

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 7.700 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Das DLR unterhält Büros in Brüssel, Paris, Tokio und Washington D.C.



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Raumfahrtmanagement
Königswinterer Straße 522-524
53227 Bonn, Germany

DLR.de
DLR.de/rd

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ISS-Nutzung – Deutsche Forschung auf der Internationalen Raumstation – Mai 2014

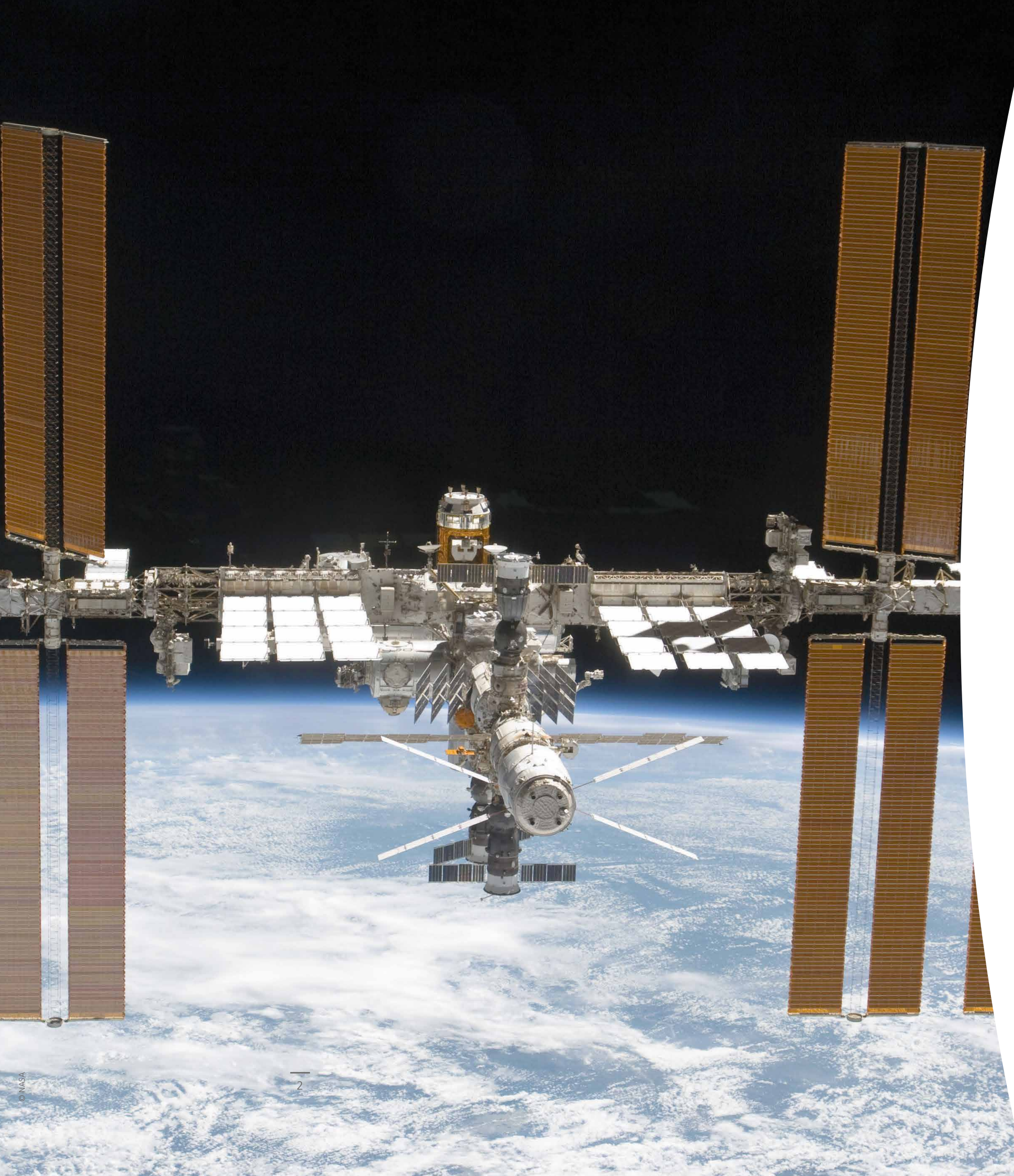
ISS-Nutzungsbrochüre



ISS-Nutzung

Deutsche Forschung auf der
Internationalen Raumstation





Inhaltsverzeichnis

Einleitung..... Seite 4Technologie Seite 6

ANITA.....	Seite 8
COLAIS und Vessel-ID-System.....	Seite 10
E-Nose	Seite 12
FIPEX.....	Seite 14
GTS.....	Seite 16
ROKVISS	Seite 18
MagVector/MFX.....	Seite 20
NightPod.....	Seite 22

Kommerziell Seite 24

Wise-Net	Seite 26
SPACETEX	Seite 28

Astronomie und Astrophysik..... Seite 30

AMS-02	Seite 32
SolACES	Seite 34

Materialwissenschaft Seite 36

-  EML..... Seite 38
-  CETSOL..... Seite 40
-  MICAST..... Seite 42
-  SETA..... Seite 44

Physik..... Seite 46

PK-3 und PK-3-Plus	Seite 48
 PK-4	Seite 52
GeoFlow	Seite 56
CCF	Seite 60
 DCMIX	Seite 64
 FASES	Seite 66
 FASTER	Seite 68

Raumfahrtmedizin..... Seite 70

PMDIS und TRAC	Seite 72
Puls und Pneumocard	Seite 74
HealthLab	Seite 76
ETD und 3D-ETD	Seite 78
Otolith	Seite 80
Thermo	Seite 82

🌐 Circadian Rhythm.....	Seite 84
EKE.....	Seite 86
SOLO.....	Seite 88
Pro-K.....	Seite 90
Nutrition.....	Seite 92
🌐 Cartilage.....	Seite 94
Sarcolab.....	Seite 96
SkinCare.....	Seite 98
🌐 Skin-B.....	Seite 100
Immuno.....	Seite 102

Gravitationsbiologie Seite 104

AT-Space	Seite 106
WAICO	Seite 108
Xenopus und Tadpoles	Seite 110
CRISP	Seite 112
MDS-Muscle	Seite 114
CellBox-1	Seite 116
CellBox-2	Seite 118
Triplelux-A	Seite 120
 Triplelux-B	Seite 122

Strahlen- und Astrobiologie..... Seite 124

DOSMAP	Seite 126
 DOSIS und DOSIS 3D	Seite 128
Matroshka	Seite 130
Chromosomes	Seite 132
Expose-E – ADAPT und PROTECT	Seite 134
Expose-R – SPORES und R3D-E ...	Seite 138
 BIOMEX	Seite 140
 BOSS	Seite 142
AqXX	Seite 144

Molekül-Kristallisation Seite 146Kristallisation Biologischer
Makromoleküle Seite 148

Bildung **Seite 152**

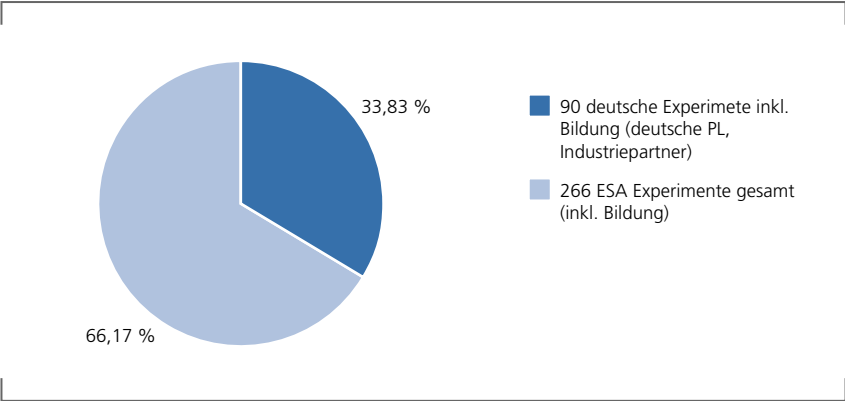
• Beschützer der Erde	Seite 154
• Columbus Eye	Seite 156
• Top-Experiment Seifenblasen	Seite 158
• OEE – Oil Emulsion Experiment	Seite 160

Der deutsche ESA-Astronaut Alexander Gerst fliegt am 28. Mai 2014 zur ISS. Dort wird er im Rahmen seiner Mission „Blue Dot – shaping the future“ 166 Tage lang auf der Raumstation leben, arbeiten und forschen. Alle Experimente, die während seiner Mission laufen oder von Alexander Gerst durch beziehungsweise weitergeführt werden, sind an dem Blue Dot-Missionslogo zu erkennen.

Forschung auf der Raumstation im Überblick

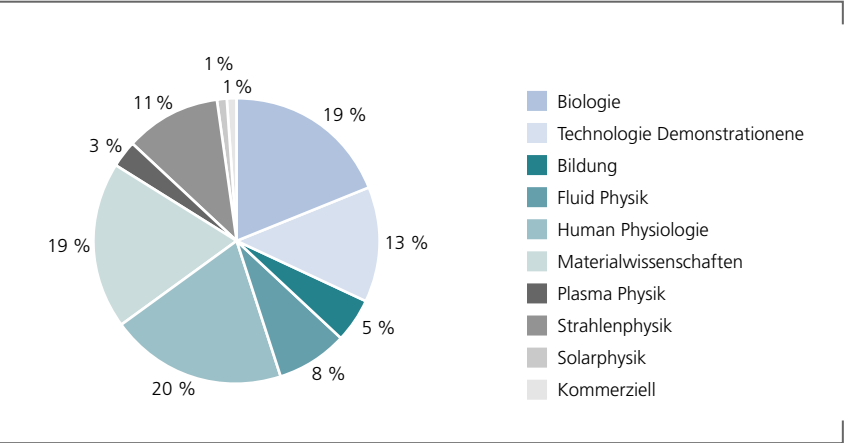
Die Internationale Raumstation ISS ist das größte internationale Kooperationsprojekt der Menschheit im erdnahen Weltraum. Die USA, Russland, Kanada, Japan und elf Mitgliedsstaaten der Europäischen Weltraumorganisation ESA sind Partner bei Forschung und Nutzung. Jeder Raumstationspartner hat eigene Pläne für die ISS-Forschung, jedoch haben alle ein Ziel gemeinsam: die Verbesserung des Lebens auf der Erde. Seit dem ersten Flug von Astronauten und Kosmonauten zur ISS nutzen Forscher in den ISS-Laboren den Einfluss der Schwerelosigkeit und anderer Parameter außerhalb der schützenden Erdatmosphäre für ihre Experimente. Auch der deutsche ESA-Astronaut Alexander Gerst wird während seiner Mission „Blue Dot – shaping the future“ viele wichtige deutsche Experimente auf der Raumstation durch- beziehungsweise weiterführen. Sie sind im Inhaltsverzeichnis mit einem „Blue Dot“ gekennzeichnet. Die ISS-Forschung umfasst neben der Erprobung neuer Technologien auch grundlagen- und anwendungsorientierte Forschungsbereiche wie Lebenswissenschaften, Materialwissenschaft, Physik, Biologie, Medizin und Erdbeobachtung. Auch das Thema Bildung ist mittlerweile stärker in den Fokus gerückt. Erst seit Mitte des Jahres 2009 wird die Raumstation durch eine permanente Sechs-Mann-Crew voll genutzt. Seit Beginn der wissenschaftlichen Forschung auf der ISS sind viele bedeutende Ergebnisse erzielt worden. Auch die Auswertung laufender und kommender Experimente lässt zahlreiche neue Erkenntnisse für Wissenschaft und Anwendungen erwarten. In vielen Experimenten und Anwendungen ist auch die deutsche Industrie eingebunden. Neben dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn, wird auch die Frage nach einem kommerziellen Nutzen insbesondere im Technologiebereich immer wichtiger. Jedes Experiment wird durch sogenannte Principal Investigators (PI), die die wissenschaftliche Federführung im Experiment wahrnehmen, begleitet. Neben dem PI gibt es oft mehrere Co-operative Investigators (Co-I), die aufgrund ähnlicher wissenschaftlicher Fragestellungen am Experiment teilnehmen. Darüber hinaus sind oft Industriepartner als Unterauftragnehmer eingebunden. Deutschland hat einen großen Anteil an der europäischen Forschung auf der Raumstation. Circa 65 Prozent der bisherigen deutschen Weltraumforschung wird im ESA-Programm (ELIPS) geplant und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie durchgeführt. Darüber hinaus forscht Deutschland mit Mitteln aus dem nationalen Programm zum Beispiel in bilateralen Kooperationen. Diese Broschüre stellt eine Auswahl wichtiger deutscher ISS-Experimente vor.

Deutsche Experimente und Anwendungen im europäischen ISS Programm



Deutschland nimmt mit 33,83 Prozent einen erheblichen Anteil im ESA-Forschungsprogramm ELIPS ein.

Deutsche ESA-Experimente sortiert nach Fachdisziplinen



Prozentuale Verteilung deutscher Forschung auf der ISS





Technologie – Einsatz unter extremen Bedingungen für Technik von Morgen

Für extreme, technologische Fragestellungen aller Art bietet die Internationale Raumstation eine hervorragende Experimentierplattform mit vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten. So werden zum Beispiel hochempfindliche Sensoren und Antennen für die Identifikation von Schiffen auf der ISS getestet. Dadurch lassen sich weltweite Schiffsbewegungen nachverfolgen und aufzeichnen, mit deren Hilfe beispielsweise Schadstoffemissionen kartiert oder Routen verbessert werden können. Proben von technischen Oberflächen, Lacken und neuen Materialien lassen sich außen auf der ISS dem atomaren Sauerstoff und der harten Sonnenstrahlung aussetzen und geben Aufschluss über deren Haltbarkeit. Automatische Kameras können über das Internet gesteuert werden und bieten so den Blick in Flugrichtung, nach unten und nach hinten. Für die Erd- und Atmosphärenbeobachtung sind neue Geräte wie der NightPod im Einsatz. Innovative Sensoren, die zum Beispiel für nachgeführte Nachtaufnahmen von Städten, die Veränderung in der „Lichtverschmutzung“ oder Polarlichter und Gewitter in besonders hoher Auflösung zeigen können, sind geplant. Beim Magnetfeldexperiment MagVector/MFX wird erstmals weltweit das Zusammenspiel eines elektrischen Leiters mit dem Erdmagnetfeld gemessen. So will man unter anderem das Erdmagnetfeld für zukünftige Anwendungen nutzen. Technologie-Experimente kommen überall dort zum Einsatz, wo sich für Material oder Funktionen extremen Herausforderungen wie zum Beispiel der harten Strahlung, dem atomaren Sauerstoff, dem Vakuum oder der hohen Orbitalgeschwindigkeit der ISS stellen.

