deutsche Landeeinheit MASCOT soll auf dem Objekt 1999JU3 landen, über seine Oberfläche „hüpfen“ und dabei wertvolle Informationen über den Gesteinsbrocken sammeln. Auf Parabelflügen wurde mit einem MASCOT-Modell das „Hüpfen“ geübt. Die MASCOT-Testeinheit ist im linken unteren Rack zu sehen.

*Landing on an asteroid: the German-built lander MASCOT is to land on object 1999JU3, ‘hop’ over its surface and pick up important information about the small piece of rock in space. A MASCOT model was taken on a parabolic flight and taught how to ‘hop’. The MASCOT test unit can be seen below in the left rack.*

Die Parabelflüge bleiben auch in Zukunft für human-physiologische Forschung in Schwerelosigkeit eine außerordentlich wichtige Forschungsplattform.  
In the future as much as today, parabolic flights will constitute an important platform for microgravity research in human physiology.

## Die Zukunft der Parabelflüge

Seit 1999 führte das DLR regelmäßig zuerst eine und seit vielen Jahren zwei Parabelflugkampagnen pro Jahr durch. Die Möglichkeit, regelmäßig mit Laborgeräten, einer relativ kurzen Vorlaufzeit, dabei noch eigenhändig in Schwerelosigkeit zu experimentieren, hat die Parabelflüge zu einem sehr wichtigen und verlässlichen Bestandteil des deutschen Programms Forschung unter Weltraumbedingungen werden lassen. Damit können viele aufwendige und teure Weltraumexperimente wissenschaftlich und technisch optimal vorbereitet werden. Außerdem bieten Parabelflüge neben Raumstationen die einzigartige Chance, humanphysiologische und medizinische Fragen am Menschen in Schwerelosigkeit zu untersuchen. In Zukunft ist zu erwarten, dass auch verstärkt Geräte aus verschiedenen Fachbereichen oder Satellitenkomponenten vor ihrem Einsatz im Weltraum bei Parabelflügen auf ihre korrekte Funktion getestet werden. Parabelflüge sind daher unerlässlich für eine optimale Gestaltung der Raumfahrtstrategie der Bundesregierung. Das DLR wird sie auch in den kommenden Jahren regelmäßig für Wissenschaftler, Ingenieure und die Industrieforschung anbieten.

## The Future of Parabolic Flights

Since 1999, DLR has been conducting one and in recent years two parabolic flight campaigns every year. Regularly providing researchers with flight opportunities to carry out their own laboratory experiments in microgravity after a relatively short lead time, parabolic flights have become a very important and reliable element of Germany's microgravity research programme. They are ideal for the scientific and technical preparation of elaborate and expensive space experiments. Also, similarly to the space stations, parabolic flights permit carrying out medical examinations on humans, thus providing a unique opportunity for physiological and medical research in microgravity. For the future, it is to be expected that increasing numbers of devices for different kinds of research areas and also satellite components, for example, will be demonstrated and validated on parabolic flights before they are deployed in space. This makes parabolic flights an indispensable component in the implementation of the space strategy of the German Federal Government. In the years to come, DLR will continue to offer flight opportunities to scientists, engineers, and industrial researchers on a regular basis.

# Das DLR im Überblick

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

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

## *DLR at a glance*

*DLR is the national aeronautics and space research centre of the Federal Republic of Germany. Its extensive research and development work in aeronautics, space, energy, transport, and security is integrated into national and international cooperative ventures. In addition to its own research, as Germany's space agency, DLR has been given responsibility by the federal government for the planning and implementation of the German space programme. DLR is also the umbrella organisation for the nation's largest project management agency.*

*DLR has approximately 8000 employees at 16 locations in Germany: Cologne (headquarters), Augsburg, Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Goettingen, Hamburg, Juelich, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Stade, Stuttgart, Trauen, and Weilheim. DLR also has offices in Brussels, Paris, Tokyo, and Washington D.C.*



**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt**  
German Aerospace Center

### **Raumfahrtmanagement**

#### ***Space Administration***

Königswinterer Straße 522-524  
53227 Bonn, Germany

DLR.de

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Supported by:



Federal Ministry  
for Economic Affairs  
and Energy

on the basis of a decision  
by the German Bundestag