ANITA: Prima Klima oder dicke Luft auf der ISS?

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

In einer abgeschlossenen Umgebung wie im Inneren der Internationalen Raumstation, muss die Luftzusammensetzung überwacht werden, um die Gesundheit der Menschen sicherzustellen. Die Hauptbestandteile der Kabinenluft wie Sauerstoff, Stickstoff und Kohlendioxid werden bereits durch das Lebenserhaltungssystem der Raumstation überprüft. Das Analysing Interferometer for Ambient Air (ANITA) kann jedoch bis zu 32 wichtige chemische Verunreinigungen nahezu in Echtzeit aufspüren.

Experimentbeschreibung:

ANITA saugt im Betrieb alle sechs Minuten Umgebungsluft an und untersucht sie. Die Analyse basiert auf der Fourier Transform Infrared Spectrometry-Technologie (FTR). Dabei wird ein Strahl des infraroten Lichts in zwei Teile aufgespalten, die über verschiedene – teils bewegliche – Spiegel umgelenkt und später wieder zusammengeführt werden. Auf ihrem Weg durchqueren sie dabei eine Kammer mit der zu analysierenden Luft. Die wieder zusammengeführten Strahlen treffen dann auf einen Detektor, der das Licht in elektrische Signale umwandelt. Mit einer mathematischen Funktion – der sogenannten Fourier-Transformation – wird aus diesen Signalen dann ein Lichtspektrum errechnet. Jeder Stoff in der Luft hat ein bestimmtes Spektrum. Die Software der Anlage gleicht dann die aufgenommene Bandbreite mit einer Datenbank von 32 chemischen Verbindungen ab und findet so heraus, welche davon in der untersuchten Luft vorhanden sind. Nach der Analyse, die nur wenige Minuten dauert, wird neue Luft angesaugt und überprüft. Auf diese Weise erhält man eine detaillierte Aussage darüber, wie sich die Luft in der Station zusammensetzt und wie sie sich über die Zeit verändert. Da ANITA nur an einem Standort misst, können zusätzlich mit kleinen Beuteln Luftproben aus anderen Bereichen der Station gesammelt und untersucht werden. So ergibt sich ein besseres Bild von der Gesamtsituation auf der Station.

Astronaut Clay Anderson mit dem Analysing Interferometer for Ambient Air (ANITA)

Status:

ANITA startete am 8. August 2007 an Bord des amerikanischen Space Shuttles Endeavour (STS-118) ins All. Auf der Raumstation wurde das Spektrometer dann im US-amerikanischen Destiny-Modul im September 2007 installiert und in Betrieb genommen. Ursprünglich sollte die Experimentphase nur zehn Tage dauern. Doch aufgrund guter Ergebnisse wurde die Betriebsdauer schließlich auf elf Monate verlängert. Insgesamt war ANITA von September 2007 bis August 2008 auf der ISS aktiv.

Ergebnisse:

Über den gesamten Messzeitraum konnte eine ausführliche Analyse über die Qualität der Umgebungsluft in der Station angefertigt und erstmals eine Vielzahl an Verbindungen in hoher zeitlicher Auflösung beobachtet werden. Der Vergleich mit Luftproben aus anderen Stationsbereichen und ähnlichen Messungen bestätigte die Genauigkeit des Gerätes. So stieß ANITA beispielsweise auf das Kältemittel Freon in der Umgebungsluft, das aus einem bis dahin unbekannten Leck eines russischen Kühlkreislaufes auf der Station entwich. ANITA unterstrich damit die Bedeutung eines solchen Systems für die Gesundheit und Sicherheit der Astronauten auf der Raumstation.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Da sich ANITA in seinem elfmonatigen Betrieb auf der ISS bewährte, wurde in der Zwischenzeit ein Nachfolger (ANITA-2) entwickelt. Er wird deutlich kompakter ausfallen und ist für einen dauerhaften Betrieb auf der Station geeignet. Eine endgültige Entscheidung über den Bau von ANITA-2 ist aber noch nicht gefallen.

Zukünftige bemannte Langzeitmissionen – egal ob Mondstation oder Flug zum Mars – werden ohne eine detaillierte und dauerhafte Überwachung der Raumluft scheitern. „ANITA-Technologie“ wird daher ein wichtiger Teil zukünftiger Entwicklungen im Bereich der bemannten Raumfahrt sein. Darüber hinaus gibt es auch viele Beispiele für Anwendungen in geschlossenen Umgebungen auf der Erde: Auch in U-Booten oder Bergwerken steht die Überwachung der Luftzusammensetzung an erster Stelle.



Astronaut Clay Anderson sammelt mit einer Pumpe Luftproben, die vom Analysing Interferometer for Ambient Air (ANITA) im Unity-Verbindungsknoten analysiert werden.

Start 8. August 2007 / Space Shuttle Endeavour (STS-118)	
ISS-Zeitraum	September 2007 bis August 2008
Unterbringung	Destiny-Modul und Node 1 Unity-Knoten
Experimentator	Dr. H. Mosebach; A. Honne; G. Tan
Einrichtung	Kayser-Threde GmbH; SINTEF
Bereich	Technologie
Partner	NASA
Deutsche Industrie	Kayser-Threde GmbH



ColAIS und Vessel-ID-System: Schiffsverkehr aus dem All sichern

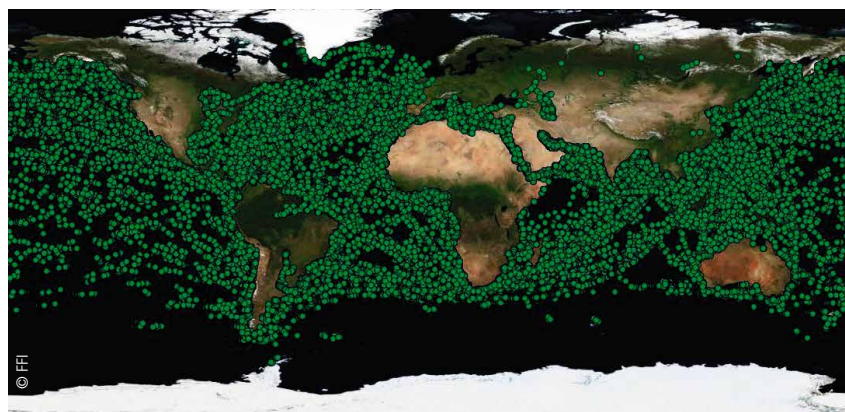
Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Die größten beweglichen Bauwerke der Menschheit sind Schiffe. Sie können große Gütermengen mit wenig Personal und geringem Aufwand befördern. Rund 45.000 Handelsschiffe sind derzeit auf den Ozeanen unterwegs und transportieren fast sieben Milliarden Tonnen Güter pro Jahr. Über 90 Prozent des gesamten Welthandels und nahezu 70 Prozent des deutschen Im- und Exports werden über See abgewickelt. Die Sicherheit dieser Flotte zu garantieren, trägt zur Sicherung des globalen Handels bei. Insbesondere auf hoher See bietet die Raumfahrt neue Möglichkeiten der Überwachung. Schiffe und deren genaue Positionen werden aus dem All erkannt und kartiert. Das Columbus Automatic Identification System (ColAIS) auf der ISS empfängt die Signale, die die Schiffe aussenden, ermittelt so deren Position und schickt die Daten wieder zurück zur Erde. Bis zur Inbetriebnahme von ColAIS wurde das Automatische Identifikationssystem (AIS) lediglich im Küstenbereich angewandt. Es soll nun zusammen mit anderen orbitalen Systemen erweitert werden und so die Reichweite vergrößern und den Empfang des Signaltyps außerhalb der Erdatmosphäre ermöglichen. So soll ColAIS unsere „Meeresautobahnen“ in Zukunft noch sicherer zu machen. Die Experimentanlage ist Teil des Vessel-ID-Systems, das während der Blue Dot-Mission des deutschen ESA-Astronauten Alexander Gerst auf der Raumstation den Betrieb fortsetzt.

Experimentbeschreibung:

ColAIS ist ein experimenteller ISS-Sensor, der die Schiffsbewegungen erfasst, indem er die AIS-Transponder-Signale empfängt, die die Boote aussenden. Diese Transponder sind für internationale Schiffe mit mehr als 300 Tonnen oder Frachtschiffe mit mehr als 500 Tonnen vorgeschrieben. Über das UKW-Signal können Schiffe über offene Meere verfolgt und über vier Monate kontinuierlich beobachtet werden. Die Transponder senden in regelmäßigen Abständen die Schiffsposition als Datenpaket auf zwei AIS-Kanälen. Wie oft sie senden, hängt von der Schiffsgeschwindigkeit und Kursstabilität ab. Alle drei Minuten setzen Schiffe vor Anker ihre Signale ab, fahrende Schiffe über 23 Knoten etwa alle zwei Sekunden. Über die ColAIS-UKW-Antenne werden die Signale auf der Raumstation an zwei Empfänger geleitet, die die Pakete für die Weiterverarbeitung im Computer entschlüsseln. Über die ISS-Kommunikation werden die Daten zum Boden übertragen und an die Endempfänger verteilt. Sie können auf einem Bildschirm als Symbol mit Positionsangabe und Richtungs- beziehungsweise Fahrtvektor angezeigt werden. Die Länge des Fahrtvektors ist geschwindigkeitsabhängig. Mit einem GPS-Empfänger kann der Kapitän und seine Mannschaft auf der Brücke am Bildschirm die eigene Schiffsposition verfolgen. Durch Überlagerung der Daten auf einer elektronischen Seekarte erhält die Schiffscrew alle navigationsrelevanten Informationen zur Schiffsführung.

ColAIS-Stichprobe vom 1. Juni 2010: Von 19:00 Uhr bis 9:00 Uhr sammelte der NORAIS-Receiver mehr als 90.000 AIS-Nachrichten der Klasse A.



Status:

Alle Systeme funktionieren nominal. ColAIS soll voraussichtlich bis zum Ende der ISS-Nutzungsphase in Betrieb bleiben.

Ergebnisse:

ColAIS ist noch in einer Validierungsphase. Die Funktionstüchtigkeit des Systems ist mittlerweile allerdings bewiesen. In vier Monaten wurden 30 Millionen einzelne Nachrichten von AIS-Transpondern auf mehr als 60.000 verschiedenen Schiffen aller Klassen und Größen empfangen.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Schweden, Norwegen aber auch die EU, die UN sowie internationale Schifffahrtsbehörden zeigen Interesse an ColAIS. Nach ausreichender Testphase auf der ISS könnte ein privates System zur weltweiten Überwachung des Schiffsverkehrs in naher Zukunft Wirklichkeit werden. AIS-Sender könnten als zugelassene persönliche Notfallsender benutzt werden. Von Schiffbrüchigen aktiviert, könnte der Sender eine Notfallnachricht sowie gleichzeitig per AIS die Position des eingebauten GPS-Empfängers aussenden. Mit mehreren Tagen Sendedauer könnte das Gerät die Rettung beschleunigen und so Leben retten. An der Bergung beteiligte Schiffe können die Person in Seenot auf ihrem Kartenplotter genau lokalisieren. Die AIS-Daten, die in die elektronische Seekarte einblendet werden, überlagern derzeit noch die eingetragenen Seezeichen des heutigen Identifikationsstandards. Zurzeit gibt es noch keine genormte Darstellung von AIS-Seezeichen. Weil diese Signale aber überall auf der Welt verfügbar sind, wären internationale Anstrengungen zur Standardisierung dieser Daten wünschenswert und ein wichtiger Schritt, um unsere „Meeresautobahnen“ in Zukunft noch sicherer zu machen. Da AIS in einem ähnlichen Wellenlängenbereich wie Mobiltelefone arbeitet, ist eine Weiterentwicklung moderner AIS-Empfänger notwendig.

Start

Zwei Empfänger: 10. September 2009 / HTV-1

Antenne: 16. November 2009 / Space Shuttle Atlantis (STS-129)

Computer-ERNObox: 14. Mai 2010 / Space Shuttle Atlantis (STS-132)

ISS-Zeitraum

seit Juni 2010

Unterbringung

Antenne: außen am Columbus-Modul
Computer-ERNObox: im Columbus-Modul
NORAIS-Empfänger: im Columbus-Modul
LUXAIS-Empfänger: im Columbus-Modul

Experimentator

FFI; Seatex; ESA; Airbus Defence & Space

Bereich

industrielle Nutzung, Telekommunikation

Partner

Norwegen; Airbus Defence & Space, Bremen

Deutsche Industrie

Airbus Defence & Space, Bremen

US-Astronaut Randolph Bresnik installierte am 21. November 2009 die AIS-Antenne an der Außenhülle des Columbus-Moduls.

E-Nose: Elektronische Spürnase auf der Raumstation

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Die mikrobielle Verunreinigung durch Pilze, Keime und Sporen sind für Crew und Hardware im Weltall eine große Gefahr. Auf der Internationalen Raumstation oder auf Langzeitmissionen werden die winzigen Lebewesen zu einem großen, sicherheitsrelevanten Problem. Die meisten Allergene werden über die Atemluft aufgenommen, welche zu Krankheitssymptomen wie Kopfschmerzen, Konzentrationsprobleme, tränende Augen, Lethargie, Entzündungen der Schleimhäute von Nase, Mund und Hals, Hautjucken sowie Ekzeme als Folgeerscheinungen führen können. Ein weiteres Problem ist die Einfuhr von Mikroorganismen von der Raumstation zurück zu unserem Heimatplaneten: Mikroorganismen, die sich auf ISS-Hardware angesiedelt haben, werden zurück zur Erde gebracht. Diese Passagiere können unter den besonderen Bedingungen des Weltalls wie Weltraumstrahlung mutiert sein – also ihr Erbgut dauerhaft verändert haben. Die Überwachung der Umgebungsbedingungen auf der ISS ist somit ein wichtiger Schritt und gleichzeitig eine große Herausforderung. Sie stellt hohe Ansprüche an die Messverfahren und ist technisch wie auch zeitlich sehr aufwendig. Hier soll die elektronische Spürnase „E-Nose“ einen wichtigen Beitrag leisten, die Kontamination rechtzeitig zu detektieren. Das Moskauer Institut für Biomedizinische Probleme (IBMP) konnte bisher bis zu 300 verschiedene Organismen über die aufwändige Wischmethode auf der russischen MIR-Station und der ISS bestimmen. Im Rahmen eines deutsch-russischen Experimentes soll die E-Nose seit Anfang 2012 im russischen Segment der ISS Pilze und Bakterien aufspüren.

Experimentbeschreibung:

Im Rahmen des Experimentes wurde mit der E-Nose an verschiedenen Stellen im Servicemodul der ISS die mikrobielle Belastung gemessen. Zusätzlich wurde ein sogenanntes Target-Book installiert. Dort sind verschiedene Materialproben wie Aluminium, der polymere Kunststoff Nomex, Platinen Material und Kabelmarkierung aufgetragen. Auf diesen Materialien sollten sich biologische Kulturen ansiedeln, die dann in einem Rhythmus von zwei Monaten vermessen wurden. Das Target-Book wurde nach der Experimentphase wieder zurück zur Erde gebracht und beim IBMP und Innovation Works (IW) in München ausgewertet. Die Daten zeigten, welche mikrobiellen Kulturen gezielt bestimmte Materialien „befallen“ und wie schnell sie sich auf diesen vermehren. Zur Verifizierung der Ergebnisse wurden diese Werte mit den Messergebnissen des klassischen russischen Messverfahrens – der sogenannten Wischprobe – verglichen.

Zehn unterschiedlich halbleitende Metalloxid-Sensoren spüren zuverlässig ein breites Spektrum an mikrobiellen Verunreinigungen auf. Dieses Messsystem nimmt dabei ein spezifisches Geruchsbild auf, indem es sich die oxidierende Eigenschaft der von den biologischen Kulturen freigesetzten Gasmoleküle (Microbial Volatile Organic Compounds – MVOC) zunutze macht. Diese MVOCs werden durch den Stoffwechsel der Kulturen gebildet und sind spezifisch für ihre Art. Jede Kultur regt also mit dem Freisetzen ihrer spezifischen Gasmoleküle die zehn verschiedenen Sensortypen unterschiedlich stark an. So lässt sich über ein Geruchstraining rasch ein olfaktorischer Fingerabdruck erstellen. Gasgemische werden an Hand ihres Mustern nach nur einem Trainingsschritt wiedererkannt. Bei Datenverbindung zur Bodenstation oder direkt zu einem Bordrechner können die Zellkulturen und somit auch die Situation auf der Raumstation zeitnah analysiert werden. Im Gegensatz zu den klassischen Methoden

der Probennahme (Wischprobe) mit anschließender Zucht in einem Brutschrank, die in der ISS nur mit Expertenwissen und zeitaufwendig durchzuführen ist, ermöglicht die E-Nose über eine Datenverbindung zur Bodenstation eine zeitnahe Analyse der Situation.

Status:

Die E-Nose wurde unter Laborbedingungen und im europäisch-russischen Isolationsexperiment Mars500 getestet. Nachdem die Einsatztauglichkeit auf der Erde bereits nachgewiesen wurde, startete die elektronische Spürnase am 19. Dezember 2012 mit einer russischen Sojus-Rakete zur Raumstation. Die Messungen wurden bis Mai 2013 an verschiedenen Stellen im russischen Service Modul der ISS (Arbeitsbereich, Schlafbereich und Toilette) durchgeführt. Im Anschluss wurden die Messdaten von deutschen und russischen Experten gemeinsam ausgewertet.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

In der Experimentphase soll die E-Nose ihre Einsatztauglichkeit unter Beweis stellen und ihre Messverfahren für den dauerhaften Einsatz auf der Internationalen Raumstation sowie für den Einsatz im Rahmen von Langzeitmissionen qualifizieren. Nachdem die E-Nose in einer ersten Experimentphase seine Einsatztauglichkeit erfolgreich gezeigt hat, wird zurzeit gemeinsam mit dem IBMP und Airbus an der Weiterführung des Experimentes gearbeitet (Messungen unzugänglichen Stelle mit einem Lance-Sampler). Darüber hinaus ist ein neues Experiment in Vorbereitung. Gemeinsam mit Wissenschaftlern vom Klinikum der Universität München soll die E-Nose im Bereich der Atemgasanalyse zum Einsatz kommen. Ziel ist es, Bio-Marker für zum Beispiel Stress oder Erkrankungen in der Atemluft zu „erschnüffeln“.

Partner:

Das vom DLR geförderte Vorhaben ist ein gemeinschaftliches Projekt welches von Airbus geführt wird. Wissenschaftlicher Partner ist das in Moskau ansässige Institut. Der Hersteller der elektronischen Nase ist die Firma AirSense Analytics aus Schwerin. Die wissenschaftlich-biologischen Themen werden von der Firma Innovation Works aus München bearbeitet.



Der russische Kosmonaut Roman Romanenko geht mit der E-Nose in der Raumstation auf mikrobielle Spurensuche.

Start
19. Dezember 2012 / Sojus TMA-07M

ISS-Zeitraum	Februar 2013 bis 2014
Unterbringung	Swesda-Modul
Experimentator	Joachim Lenic
Einrichtung	DLR Raumfahrtmanagement
Bereich	Sensorenentwicklung für Gasanalyse unter extremen Bedingungen
Partner	DLR; IBMP Moskau
Deutsche Industrie	Hardware: Airbus Defence & Space, Friedrichshafen; AirSense Analytics, Schwerin; Wissenschaft: Innovation Works, München; Zentrum für Umweltforschung und nachhaltige Technologien, Bremen

Seit dem 28. Februar 2013 hat die E-Nose die Spur von Mikroorganismen aufgenommen. Das Gerät misst elektronisch die mikrobielle Belastung über ein Gassensorsystem auf der Raumstation.

FIPEX: Orts- und zeitabhängige Messungen von atomarem Sauerstoff im niedrigen Erdorbit

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Können Werkstoffe im Erdorbit rosten? Wie beeinflusst atomarer Sauerstoff die Atmosphäre und die Auslegung von Satellitenmissionen? Warum widersprechen sich die Modelle der oberen Atmosphäre um circa 470 Prozent? Auf diese Fragen soll das Flux-(Phi)-Probe-Experiment (FIPEX) eine Antwort finden. Erstmals wurde eine zeitgenaue Langzeitmessung des atomaren Sauerstoffs im niedrigen Erdorbit bis circa 450 Kilometer durchgeführt. Hierbei wurde zwischen molekularem und atomarem Sauerstoff unterschieden. Modelle der höheren Atmosphäre wurden verglichen und die Wechselwirkungen an dem eigentlichen Ort der elektrochemischen Reaktion – der sogenannten Dreiphasengrenze – zwischen dem keramischen Elektrolyten und den Elektroden im Ultrahochvakuum untersucht.

Experimentbeschreibung:

Das FIPEX-Experiment besteht aus zwei Sensoreinheiten mit insgesamt zwölf Sensoren. Diese neuartigen, miniaturisierten Messeinheiten erfassen den Partialdruck des atomaren Sauerstoffs bis 10^{-10} Millibar aus der natürlichen Umgebung des niedrigen Erdorbits und unterscheiden dabei den molekularen Sauerstoff aus Reaktionen des Ladungsausgleichs – sogenannten Rekombinationsreaktionen – und Ausgasungen aus den druckbeaufschlagten Modulen der Raumstation. Die Sensoren haben eine Betriebstemperatur von circa 650° Grad Celsius und entsprechen damit den besonderen Anforderungen an das Experimentssystem. Basierend auf ersten Konzepten der Universität Stuttgart wurden neben den Sensoren auch die Struktur und die Elektronik zur Steuerung, zur Daten- und Kommandoverarbeitung sowie zur Kommunikation mit der Außenplattform European Technology Exposure Facility (EuTEF) des Columbus-Moduls komplett an der TU Dresden entwickelt, nach den Standards der European Cooperation for Space Standardization (ECSS) weltraumqualifiziert und während der Mission gesteuert. Neben den wissenschaftlichen Zielen konnten damit auch Studenten praxisnah ausgebildet werden. Was ist faszinierender, als online mit einem Experiment auf der Raumstation von einer Universität aus zu kommunizieren?

Status:

Nachdem FIPEX und die Außenplattform EuTEF durch die Astronauten Rex Walheim und Stanley Love erfolgreich von der Nutzlastbucht des Space Shuttle Atlantis (STS-122) zum Columbus-Modul transportiert und befestigt wurde, konnte FIPEX im Februar 2008 eingeschaltet werden. Das Experiment befand sich bis September 2009 572 Tage lang an Bord der ISS und wurde mit dem Shuttle Discovery (STS-128) wieder zurücktransportiert. Die Hardware befindet sich zur Auswertung der wissenschaftlichen Daten und zur Ausbildung von Studenten an der Universität Dresden.

Ergebnisse:

Im niedrigen Erdorbit absorbiert der molekulare Sauerstoff die Sonnenenergie und wird dadurch in atomaren Sauerstoff gespalten, der sich dadurch in oberen Atmosphärenschichten anreichert. Die Wechselwirkung der Solarstrahlung mit der Erdatmosphäre spielt dabei eine wesentliche Rolle. Die zeitgenaue Messung der tatsächlich vorliegenden atomaren Sauerstoffkonzentration hilft uns dabei, die allgemeinen Klimamodelle auf der Erde besser zu verstehen.

Auch beim Satellitenbau helfen die FIPEX-Daten: Die extreme chemische Reaktionsfreudigkeit des atomaren Sauerstoffs ist für eine Vielzahl von Oberflächenprozessen und damit für eine Zersetzung der Materialien verantwortlich. Kennen wir die zeitabhängige Konzentration des atomaren Sauerstoffs im Orbit, können Strukturbauteile zukünftig den Bedingungen angepasst und so die Lebensdauer der Satelliten erhöht werden.

FIPEX lieferte die ersten zeitaufgelösten Messungen zur Korrelation der Atmosphärenmodelle. Auch die ersten Ergebnisse sind publiziert. Weitere Missionen mit den vielversprechenden Sensoren sind nun notwendig, um die sehr starke zeitabhängige Variation des atomaren Sauerstoffs zu vermessen und den Einfluss auf die Atmosphärenzusammensetzung besser zu verstehen.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

FIPEX eröffnet auch für die Erde neue Anwendungsfelder – insbesondere aufgrund der guten Sensor- beziehungsweise Systemeigenschaften, der kostengünstigen und reproduzierbaren Fertigung, der hohen Empfindlichkeit bei geringen Gasanteilen sowie der gleichzeitigen Messung von Gasanteilen und Gesamtmassenströmen. Die Möglichkeit, dynamische Vorgänge durch geringe Ansprechzeiten zu untersuchen, ist insbesondere für die Medizintechnik interessant. Die Messung verschiedener Gase kann zu einem Einsatz in der Umwelttechnik (Messung von Schadstoffen mit Prozesssteuerung zu deren Minimierung), in der Vakuumtechnik und in der Allgemeinen Mess- und Regeltechnik (zum Beispiel gassensitive Durchflussregler) führen.



FIPEX an der Außenplattform EuTEF des europäischen Columbus-Moduls

Start 7. Februar 2008 / Space Shuttle Atlantis (STS-122)	
ISS-Zeitraum	Februar 2008 bis Oktober 2009
Unterbringung	EuTEF-Plattform am Columbus-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Stefanos Fasoulas; Dr. Tino Schmiel
Einrichtung	TU Dresden
Bereich	Sensorenentwicklung für Gasanalyse unter extremen Bedingungen
Partner	ESA; DLR; NASA
Deutsche Industrie	Verschiedene Spin-off-Partner für das Atemgasanalyzesystem RSS (Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Stickoxide, etc.)

Rost ist auf der Erde ein ernstes Problem für Fahrzeuge aller Art. Doch können Materialien auch im Weltraum rosten? Dieser spannenden Frage geht das FIPEX-Experiment nach.



Kosmonaut Vladimir Dezhurov installiert das Global Time System (GTS) im Swesda-Modul der Raumstation.

GTS-2: Exakte Ortszeit weltweit verfügbar?

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Nicht alle Uhren auf der Erde gehen exakt gleich. Das könnte das Global Transmission Services (GTS-2)-Experiment nun ändern: Durch dieses System können Uhren und Armbanduhren überall auf der Erde von der ISS aus synchronisiert werden. Rüstet man diese Datendienste mit einem bestimmten Codierungssystem aus, so könnten sie auch kommerziell eingesetzt werden: Gestohlene Fahrzeuge könnten blockiert und verlorene Kreditkarten gesperrt werden. Das Experiment soll zeigen, ob sich bei Diebstahl die Position dieser entwendeten Geräte genau bestimmen lässt. Zusätzlich können mit Hilfe der Telemetriedaten Objekte, wie zum Beispiel Container oder Waggons, überwacht werden.

Experimentbeschreibung:

GTS testet und demonstriert Rundfunkübertragungstechniken mit hochgenauem Zeitsignal, jeweils korrigierter Ortszeit weltweit sowie global nutzbaren digitalen Signalen für unterschiedliche Dienstleister. Der GTS-Sender an Bord der ISS sendet periodisch die Zeitsignale aus. Durch die Rotation der Erde und die hohe Bahnneigung der Raumstation wird im Verlauf des Fluges mehrmals innerhalb eines Tages ein Bodenbereich von etwa plus-minus 70 Breitengraden abgedeckt. Die Armbanduhren am Boden können durch die besondere Form der Signalabstrahlung die richtige Uhrzeit ermitteln. Durch eine spezielle Codierung der Empfängerchips kann die Echtheit der Daten überprüft und beispielsweise im Fall eines Autodiebstahls sogar die Elektronik eines Fahrzeugs blockiert werden. So lassen sich Daten fast fälschungssicher übertragen. Das GTS-System sendet für die verschiedenen Zeitzonen jeweils die korrigierte Lokalzeit mit Sommer/Winter-Informationen aus, so dass die Uhren auf der Erde automatisch die richtige Zeit anzeigen. Jeder Empfänger am Boden hat eine eigene Identifikation (ID), durch die gezielt Informationen an einen einzelnen Benutzer gesendet werden können.

Status:

Das System ist funktionsfähig und dienstbereit. GTS-2 setzt das GTS-Experiment mit einer verbesserten Elektronikeinheit, die 2005 mit Progress-Raumschiff zur ISS gebracht wurde, fort. GTS-2 hat die Empfangsleistung wesentlich verbessert. Seit dem 5. Dezember 2005 wurde es erfolgreich betrieben. Durch die stabile Zeitreferenz konnte außerdem gezeigt werden, dass sich durch GTS eine präzise Orbitbestimmung durchführen lässt, die mit den kurzen Kontaktzeiten eines Satelliten im niederen Orbit arbeiten kann. Diese Orbitbestimmung soll im Rahmen einer deutsch-russischen Zusammenarbeit mit dem Keldysh Institute of Mathematics zu einem Navigationssystem für Planetenlander entwickelt werden.

Ergebnisse:

Die Funktionstüchtigkeit des verbesserten GTS-2-Systems wurde seit 2005 bis heute erprobt und verifiziert. Zeitübertragungen wurden dabei ebenso demonstriert, wie die

kryptographische Übertragung von Nutzdaten. Da die interne Referenz eine Kurzzeitstabilität von 1×10^{-13} im 1.000 Sekunden Bereich hat, konnten erfolgreich Orbitdaten der ISS vom Boden aus bestimmt werden. Die neu entwickelten Modulationsverfahren können auch in einem nicht-kohärenten Modus betrieben werden, der immun gegen Dopplerdrift ist. Daher kann das Verfahren um Systeme mit Rückkanal erweitert werden, die einen koordinierungsfreien Mehrfachzugang mit einer großen Anzahl von terrestrischen Transpondern erlauben, die gleichzeitig erfasst werden können. Das GTS-Zeitsignal kann grundsätzlich kommerziell zum Einsatz kommen, wurde aber bisher noch nicht umgesetzt. Die Verhandlungen in dieser Angelegenheit werden fortgeführt.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

GTS soll in Zukunft kommerzielle Datenpakete weltweit an beliebige mobile Miniaturempfänger und -transponder verteilen. Anwendungen liegen in folgenden Bereichen: globale Funkuhrsynchronisation, Personenrufdienste (Paging), Datenübertragungen zu Smartcards, Diebstahlsicherungen für Autos und Mobiltelefone, etc., Autorückruf und -notruf, Fernsteuerung, Container-Verfolgung und Flotten-Management. Die Miniaturisierung der Empfänger kann auch kleinere Gegenstände wie Uhren, Funktelefone, elektronische Fahrzeugschlüssel und Chipkarten vor Diebstahl schützen.

Das TZR hat einen neuartigen, voll digitalen Empfänger für den Empfang des Zeitsignals entwickelt, der sich jedoch auch für die anderen Anwendungsgebiete einsetzen lässt. Nach Abschluss der Experimentierphase kann der Prototyp direkt in einen Mehrzweck-Mikrochip umgewandelt werden, der alle oben genannten Funktion verwirklichen soll. Durch diese generischen Eigenschaften, die auf den jeweiligen Anwendungsfall eingestellt werden, lässt sich eine hohe Stückzahl und damit ein attraktiver Stückpreis erzielen. Die Möglichkeit, eine große Anzahl von Transpondern gleichzeitig abzufragen, bietet die Möglichkeit, durch die Telemetrie von zum Beispiel Eisenbahnwaggons Vorhersagen über den Streckenzustand oder die Abnutzung der Achsen zu treffen und so eine optimierte Planung für Reparatur oder Lieferzeiten zu erstellen.

Start
GTS: 21. März 2002 / Progress 7P
GTS-2: 8. September 2005 / Progress 19P

ISS-Zeitraum	GTS: seit März 2002 GTS-2: seit 5. Dezember 2005
Unterbringung	innen und außen am Swesda-Modul
Experimentator	Prof. Dr.-Ing. Felix Huber
Einrichtung	Steinbeis Transfer-Zentrum Raumfahrt (TZR)
Bereich	Telemetrie und globaler Funk-Service
Partner	ESA; DLR

Schutz vor Langfingern: Durch eine spezielle Codierung der Empfängerchips kann im Fall eines Autodiebstahls dank GTS sogar die Elektronik eines Fahrzeugs blockiert und der Standort des gestohlenen Fahrzeugs bestimmt werden.



Der DLR-Roboterarm ROKVISS ist mit vier Anschlüssen ausgestattet – jeweils ein Port für Videodaten, Strom, Datenverbindung und Heizung. Für den Transport wurden die Astronauten angewiesen, die Kabel einfach abzuschneiden – im Sinne einer unkomplizierten Demontage an Bord der ISS.

ROKVISS: Erster deutscher Roboter im Weltraum

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Mit der ersten Bewegung eines deutschen Roboters im All begann für die deutsche Weltraum-Robotik am 22. März 2005 ein neues Kapitel. Das vom DLR-Institut für Robotik und Mechatronik entwickelte, innovative Robotik-Komponenten-Verifikation auf der ISS (ROKVISS)-Experiment hatte seine Arbeit auf der ISS aufgenommen. Das Technologie-Experiment hat die intelligenten und mit etlichen Sensoren ausgestatteten Robotergelenkeinheiten bis zu ihrer Demontage im Oktober 2011 unter realen Weltraumbedingungen erprobt und deren Technologiereife nachgewiesen. Dabei wurden auch leistungsfähige Fernsteuerungskonzepte vom autonomen bis hin zum haptisch-visuellen Telepräsenzbetrieb getestet, die in zukünftigen bemannten oder unbemannten Missionen genutzt werden sollen. Weiterentwicklungen der Robotik-Bauteile könnten zukünftig auf einem Satelliten oder einem Fahrzeug befestigt werden und Astronauten auf dem Mond oder dem Mars beim Sammeln von Gestein und anderen Arbeiten unterstützen.

Experimentbeschreibung:

Das Robotik-System besteht aus einem Arm mit zwei Gelenken, einem „Metallfinger“ an der Spitze des Arms und einer speziellen Experimentkontur, die für dynamische Bewegungsexperimente sowie zur Bestimmung der Gelenkeigenschaften des Roboters dient. In den Kopf des Roboterarms wurden eine Stereo-Videokamera und eine Mono-Kamera integriert. Die Stereo-Videokamera erfasste den Zustand im Nahbereich des Experimentmoduls sowie der ISS. Die Mono-Kamera war für Aufnahmen der Erde ausgelegt. Diese Elemente waren zusammen mit den Elektronikboxen für die Stromverteilung und Bildverarbeitung auf einer Basisplattform montiert. Robotergelenke und Kameras wurden von einem Bordrechner innerhalb des russischen Servicemoduls Swesda angesteuert, der Kontakt zum Boden über eine S-Band Antenne herstellt. Im interaktiven, haptisch-visuellen Telepräsenzbetrieb wurden die Bewegungen des Roboterarms direkt vom Boden aus kontrolliert und gesteuert. Hierbei wurden die Bilder der Stereokamera, die Kontaktkräfte des Roboters mit seiner Umgebung und die Gelenkpositionen erfasst und vom Bordrechner über eine direkte Funkverbindung



ROKVISS im All, aufgenommen während eines Außenbord-einsatzes am 12. März 2007.

an die Bodenstation übertragen. Die Kräfte wurden der Bodenstation über einen Joystick mit Kraftrückmeldung vermittelt, während das Stereo-Videobild zeitgleich auf einem Monitor angezeigt wurde. Zum ersten Mal weltweit wurde ein Roboterarm im Weltraum haptisch-visuell per direkter Funkverbindung vom Boden ferngesteuert. Gesteuert und überwacht wurde das Flugsystem dabei über die Sende- und Empfangsstation des DLR-Raumfahrtkontrollzentrums in Weilheim.

Status:

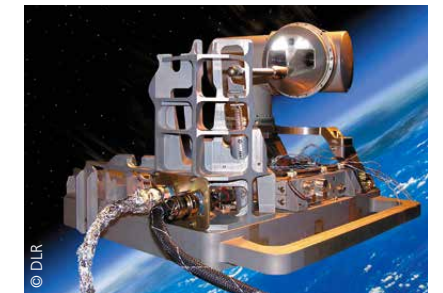
Aufgrund des Erfolgs wurde der Missionsbetrieb des ROKVISS-Experiments bis 2011 verlängert und im Oktober auf der ISS demontiert und zerlegt. Nur die Robotergelenke sind im Gepäck eines Sojus-Raumschiffs aus dem All zur Analyse ins Labor zurückgekehrt.

Ergebnisse:

Die Auswertung der Missionsdaten hat bestätigt, dass die entwickelten Bauteile und Methoden bestens für den Einsatz im Weltraum geeignet sind. Während der Betriebszeit zeigte ROKVISS, dass Hardware und Software geeignet sind, um intelligente und leichtgewichtige Robotik-Komponenten in realistischen Umgebungsbedingungen zu ermitteln und zu qualifizieren. Die Technologie rund um den per Joystick mit Kraftrückmeldung steuerbaren Roboterarm hat ihre Funktionstüchtigkeit in mehr als 500 Probeeinsätzen auf der ISS bewiesen. Erstmals wurde dabei ein Roboter im All ohne größere Zeitverzögerung von der Erde aus ferngesteuert – ein Novum in der Weltraumrobotik. ROKVISS hat den Einsatz an der Außenwand der ISS ohne Beeinträchtigung gemeistert. Das Robotersystem läuft wie am ersten Tag – kein Klappern, keine Fremdgeräusche aus dem Getriebe, die Gelenke bewegen sich absolut geschmeidig, als ob ROKVISS das Labor nie verlassen hätte.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Mit dem ROKVISS-Experiment wurde ein neuer komplexer Roboter für den Einsatz im freien Weltraum entwickelt. Künftige Reparatur- und Service-Missionen profitieren nun von dem zuverlässigen System. Das gilt nicht zuletzt für die deutsche Orbital-Servicing-Mission DEOS, die für 2015 geplant ist und defekte Satelliten mittels eines Roboterarms einfangen und kontrolliert entsorgen soll. Auch den humanoiden Roboter „Justin“ können die Wissenschaftler mit den Erkenntnissen aus ROKVISS für den Einsatz im Weltraum vorbereiten.



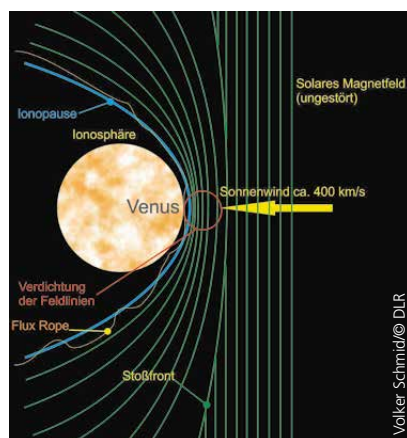
Künstlerische Darstellung von ROKVISS im Weltraum



Der DLR-Roboterarm ROKVISS ist nach sechs Jahren Einsatz im Weltraum wieder zurück auf der Erde. Die aktuellen Eingangstests beim DLR-Institut für Robotik und Mechatronik in Oberpfaffenhofen haben ergeben, dass die Funktionstüchtigkeit des Systems dem eines neuen Gerätes entspricht.

Start
23. Dezember 2004 / Progress 16P

ISS-Zeitraum	Januar 2005 bis Oktober 2011
Unterbringung	außen am Swesda-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Gerhard Hirzinger; Dipl.-Ing. Klaus Landzettl
Einrichtung	DLR-Institut für Robotik und Mechatronik, Oberpfaffenhofen
Bereich	Raumfahrtrobotik, Telerobotik, Mechatronik
Partner	DLR; Roskosmos; RKK-Energia
Deutsche Industrie	Airbus Defence & Space Bremen; Kayser-Threde GmbH München; von Hoerner & Sulger (vH&S) GmbH



Die Ionosphäre der Venus im Sonnenwind



EvilBlink/DLR



© Airbus Defence & Space

An der Zukunft schrauben: In Science-Fiction-Filmen schirmt ein Magnetschutzschild Captain Kirk & Co. auf der Enterprise von den rasenden Teilchen ab. Bisher ist ein solches Schutzschild aber noch Zukunftsmusik. Ein variabler elektrischer Leiter in dem deutschen MagVector/MFX-Experiment soll den Weg in die Zukunft ebnen. Alexander Gerst wird während seiner Zeit auf der ISS dieses deutsche Experiment im Columbus-Modul installieren und in Betrieb nehmen. Im Labor in Bremen wird noch fleißig an der Hardware gebastelt.



MagVector/MFX: Ein Stück „Raumschiff Enterprise“ an Bord der ISS

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Die Magnetfelder der Erde und zahlreicher anderer Planeten des Sonnensystems werden durch einen Dynamo im Inneren der Himmelskörper angetrieben – einem metallischen Kern der von mehreren rotierenden Mantelschichten umgeben ist. Im tiefsten Inneren entsteht ein Feld, das unsere Erde vor dem permanenten Beschuss durch hochenergetische Teilchen – dem sogenannten Sonnenwind – schützt. Doch es gibt auch Planeten, die nicht selbstständig ein solches Magnetfeld erzeugen können. Unsere Nachbarplaneten Venus und Mars verhilft das interplanetare Magnetfeld, das im Sonnensystem außerhalb des direkten Einflusses der Planeten existiert, indirekt zu einem Schutz: Dieses bewegte interplanetare Magnetfeld reagiert mit den durch UV-Strahlung elektrisch aufgeladenen Atomen in der Hochatmosphäre (Ionosphäre) der beiden Planeten. Die Ionosphären verändern dabei den Ladungszustand ihres Planeten so stark, dass er von einem schlechten elektrischen Leiter zu einem sehr guten Leiter wird. Bisher lassen sich solche Wechselwirkungen nur durch Satellitenmissionen untersuchen. Doch ist der Orbiter einmal gestartet, dann lassen sich die voreingestellten Messprogramme nicht mehr verändern. Forscher können also von der Erde aus nicht mehr eingreifen und die Messparameter den Umgebungsbedingungen anpassen. Auf der ISS ist das ganz anders. Hier herrschen ideale Bedingungen für ein revolutionäres Experiment: Ein variabler elektrischer Leiter des DLR-Experiments MagVector/MFX im European Drawer Rack (EDR) des Columbus-Labors kann den Umgebungsbedingungen einfach angepasst werden. Zudem durchfliegt die ISS mit einer Orbitalgeschwindigkeit von rund 7,5 Kilometern pro Sekunde ständig das Erdmagnetfeld – eine einzigartige Laborumgebung, um an einem effektiven Magnetschutzschild zu forschen. Bislang müssen Raumsonden oder Astronauten in einem Raumschiff durch aufwendige Spezialverkleidungen vor dem „Dauerfeuer“ des Sonnenwindes geschützt werden. In Science-Fiction-Filmen schirmt ein solches Magnetschutzschild Captain Kirk & Co. auf der Enterprise von den rasenden Sonnenteilchen ab. Das ist noch Zukunftsmusik. Doch wenn sich durch MagVector/MFX zum Beispiel folgende Fragen beantworten lassen, könnte man einem solchen Schild schon einen ganzen Schritt näher kommen: Wie interagieren die Ionosphären – vergleichbar mit unterschiedlich guten elektrischen Leitern – mit dem solaren Magnetfeld? Wann bildet sich eine künstliche Magnetosphäre? Was passiert mit dem Magnetfeld im Planeteninneren in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit? Wie lassen sich Magnetfelder von Sonne und anderen Himmelskörpern für Raumfahrtanwendungen nutzen?

Experimentbeschreibung:

Mit MFX wird die Wechselwirkung zwischen dem Erdmagnetfeld und einem variablen elektrischen Leiter, der sich mit hoher Geschwindigkeit durch dieses Feld bewegt, untersucht. Die elektrische Leitfähigkeit der Probe, die sich innerhalb einer kühnbaren Vakuumkammer befindet, ist variabel. Somit können verschiedene Zustände simuliert werden. Dabei messen Forscher erstmalig die Veränderung in der Magnetfeldstruktur des Leiters: Ein Magnetfeld um einen Leiter herum entwickelt sich nicht gleichmäßig: Wie bei dem Feld unserer Erde staut es sich vor dem Leiter auf und dünnt sich hinter ihm wieder aus. Der Nachweis dieses magnetischen Staueffekts und der Ausdünnung – analog zur Strömungsmechanik – wird zum ersten Mal bei unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeiten und Umgebungsvariablen gemessen. Weiterhin wird die tatsächliche örtliche und zeitliche Größe des Erdmagnetfelds ermittelt, um einen Ver-

gleich zu erhalten. MFX stößt so das Tor zur experimentellen Astrophysik auf. Erkenntnisse zur Wechselwirkung zwischen dem interplanetaren Magnetfeld und den verschiedensten Körpern im Sonnensystem, beruhen dadurch nicht mehr nur auf passiver Beobachtung, sondern können an Bord der ISS nachgestellt werden. Der deutsche ESA-Astronaut Alexander Gerst wird dieses Experiment während der Blue Dot-Mission in das europäische Welt-raumlabor Columbus einbauen und in Betrieb nehmen. Damit wäre ein weiteres Ziel von MagVector/MFX erreicht: ein solches komplexes Experiment innerhalb von nur zwei Jahren zu entwickeln und auf der Raumstation in Betrieb zu nehmen.

Status:

MagVector/MFX wurde nach einer erfolgreichen, einjährigen Machbarkeitsuntersuchung im Jahr 2013 entwickelt und gebaut. Die Testphase fand im März und April 2014 statt. Die Ablieferung der Flughardware ist für Mai 2014 geplant. Die MagVector/MFX-Hardware soll mit dem europäischen Weltraumtransporter ATV-5 im Sommer zur ISS starten. Der Betrieb ist nach einer Testphase August und September 2014 bis mindestens Ende 2015 geplant. Bei optimalen Voraussetzungen kann der Betrieb bis Ende 2016 verlängert werden.

Ergebnisse:

Offen. Der Fast-Track-Ansatz ist aber bereits erfüllt: Das Projekt wurde innerhalb der Kosten in nur 16 Monaten fertiggestellt und ausgeliefert.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

MagVector/MFX gewährt uns einen neuen, einmaligen Blick auf das Zusammenspiel von elektrischen Leitern und Magnetfeldern bei hoher Geschwindigkeit. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen Potenziale für eine Vielzahl neuartiger luft- und raumfahrttechnischer Anwendungen erwarten: So könnte MagVector/MFX zur Entwicklung von Magnetschutzschilden gegen geladene, hochenergetische Partikel beitragen, die für astronautische Missionen im Sonnensystem unerlässlich sind. Weiterhin sollen die Ergebnisse Aufschluss darüber geben, ob elektrodynamische Hitzeschilder für Raumfahrzeuge, wie sie seit Beginn des letzten Jahrzehnts untersucht werden, noch effizienter und leistungsfähiger gemacht werden können. Zukünftige Raumsonden, die auf Planeten mit einer Atmosphäre landen sollen, könnten dadurch leichter gebaut werden, da sie keinen klassischen Hitzeschutz mehr benötigen. Der Einsatz von Magnetfeldern während des Eintritts in eine Atmosphäre lässt weiterhin eine Verbesserung des Funkverkehrs während des Black Outs zu – wie dies in zahlreichen klassischen Lehrbüchern bereits beschrieben aber in der Raumfahrt praktisch noch nie umgesetzt worden ist. Die bisher durchgeführten MagVector/MFX-Untersuchungen hinsichtlich Kryotechnik, Supraleitern, dynamische Belastbarkeit und so weiter haben bereits zu neuen Entwicklungsaktivitäten bei Airbus geführt, mit denen luftfahrttechnische Herausforderungen gemeistert werden könnten. Die Entwicklung von Kryo-Energiespeichern für die Elektromobilität könnte von dem Experiment ebenso profitieren. So könnte MagVector/MFX e-Mobility sogar im Luftverkehr ermöglichen.

Start
Sommer 2014 / ATV-5 Georges Lemaître (geplant)

ISS-Zeitraum	Sommer 2014 bis Ende 2015
Unterbringung	European Drawer Rack (EDR) im Columbus-Modul
Experimentator	Volker Schmid; Detlef Konigorski; Dr. Frank Werfel
Einrichtung	DLR Raumfahrtmanagement; Airbus Defence & Space, Bremen; ATZ-GmbH
Bereich	Astrophysik, Innovation und Technologieerprobung, Fast-Track Experiment
Partner	AIM; Meyer-Elektronik; ESA

Einblick ins Herzstück der MagVector/MFX-Hardware: Im Bild sind die Vakuumpumpe und der variable elektrische Leiter zu sehen.



Der niederländische ESA-Astronaut André Kuipers hat während seiner „PromISse“-Mission sehr viele, schöne Aufnahmen mit der NightPod-Kameratechnik geschossen.



NightPod: Kamerasystem lässt Städte scharf in der Nacht leuchten

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Die Internationale Raumstation zieht mit einer Geschwindigkeit von circa 28.000 Stundenkilometern ihre Bahnen um die Erde. Bei Nacht gestochen scharfe Bilder von unserem Heimatplaneten zu schießen, ist dabei für die Crew keine leichte Aufgabe. Die notwendigen hohen Belichtungszeiten führten bislang zu einem „Verwischen“ der Bilder, wie es jeder Hobbyfotograf kennt. Um dieses Problem zu lösen, beauftragte die ESA direkt die kleine niederländische Firma Cosine Science & Computing BV. Doch auch aus Deutschland kommen wesentliche Beiträge zu Entwicklung und Bau des sogenannten „NightPod“: Die in Berlin ansässige KMU Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH hilft den Astronauten dabei, die Erde auch bei Nacht klar und scharf festzuhalten. Sie entwickelte nicht nur die Mechanik des NightPod. Auch die Schnittstelle zur Raumstation sowie ausgewählte Tests lagen in den Händen der Konstrukteure und Ingenieure. Eine besondere Herausforderung bei Projekten für die bemannte Raumfahrt sind dabei die besonders hohen Sicherheitsanforderungen, um Verletzungen der Astronauten zu vermeiden.

Experimentbeschreibung:

Der NightPod ist im Prinzip ein motorisiertes Stativ (Tripod = Dreibein), das in der der ISS-Aussichtsplattform Cupola untergebracht ist. Der Astronaut gibt die Koordinaten des Motivs, das er mit der Kamera einfangen will, ein. Außerdem gibt er an, in welcher Höhe die ISS diesen Punkt überfliegen wird. Danach ist der NightPod in der Lage, die Flugbahn der ISS automatisch auszugleichen und die Kamera und das Objektiv so auszurichten, dass das anvisierte Motiv stets im Zentrum bleibt. Das Einstellen des Systems ist für die Astronauten ein Kinderspiel: In nur etwa 15 bis 20 Minuten ist der NightPod für gestochen scharfe Nachtaufnahmen der Erde bereit. Schwierig dabei ist nicht die Technik sondern das vorhandene Streulicht in der Station. Mit schwarzen Tüchern müssen die Astronauten dafür sorgen, dass kein Licht aus dem Inneren der Raumstation in die Cupola gelangen kann. Da sie durch Fenster fotografieren, müssen sie auch Reflexionen vermeiden.

Eine spezielle Kamera ist für die Nachtaufnahmen nicht notwendig. Grundsätzlich kann jeder Vollformat-Apparat dafür genutzt werden – aktuell eine Nikon 3DS. Eine Belichtungszeit von 1/4 Sekunde bei ISO 3200 hat sich als ideale Einstellung für die Nachtaufnahmen bewährt. Außerdem wählen die Astronauten stets die größtmögliche Blende. Das lichtstarke 85-Millimeter-Objektiv ist hierfür besonders geeignet, hat allerdings den Nachteil, dass die Brennweite einen etwa 160 Kilometer breiten Abschnitt der Erde abdeckt. Eine Metropole, so groß wie London, füllt dabei nicht einmal ein Viertel des Fotos. Hier können sich die Astronauten nur helfen, indem sie digital ins Bild hineinzoomen – leider zu Lasten der Bildqualität.

Status:

Der niederländische ESA-Astronaut André Kuipers hat während seiner PromISse-Mission im Jahr 2012 erstmals den NightPod installiert, in Betrieb genommen und erste Bilder von Städten bei Nacht aufgenommen. Alle Astronauten werden für den Umgang mit dem NightPod trainiert. Auch Alexander Gerst wird bei seiner kommenden Blue Dot-Mission neue Fotos von der Erde schießen. Die ESA plant bereits einen NightPod 2. Er soll drei automatische Achsen haben, sich einfacher einstellen lassen und eventuell auch vom Boden aus gesteuert werden. Eine konkrete Roadmap dafür gibt es zurzeit aber noch nicht.

Ergebnisse:

Auf der Internetseite der ESA (www.esa.int) kann man sich Bilder, die die Astronauten während ihrer Missionen geschossen haben, ansehen.

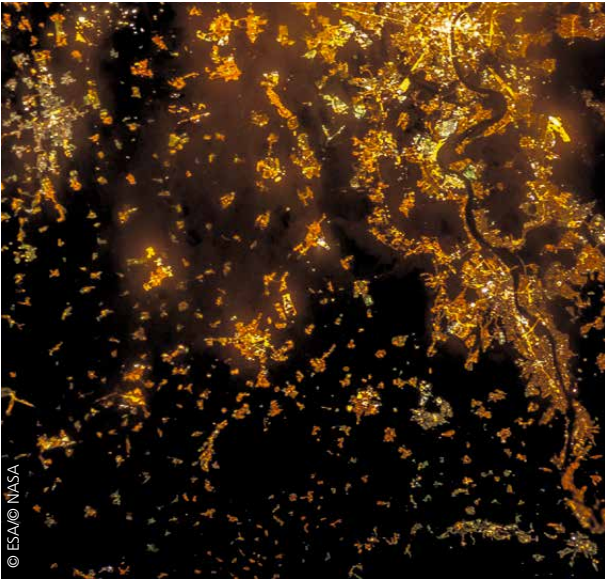
Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Der NightPod ist eine wichtige Einrichtung für die Besatzung der ISS. Neben interessanten Aufnahmen von Städten können die Wissenschaftler bei Tag auch die Luftverschmutzung und spannende Naturphänomene wie zum Beispiel Vulkanausbrüche oder Polarlichter beobachten und erforschen. Darüber hinaus ist die Kamera neben dem ausgefüllten Arbeitsalltag auch eine beliebte Freizeitbeschäftigung der Astronauten.

Start 21. Dezember 2011 / Sojus TMA-03	
ISS-Zeitraum	September 2011 bis September 2014
Unterbringung	Cupola-Modul
Experimentator	Massimo Sabbatini
Einrichtung	ESA ESTEC; Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH
Bereich	Erdbeobachtung
Partner	ESA



Nacht über Berlin: Auf der NightPod-Aufnahme kann man sogar noch den ehemaligen Grenzverlauf des bis zum 3. Oktober 1990 geteilten Berlins sehen. Die gelbscheinende Stadtbeleuchtung gehört zum westlichen Teil und die grünschimmernde zum östlichen – ehemaligen DDR-Teil – von Berlin.



Rheinische Metropole aus 400 Kilometer Höhe: Die Stadt Köln strahlt hell erleuchtet am nordwestlichen Bildrand. Folgt man dem Rhein nach Süden, zeichnet sich die ehemalige Bundeshauptstadt Bonn als leuchtender „Schlauch“ um den dunklen Fluss herum ab. Ganz links oben ist die Stadt Aachen in der Nähe der deutsch-holländischen Grenze zu erkennen.



Kommerzielle Forschung – Know-how-Transfer vom Weltraum zur Erde

Mit der Internationalen Raumstation ISS stehen auch Unternehmen stabile Forschungsbedingungen und ausreichende Experimentierzeiten im Weltraum zur Verfügung. Durch ihre großen Ressourcen und den regelmäßigen Zugang ist sie für innovative Projekte aus dem industriellen Umfeld interessant und kann einen wirtschaftlich attraktiven Wertzuwachs bieten. Die Raumstation mit ihrem europäischen Columbus-Weltraumlabor ist eine Großforschungseinrichtung im Erdorbit, die auch die Nicht-Raumfahrt-Industrie nutzen kann. Langfristig sollen bis zu einem Drittel der europäischen Forschungsressourcen auf der ISS industriellen und kommerziellen Nutzern zur Verfügung gestellt werden. Neben den wissenschaftlichen Spitzenleistungen in den Material- und Lebenswissenschaften, sind es gerade die industriell relevanten Projekte der ISS-Forschung, die den Menschen auf der Erde nutzen sollen. Beispiele hierfür sind die Entwicklung besserer Legierungen für die Automobilbranche, die Medikamentenentwicklung der Pharmaindustrie, die Verbesserung von Knochenimplantaten und medizinischen Diagnosetechniken oder die Verbrennungsforschung für sparsamere Motoren. Auch der deutsche ESA-Astronaut Alexander Gerst wird zwei deutsche Experimente mit kommerzieller Ausrichtung auf der ISS durchführen. Zum einen wird er im SPACETEX-Experiment zum ersten Mal Kleidung unter physiologischen Gesichtspunkten im Weltraum testen und so Unternehmen dabei helfen, neue textile Produkte für den Einsatz unter extrem anstrengenden Bedingungen auf der Erde zu entwickeln. Zum anderen führt Alexander Gerst das WiSe-Net-Experiment durch, bei dem über kabellose WLAN-Sensoren wichtige Daten wie Temperatur, Lichtstärke, Vibrationen, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck im Columbus-Modul gesammelt werden. Aus diesen Energiequellen kann man kleine Strommengen für mobile Geräte mit geringer Leistung gewinnen.

Ziel der kommerziellen ISS-Forschung ist die Gewinnung von Kunden, auch und gerade aus dem Bereich von kleinen und mittleren Unternehmen, die von der Nutzung der Schwerelosigkeit profitieren und Verfahren oder Produkte entwickeln, die wirtschaftlich einen zeitnahen Return of Investment erbringen. Auch die deutsche Wirtschaft erkennt, dass Forschung in astronautischen Weltraumlaboren letztlich eine lohnende Investition in die Zukunft sein kann. Klar ist aber, dass die ISS weder kurz- noch mittelfristig eine „verlängerte Werkbank im All“ sein wird. Die Versuche in der Schwerelosigkeit sollen den Unternehmen helfen, Erfahrungen im All zu sammeln und diese bei Fertigungstechniken und Produktionen auf der Erde in großem Maßstab umzusetzen. So entsteht ein Know-how-Transfer vom Weltraum zur Erde.



Das deutsche WiSeNet-Experiment, das Alexander Gerst auf der Raumstation durchführt, sammelt über kabellose WLAN-Sensoren wichtige Daten wie Temperatur, Lichtstärke, Vibrationen, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck im Columbus-Modul. Aus diesen Energiequellen kann man kleine Strommengen für mobile Geräte mit geringer Leistung gewinnen.



WiSe-Net: Sensordaten drahtlos übertragen

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

In vielen terrestrischen Anwendungen erfassen kleinste Sensoren spezielle Messwerte. Sehr verbreitet sind beispielsweise Beschleunigungs- und Drehratensensoren in Autos aber auch in Smartphones. So bestimmen die Sensoren in Mobiltelefonen die räumliche Lage, um den Bildschirm zum Betrachter hin auszurichten. Die verwendeten Sensoren basieren auf der sogenannten Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)-Technologie, die eine Miniaturisierung auf Mikro-Millimeter Größe erlaubt. Klassische verteilte Messsysteme sind in der Regel kabelgebundene Systeme. Je nach Größe oder auch räumlicher Ausdehnung entsteht ein nicht zu vernachlässigender Aufwand beim Aufbau. Zudem sind sie meist für Veränderungen in der Struktur unflexibel. Abhilfe bringt hier eine drahtlose Übertragung der Messdaten zum Beispiel über Funk. Für Systeme mit vergleichbar geringem Datenaufkommen eignet sich der sogenannte ZigBee-Standard, der auf einem genormten Protokoll aufsetzt. In der Kombination von MEMS, extrem stromsparenden Mikroprozessoren und der Funkübertragung lassen sich sehr einfache Messsysteme aufbauen und individuell an die jeweiligen, sich möglicherweise ändernden, Umgebungen anpassen. Trotz der sehr energiesparenden Technologie bleibt aber die Frage nach der Energieversorgung. Die genannten Vorteile gingen verloren, wenn erneut Kabel zum Einsatz kämen. Bei der Versorgung nur über Batterien entstände durch das regelmäßige Wechseln ein erhöhter Aufwand beim Betrieb, der sich deutlich reduzieren ließe, wenn die in der Umgebung des Sensors vorhandene Energie genutzt werden könnte. Unter dem Begriff „Energieernten“ („Energy Harvesting“) werden eine Reihe vielversprechende Ansätze erforscht, wobei die Nutzung von (Sonnen-) Licht der bekannteste ist. Mit WiSe-Net (WirelessSensor-NETwork) als Demonstrator sollen in einer ersten Phase diese neuen Technologien für Raumfahrtanwendungen erprobt werden.

Experimentbeschreibung:

Der WiSe-Net Technologie-Demonstrator besteht aus vier Messeinheiten, die im Columbus-Modul verteilt angebracht werden. Es können jeweils eine Reihe von Messdaten wie etwa Umgebungstemperatur, Luftdruck, Luftfeuchte, Beschleunigung und Lichtstärke in der Umgebung des Sensors erfasst werden. Die Daten werden an eine Basis-Station per Funk übertragen. Neben den Sensordaten wird auch eine Statistik über die Qualität des Funknetzes erstellt. In regelmäßigen Abständen werden Datenpakete zusammengestellt und über die ISS-Kommunikation zum Boden übertragen. Während der geplanten operationellen Phase von sechs Wochen werden sämtliche Daten archiviert und regelmäßig analysiert. Darüber hinaus ist auch eine zeitnahe Beobachtung von WiSe-Net Daten im Support Center möglich.

Status:

Die Abnahme des Technologie-Demonstrators ist erfolgreich abgeschlossen und das Flugmodell wird für den Transport zur ISS an Bord des europäischen Weltraumtransporters ATV-5 vorbereitet.

Ergebnisse:

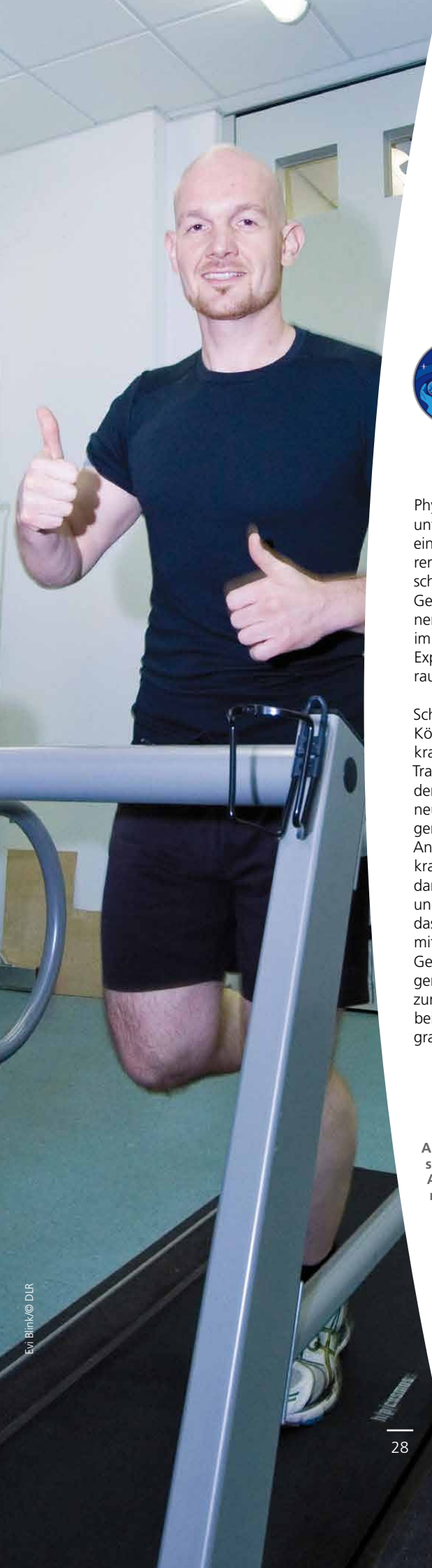
Von den Betriebsdaten kann eine Aussage über die Robustheit des Systems abgeleitet werden wie etwa die Übertragungsqualität der Funkverbindung, Ausfallraten von Sensorik und andere Kennwerte werden hierzu ausgewertet. Ein weiterer Aspekt ist die Analyse der Sensordaten selbst. Diese sollen Anzeichen für mögliche Quellen zur Energiegewinnung im Sensorumfeld liefern.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Anwendungen für Sensorik in räumlich verteilten Systemen, die einerseits weitgehend unabhängig von ihrer Energieversorgung sind, lassen sich in verschiedenen terrestrischen Bereichen als auch in der Raumfahrt finden. Oft ist neben einem etablierten Messsystem ein weiteres unabhängiges gefordert. Dies kann etwa unterstützend zum nominellen Betrieb der ISS notwendig sein, als auch zusätzlich Betriebsdaten während eines Raketenstarts ermitteln. Netzwerke wie WiSe-Net bieten hierfür eine Vielzahl von möglichen Sensoren und lassen sich gleichzeitig flexibel auf die Rahmenbedingungen anpassen. Mit der Weiterentwicklung ist auch eine Miniaturisierung zu erwarten. Ein noch geringer Energiebedarf bei gleichzeitiger Nutzung der Energien aus der Umgebung wird die Betriebszeiten spürbar verlängern können.

Start
Sommer 2014 / ATV-5 Georges Lemaître (geplant)

ISS-Zeitraum	Sommer 2014 – bei Erfolg weitere Messungen in 2015 geplant
Unterbringung	Columbus-Modul
Experimentator	Hans Jörg Beestermöller
Einrichtung	Airbus Defence & Space, Friedrichshafen
Bereich	industrielle Nutzung, Technologie-Demonstration
Partner	ESA



SPACETEX: Neue Funktionstextilien steigern Tragekomfort

Physische Anstrengung treibt auch den Astronauten auf der Raumstation den Schweiß unter die Achseln. Aufgrund der fehlenden Schwerkraft kann der Schweiß nur sehr eingeschränkt durch Konvektion verdunsten. Lässt sich eine Kleidung für Raumfahrer finden, die sich angenehmen tragen lässt und nicht die Bewegungsfreiheit einschränkt? Um diese Frage zu beantworten, wird der deutsche Astronaut Alexander Gerst im SPACETEX-Experiment spezielle Kleidung tragen, die von den Forschungspartnern Hohenstein Institute, Schoeller Textil AG, Charité Berlin und dem DLR gemeinsam im Rahmen der Initiative GoSpace für industrielle ISS-Nutzung entwickelt wurde. Das Experiment testet innovative und hoch-funktionale Textilien für Menschen im Welt- raum und auf der Erde.

Schwerkraft ist die treibende Kraft für den konvektiven Wärmeaustausch, der an der Körperoberfläche entlang der Körperachse stattfindet. Schaltet man die Schwerkraft aus, ändert sich der thermale Komfort des Menschen – besonders während des Trainings auf der Raumstation, das zum Pflichtprogramm der Astronauten gehört, um dem Leistungsabbau im kardiovaskulären System entgegenzuwirken. Zusätzlich zeigen neueste Studien, dass die Körperkerntemperatur bereits während kurzer Anstrengungen zum Beispiel auf Ergometern über 39° Grad Celsius hochschnellt. Dieser plötzliche Anstieg der Körperkerntemperatur lässt die Astronauten schwitzen. Dank der Schwerkraft auf der Erde verdunstet der Schweiß unter Einfluss konvektiver Kräfte und kühlt damit den Körper. Dies ist eine wichtige Basis für das Wohlbefinden, die Gesundheit und die Sicherheit für Mensch und Astronaut. Studien auf der Erde haben gezeigt, dass hohe Umwelttemperaturen und hohe Feuchtigkeit – besonders in Kombination mit intensiver physischer Arbeit und hohem Flüssigkeitsverlust durch Schwitzen – mit Gesundheitsrisiken verbunden sind: Der Wärmestau führt zu einem schnellen Ansteigen der Körperkerntemperatur und somit zu weniger Komfortgefühl bishin zu Verletzungen wie zum Beispiel Hitzeschlag. Dieser Kreislauf wird für Astronauten nicht nur beim Sport auf der ISS sondern auch während ihrer Außenbordeinsätze unter Mikro-gravitation beschleunigt.

Auch Astronauten auf der Raumstation schwitzen bei körperlichen Anstrengungen. Alexander Gerst testet deswegen während seiner Mission auch zum ersten Mal Kleidung unter physiologischen Gesichtspunkten im Weltraum. Das SPACETEX-Experiment wird dabei helfen, neue textile Produkte für den Einsatz unter extrem anstrengenden Bedingungen auf der Erde zu entwickeln.

Experimentbeschreibung:

SPACETEX soll unser Grundwissen über den Wärmeaustausch des Körpers unter extremen Umweltbedingungen erweitern und das allgemeine Wohlbefinden der Astronauten durch neue Textilien erhöhen. Zusätzlich soll die mikrobielle Verunreinigung auf der Raumstation durch neue Textilien verringert werden. Alexander Gerst steht SPACETEX vor, während und nach der Mission zur Verfügung. In jeder Phase werden jeweils vier Trainingssessions zum Beispiel auf dem Ergometer mit den zu tragenden Textilien durchgeführt und jeweils ein Fragebogen dazu ausgefüllt. Die Kleidung wird nach dem Training zusammen mit einem Geruchsmessgerät verpackt und zur Analyse ins Hohenstein Labor zurückgeschickt. Hier werden die Textilien auf mikrobiellen Befall und Geruchsentwicklung untersucht.

Status:

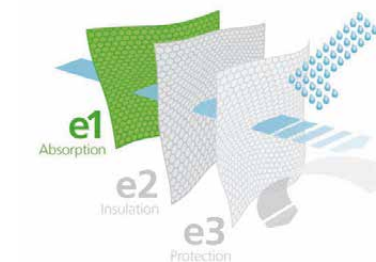
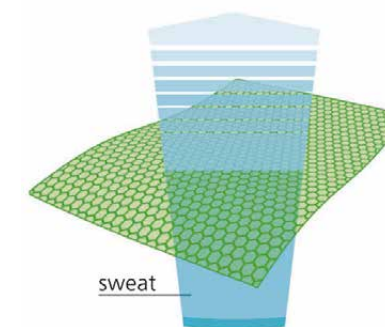
Das Experiment wird mit ATV-5 voraussichtlich im Sommer 2014 zur ISS starten.

Ergebnisse:

Offen.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

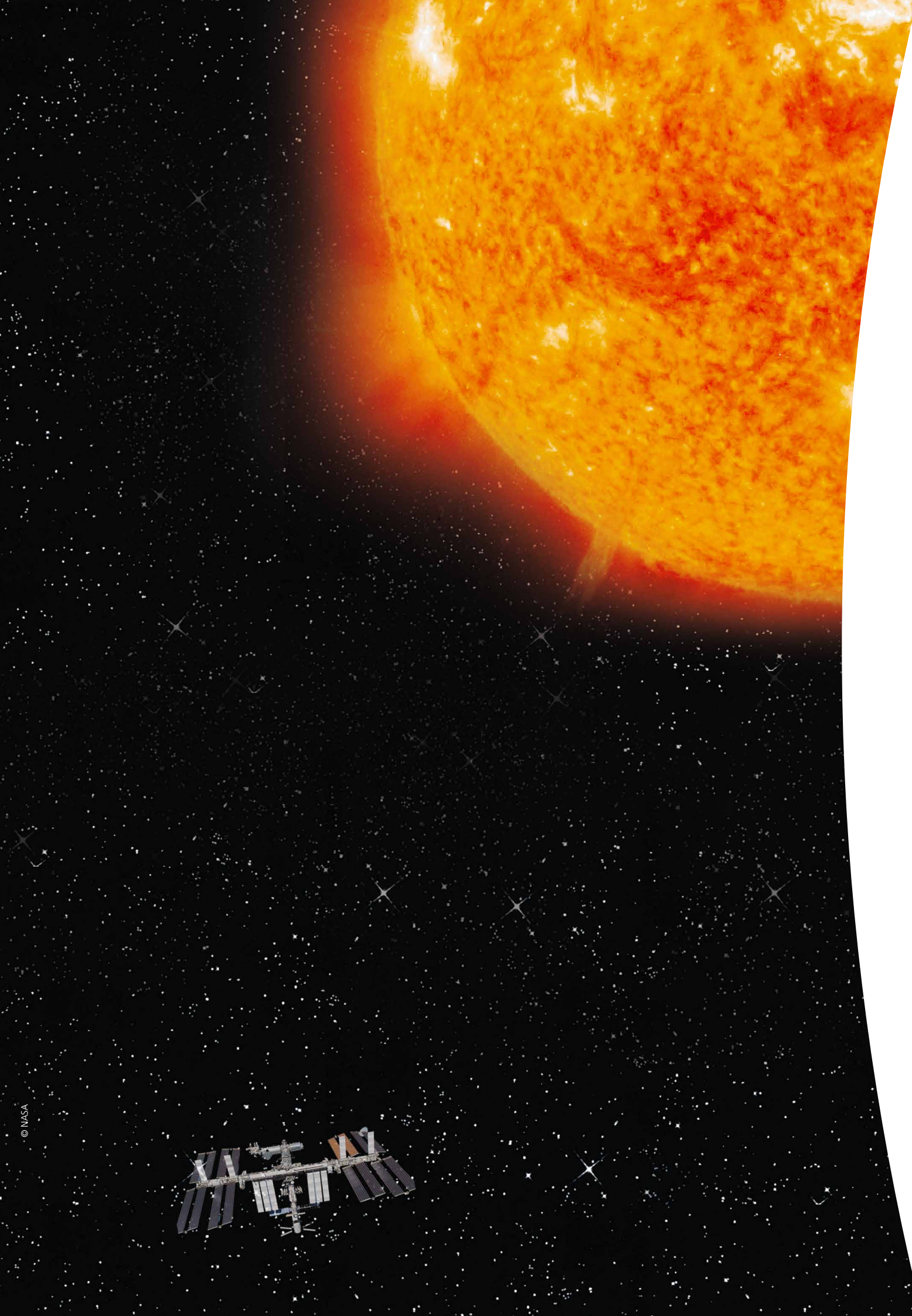
Eine qualitative Phase 2 des Experimentes soll folgen. Hier werden die „Schwitzphasen“ durch das Hohenstein Hautmodell simuliert und unter Schwerelosigkeit – voraussichtlich während eines Parabelfluges – die physikalischen Parameter bestimmt.



Wie eine zweite Haut: Die e1-Textilien absorbieren den Schweiß und transportieren ihn nach außen, ohne die Haut auszutrocknen. So sorgen sie für körperliches Wohlbefinden durch Hautfreundlichkeit, Hygiene und Bewegungsfreiheit. Das Textil ist eine ein- oder mehrlagige Strickkonstruktion, bei der gesponnene und textuierte Garne verwendet werden. Durch diesen Einsatz verschiedener Fäden wird Feuchtigkeit von der ersten Schicht an die Außenschicht geleitet, wo sie verdunsten kann.

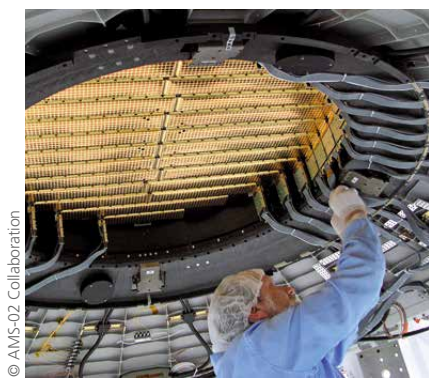
Start Sommer 2014 / ATV-5 Georges Lemaître (geplant)

ISS-Zeitraum	Sommer 2014
Unterbringung	gesamte ISS
Experimentator	Dipl.-Ing. Claudia Philpot; Dr. Jan Beringer; Dr. Hübner; Prof. Dr. Hanns-Christian Gunga
Einrichtung	DLR Raumfahrtmanagement, Bonn; DLR-Institut für Raumfahrtsysteme, Bremen; Hohenstein Institute für Textilinnovation gGmbH; Schoeller Technologies AG; Charité Berlin
Bereich	Funktionstextilien, industrielle Nutzung
Partner	ESA



Astronomie und Astrophysik – Tiefe Einblicke ins Universum

Die Experimente in dieser Disziplin sind fast ausschließlich Grundlagenforschung – öffnen uns aber tiefe Einblicke in unser Universum und fremde Galaxien, erzählen uns Geschichten über deren Entstehung und ihren Untergang. Nicht nur die Strahlung von Sternen, Galaxien und anderen Himmelsobjekten vermittelt uns Informationen über das Universum, sondern auch energiereiche Teilchen, die die Erde erreichen. Da sie aber mit Teilchen der Erdatmosphäre zusammenstoßen, ist es notwendig, einen Detektor außerhalb der Atmosphäre zu platzieren, um ihre ursprüngliche Zusammensetzung bestimmen zu können. Das ist die Aufgabe des „Alpha Magnetic Spectrometer“ (AMS-02), das im Mai 2011 auf der Internationalen Raumstation ISS angebracht wurde und seitdem kontinuierlich Daten sammelt. Kernstück des komplexen Aufbaus ist ein starker Magnet, der geladene Teilchen aus ihrer Bahn ablenkt. Er wird durch verschiedene Detektoren, mit denen sich Masse, Ladung und Energie der Teilchen bestimmen lassen, ergänzt. Anhand dieser Eigenschaften ist es möglich, die Teilchen zu identifizieren. Ein weiterer Faktor ist das Messen der Sonneneinstrahlung, die auf die Erde trifft. Die Strahlung der Sonne im Bereich der weichen Röntgenstrahlung, des extremen Ultraviolett (EUV) und des Ultraviolett (UV) sind die Hauptenergiequelle für das System der Thermosphäre und Ionosphäre (T/I-System) der Erde. Diese Schichten der Atmosphäre befinden sich in Höhen oberhalb von etwa 85 Kilometern über der Erdoberfläche und spielen bei der Wechselwirkung der Erde mit ihrer interplanetaren Umgebung – insbesondere der Sonne (solar-terrestrische Beziehungen) – eine wichtige Rolle. Die Ergebnisse sollen zur Erforschung über das irdische Klimasystem und zur Unterscheidung zwischen anthropogenem Einfluss und natürlicher Variation beitragen, was immer wieder kontroverse Diskussionen in der Klimaforschung hervorruft.



Ein Techniker prüft den Silizium-Spuren-detektor.



AMS-02: Ein magnetischer Detektor geht auf Teilchenjagd

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Der Alpha Magnetic Spectrometer (AMS)-02 ist Dunkler Materie und damit auch unserer Existenz auf der Spur. Wie der Name schon sagt, Dunkle Materie ist dunkel: Sie sendet keine Strahlung aus, die man mit Hilfe von Teleskopen sehen könnte. Ihre Existenz wird durch astronomische Beobachtungen nahegelegt, die ausschließlich auf der Wirkung ihrer Schwerkraft beruhen. Außerdem wird ihr eine wichtige Rolle bei der Strukturbildung im Universum zugeschrieben. Ohne ihre Schwerkraft hätten sich Galaxien, Sterne und Planeten – und damit auch das irdische Leben – nicht entwickeln können. Woraus besteht aber diese Dunkle Materie? Eine Antwort kann die Teilchenphysik liefern. Im Rahmen von Erweiterungen des Standardmodells der fundamentalen Kräfte wird die Existenz neuer Elementarteilchen gefordert, auf die auch die Eigenschaften der Dunklen Materie zutreffen. Besonders vielversprechende Kandidaten sind sogenannte Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) – massebehaftete, schwach wechselwirkende Teilchen. Zwar lassen sie sich wegen der schwachen Wechselwirkung und ihrer fehlenden Ladung auch mit AMS nicht direkt nachweisen, doch misst das Spektrometer Zerfallsprodukte wie Positronen. Sie entstehen, wenn WIMPs miteinander kollidieren. AMS dient den Forschern hierbei als eine Art Elementarteilchen-Kamera, welche die kosmische Strahlung über einen weiten Energiebereich hinweg mit 2.000 Bildern pro Sekunde und einer Auflösung von 200.000 Pixeln „aufnimmt“. Die verschiedenen Bestandteile der kosmischen Strahlung zeugen von hochenergetischen Ereignissen in unserem Universum: auf der Sonne, in Supernova-Explosionen, in Pulsaren und in aktiven Galaxienkernen, in denen sich Schwarze Löcher verbergen. Darunter den Fingerabdruck der Dunklen Materie zu finden, erfordert sehr gezieltes Suchen.

Experimentbeschreibung:

AMS-02 ist außen an der Gitterstruktur der Internationalen Raumstation montiert. Kernstück des Aufbaus ist ein 1.200 Kilogramm schwerer Neodym-Permanentmagnet mit circa 0,14 Tesla. Im Magnetfeld befinden sich mehrere Ebenen eines Silizium-Streifendetektors mit einer aktiven Fläche von 6,5 Quadratmetern. Damit wird der Durchgang von geladenen Teilchen auf acht Ebenen mit einer Einzelpunktauflösung von zehn Mikrometern vermessen. Die Flugbahnen von geladenen Teilchen werden in dem Magnetfeld dieses Magnetspektrometers gekrümmt. Anhand der Krümmung können der Impuls der geladenen Teilchen und das Ladungsvorzeichen bis zu Teilchenenergien von 1.000 Giga-Elektronenvolt bestimmt werden. Die Stabilität des Spurdetektors wird mit Hilfe eines Laseralignment-Systems mit einer Präzision von fünf Mikrometern überwacht. Seitlich ist der Spurdetektor vom Teilchenzähler umgeben, der den seitlichen Durchgang der geladenen Teilchen überwacht. Um die Masse der geladenen Teilchen zu bestimmen, wird das Experiment nach oben durch einen Übergangsstrah-

lungs-Detektor und nach unten durch einen Ring-Image-Tscherenkov-Zähler sowie ein elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL) komplettiert. Um die Flugzeiten und damit die Geschwindigkeiten der Teilchen zu messen und die Ausleseelektronik der anderen Detektorkomponenten auszulösen, befinden sich ober- und unterhalb des Siliziumspurdetektors ein Flugzeit-Massenspektrometer. Die von dem Experiment erzeugte Energie wird zur Kühlung mit Radiatoren in den Weltraum abgestrahlt.

Status:

AMS-02 hat seinen Betrieb im Mai 2011 aufgenommen. Seit dieser Zeit werden ständig Daten erfasst. Der zehntägige Precursorflug des AMS-Experimentes (AMS-01) während der Space Shuttle STS-91 Mission 1998 zeigte die technologische Machbarkeit und führte erste wissenschaftlich erfolgreiche Messungen durch.

Ergebnisse:

Im April 2013 wurden die ersten wissenschaftlichen Ergebnisse veröffentlicht, die auf 25 Milliarden registrierten Teilchen in den ersten 18 Monaten der Mission beruhen – darunter 6,8 Millionen Elektronen und Positronen. Der Anteil der Positronen bis zu einer Energie von 350 Giga-Elektronenvolt zeigt den erwarteten Überschuss mit bisher unerreichter Präzision. AMS muss aber noch weitere Daten bei höheren Energien sammeln, damit entschieden werden kann, ob das Spektrum durch Kollisionen von Dunkle-Materie-Teilchen oder durch Pulsare in der Milchstraße verursacht wird.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

AMS-02 wird uns helfen, ein besseres Verständnis der Kosmologie, Teilchenphysik und der hochenergetischen Prozesse in unserer Milchstraße und im Universum zu erlangen. Aber auch interplanetare Missionen profitieren von der Mission. Die Kenntnis der hochenergetischen Teilchenstrahlung ist die Basis für Maßnahmen, zum Beispiel Abschirmungen, um bemannte Raumfahrt jenseits des Erdborits zu ermöglichen.



Das Alpha-Magnet-Spektrometer (AMS-02) sitzt an der Außenseite der Internationalen Raumstation ISS. Das vom DLR geförderte Projekt zeichnet jährlich 16 Milliarden Teilchen der kosmischen Strahlung auf.



Am 16. Mai 2011 transportierte das Space Shuttle Endeavour das Alpha-Magnet-Spektrometer AMS-02 zur ISS. Dort wurde die Teilchenkamera an der Außenseite installiert, um mit ihren Detektoren die kosmische Strahlung zu erfassen.

Start
16. Mai 2011 / Space Shuttle Endeavour (STS-134)

ISS-Zeitraum	Mai 2011
Unterbringung	Truss-Gitterelement S3
Experimentator	Prof. Dr. Stefan Schael; Prof. Dr. Wim de Boer
Einrichtung	RWTH Aachen; Karlsruher Institut für Technologie
Bereich	Astrophysik
Partner	500 Physiker aus 56 Forschungsinstituten aus 16 Ländern; NASA



SolACES: Unsere Sonne im Visier

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Die Sonnenenergie ist nicht immer konstant und hat daher einen schwankenden Einfluss auf das System Erde. Das Experiment SOLAR Auto-Calibrating EUV/UV Spectrophotometers (SolACES) nimmt von der ISS aus die Sonne ins Visier, um mehr über deren Einfluss herauszufinden. Die Sonnenaktivität unterliegt unter anderem einem circa elfjährigen Zyklus. In diesem Zeitraum durchläuft die Anzahl der Sonnenflecken ein Minimum gefolgt von einem Maximum. Auch wenn diese Zyklen bereits ausgiebig studiert wurden, sind dennoch zahlreiche Fragen weiterhin offen. Dazu zählt unter anderem der Einfluss der Sonnenaktivität auf die Thermo- und Ionosphäre der Erde. Letzterer entsteht durch die Absorption des kurzwelligen Sonnenlichts, der extrem ultravioletten (EUV-) Strahlung, in der Thermosphäre. Hierbei bilden sich Elektronen-Ionen-Paare. Die Rekombination dieser elektrischen Ladungen führt über Zwischenprozesse zur Erwärmung der Thermosphäre weit über 1.000 Kelvin – rund 730 Grad Celsius. Das macht die solare EUV-Strahlung zum wichtigsten Energieträger des Systems Thermo-/Ionosphäre. Doch diese Energiequelle unterliegt starken zeitlichen Schwankungen – wie zum Beispiel auch die Sonnenwinde. Gemeinsam bestimmen beide Energieträger das sogenannte Weltraumwetter und haben somit großen Einfluss auf die direkte interplanetare Umgebung unseres Planeten. Es ist daher sehr wichtig, den Einfluss der Sonne zu einem bestimmten Zeitpunkt zu kennen, um diese Störungen korrigieren zu können. An diesem Punkt setzt SolACES an.

Experimentbeschreibung:

Von der ISS aus misst das Experiment die Strahlung der Sonne im Bereich der ultravioletten (UV-) und der EUV-Strahlung in einem Wellenlängenbereich von 16 bis 220 Nanometern. Messungen früherer Satelliten wiesen durch eine fehlende Autokalibration eine Unsicherheit der absoluten Strahlungsflüsse von bis zu 400 Prozent auf. Die Ungenauigkeiten von SolACES liegen dagegen bei deutlich weniger als zehn Prozent. Die für die hohe Genauigkeit notwendige Autokalibration ermöglicht es, die über die Zeit sinkende Qualität des Spektrophotometers und seiner Komponenten zu berücksichtigen. Als Bestandteil des wissenschaftlichen Instrumentenpakets SOLAR ist SolACES im sogenannten Coarse Pointing Device (CPD) auf der externen Columbus-Plattform (External Payload Facility, EPF) untergebracht, das eine Ausrichtung und Nachführung auf die Sonne ermöglicht. SolACES besteht aus zwei Doppel-Spektrophotometern mit insgesamt vier Beugungsgittern und Elektronenvervielfachern als Detektoren sowie zwei Ionisati-

onskammern mit Photodioden, um die einfallende EUV/UV-Strahlung nachzuweisen und eine In-Flight-Kalibration durchführen zu können. Pro Orbit lassen sich ein oder zwei EUV/UV-Spektrenaufnahmen. Infolge der ISS-Flugbahn entstehen ungefähr 14-tägige Beobachtungsphasen und ebenso lange Beobachtungspausen.

Status:

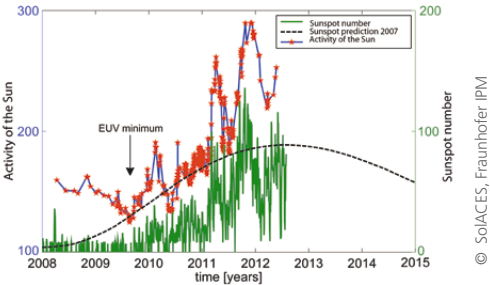
Seit Oktober 2008 befindet sich SolACES im regulären Messbetrieb. Die vorgesehene Betriebsdauer von 18 Monaten ist inzwischen bis Ende 2013 verlängert worden. Über eine weitere Verlängerung bis Februar 2017, die es erlauben würde, den vollständigen Anstieg der Sonnenaktivität vom solaren Minimum 2009 bis zum erwarteten Maximum zu verfolgen, wird bereits diskutiert. Die Verunreinigung der EUV-Optik während verschiedenen Triebwerksaktivitäten an der ISS verschlechtert die Messsignale. Sie lässt sich durch Ausheizen des Instruments während der kalten Beobachtungspausen (jeweils rund 14 Tage) weitgehend wieder rückgängig machen. So ist der weitere Routinebetrieb von SolACES sichergestellt.

Ergebnisse:

Seit Oktober 2008 liefert SolACES kontinuierlich absolut kalibrierte Spektren der integrierten solaren EUV/UV-Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen etwa 16 und 150 Nanometern und stellt damit der Forschung einen in seiner radiometrischen Genauigkeit bisher unübertroffenen Datensatz zur Verfügung. An dem Ausfüllen der bestehenden Beobachtungspausen arbeitet die SolACES-Gruppe gemeinsam mit der Universität Boulder (USA) zusammen. Während des ungewöhnlich langen solaren Minimums in den Jahren 2008 und 2009, mit den niedrigsten Werten im September und Oktober 2009, ergab sich die Gelegenheit, diese Phase der Sonnenaktivität genau zu untersuchen.

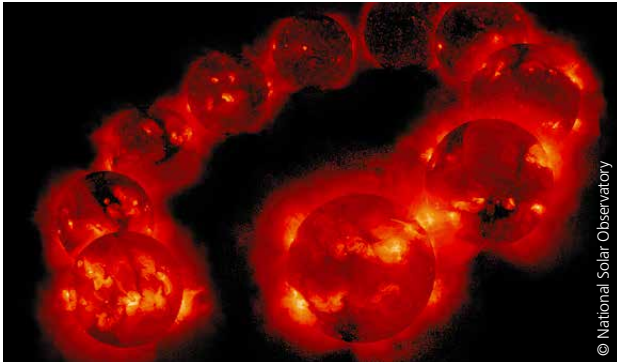
Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Die von den solaren EUV-Photonen transportierte Energie wird in der oberen Atmosphäre vollständig absorbiert, heizt sie auf und bildet zugleich die Ionosphäre. Die absorbierte Energie beeinflusst damit die Flugbahnen der Satelliten und der Internationalen Raumstation, die Elektronendichten in der oberen Atmosphäre und damit die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen von Navigationssystemen wie der GPS- und Galileo-Signale. Rückwirkungen auf das Weltraumwetter und der mögliche Zusammenhang zwischen niedriger Sonnenaktivität und einer klimatischen Abkühlung der Atmosphäre sollen genauer untersucht werden.



Die Aktivität der Sonne unterliegt einem circa elfjährigen Zyklus. In diesem Zeitraum durchläuft zum Beispiel die Anzahl der Sonnenflecken ein Minimum gefolgt von einem Maximum. Zwischen der Anzahl der Sonnenflecken und der Sonnenaktivität besteht ein Zusammenhang: Verringert sich die Anzahl der Sonnenflecken, geht auch die Sonnenaktivität zurück. Steigt die Anzahl der Flecken, nimmt sie zu. Die Sonnenaktivität ist seit Ende 2010 deutlich gestiegen und liegt derzeit über den Vorhersagen.

Das Instrument SolACES ist an der Außenhülle des europäischen Columbus-Moduls der Internationalen Raumstation ISS angebracht.



Zyklus der Sonnenaktivität

Start

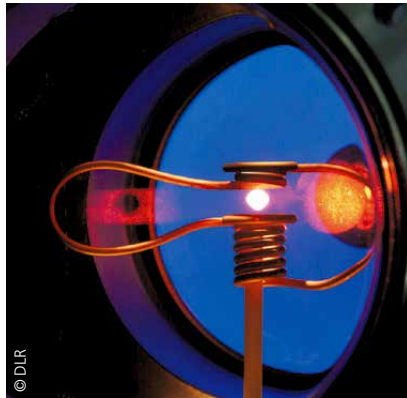
7. Februar 2008 / Space Shuttle Atlantis (STS-122)

ISS-Zeitraum	seit 2008
Unterbringung	außen am Columbus-Modul
Experimentator	Dr. Raimund Brunner; Dr. Gerhard Schmidtke
Einrichtung	Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik (IPM), Freiburg
Bereich	Sonnenphysik, Physik der Iono- und Thermosphäre
Partner	ESA; IPM



Materialwissenschaften – Schmelzen in Schwerelosigkeit

Ein gezieltes Materialdesign von Werkstoffen, die aus der Schmelze hergestellt werden, fordert stets die materialwissenschaftliche Forschung heraus. Um energie- und schadstoffarme Prozesstechnologien weiter zu verbessern, müssen sowohl Experimentserien als auch Computermodellierungen durchgeführt werden. Im Programm Forschung unter Weltraumbedingungen werden gravitationsabhängige Phänomene in Schmelzen untersucht, die bei der Erstarrung metallischer und halbleitender Legierungen auftreten. Denn nur in Schwerelosigkeit lassen sich bestimmte Störkräfte durch Konvektion und Sedimentation ausschalten. Bestimmte Messverfahren für thermophysikalische Eigenschaften von Schmelzen profitieren ebenfalls von der Weltraumforschung. Bisher sind auf der Raumstation mehrere Erstarrungsexperimente in der eigens dafür entwickelten Material Sciences Lab (MSL)-Anlage der ESA durchgeführt worden. Kurz vor dem Start zur ISS steht der Elektromagnetische Levitator (EML) – ein DLR-ESA-Kooperationsprojekt. EML ist ein innovativer Ofen für behälterfreies Schmelzen metallischer Legierungsproben, der anwendungsorientierte Forschung auf der ISS möglich macht.



In der Schwerelosigkeit werden Legierungen zukünftig behälterfrei mit der EML-Anlage geschmolzen. Eine elektromagnetische Spule hält die Probe in der Schwebe. Der deutsche Astronaut Alexander Gerst trainiert am EAC in Köln, wie die EML-Anlage funktioniert. Auch die Spule hat er sich genau angesehen.



EML: Neuer Hightech-Ofen auf der ISS

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Im Hightech-Ofen EML (Elektromagnetischer Levitator) werden metallische Legierungsproben behälterfrei geschmolzen und erstarrt. Mit 14 ausgewählten ISS-Experimenten wollen die Forscher mehr über Erstarrungsvorgänge lernen sowie genauere Messdaten der thermophysikalischen Eigenschaften von Legierungsschmelzen erhalten, um metallurgische Produktionsprozesse auf der Erde effizienter zu gestalten. Computermodelle zum Erstarrungsverhalten, zur Ausbildung des Legierungsgefüges oder zu industriellen Gießprozessen von Hightech-Materialien, beispielsweise von neuartigen Turbinenschaufeln und Motorgehäusen, benötigen dringend präzisere Eingabeparameter. Diese lassen sich vorteilhaft oder sogar ausschließlich anhand der Messungen auf der ISS gewinnen. Die Modellierung von Prozessen gewinnt dann an Realitätsnähe. Die Bestimmung der Wachstumsgeschwindigkeit und des Aufbaus der Erstarrungsfront, die flüssige und bereits erstarrte Bereiche voneinander trennt, die Wechselwirkung von keramischen Partikeln mit einer Erstarrungsfront und das Wachstum von Tropfen in nicht-mischbaren, metallischen Schmelzen sind weitere Zielstellungen aus den 14 ausgewählten ISS-Experimenten.

Experimentbeschreibung:

Das Konzept der EML-Anlage basiert auf der seit den frühen 1980er-Jahren in Deutschland entwickelten TEMPUS-Anlage. Sie wird in modifizierter Form noch heute für vorbereitende ISS-Experimente auf Parabelfluggkampagnen des DLR Raumfahrtmanagements eingesetzt. EML besteht aus vier Modulen und wird mit dem europäischen Welt- raumtransporter ATV-5 zur ISS gebracht. Ein Modul ist die wechselbare Probenkammer mit 18 Proben, die in keramische Probenhalter integriert sind. EML vereinigt mehrere Funktionen: Als Heizanlage verflüssigt sie hochschmelzende Legierungsproben mit einem Durchmesser von sechs bis acht Millimetern und hält diese mittels elektromagnetischer Felder berührungslos in der Schwebe. Um Verunreinigungen zu vermeiden, sind die chemisch aggressiven Schmelzen von einem Ultrahochvakuum oder reinstem Inertgas umgeben. Als Diagnosegerät erlaubt EML, die wichtigsten temperaturabhängigen Eigenschaften wie Oberflächenspannung, Viskosität, spezifische Wärme, Dichte und Schmelzenthalpie von Legierungsschmelzen zu ermitteln. Unter Schwerelosigkeit gelingt dies durch Wegfall von gravitationsabhängigen Störkräften wesentlich präziser als im Labor auf der Erde. Als Messinstrument für schnelle Erstarrungsvorgänge aus tief unterkühlten Schmelzen ermöglicht EML mittels Hochgeschwindigkeitskameras (bis zu 50.000 Bilder pro Sekunde), die frühen Phasen (Keimbildung) in der Entstehung eines Werkstoffgefüges zu analysieren. Auf diese Weise sollen physikalische Wirkungsmechanismen aufgeklärt werden, die zu einem maßgeschneiderten Werkstoff führen. Der Experimentablauf kann automatisch erfolgen, wird jedoch in der Regel von der Bodenstation aus mit Telekommandos gesteuert. Wissenschaftler aus deutschen Universitäten (Ulm, Göttingen), dem DLR-Institut für Materialphysik im Weltraum, dem Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung in Dresden und vom Forschungsinstitut ACCESS in Aachen sind am Projekt beteiligt. Neben akademischen sind im engen Verbund auch Industrieforscher der Metallindustrie beteiligt. Die verarbeiteten Proben nach deren Rücktransport zur Erde und die gewonnenen Daten werden von den beteiligten Teams in enger Kooperation für eine umfassende Analyse genutzt.

Status:

EML wurde seit 2008 im Auftrag des DLR Raumfahrtmanagements und der ESA gemeinsam entwickelt und gebaut. Auftragnehmer ist die Firma Airbus Defence & Space (früher EADS Astrium). Die Anlage wird mit ATV-5 im Sommer 2014 auf die ISS gebracht und von dem deutschen Astronauten Alexander Gerst in das European Drawer Rack (EDR) im Columbus-Modul integriert. Da es weltweit keine vergleichbare Anlage gibt, steht den Wissenschaftlern bald ein innovatives Hightech-Instrument zur anwendungsorientierten Forschung zur Verfügung. Ein flugidentisches EML-Modell wird für die Validierung aller Experimente am Microgravity User Support Center (MUSC) des DLR in Köln betrieben. Ein EML-Trainingsmodell steht den Astronauten ebenfalls in Köln im European Astronaut Center (EAC) zur Verfügung.

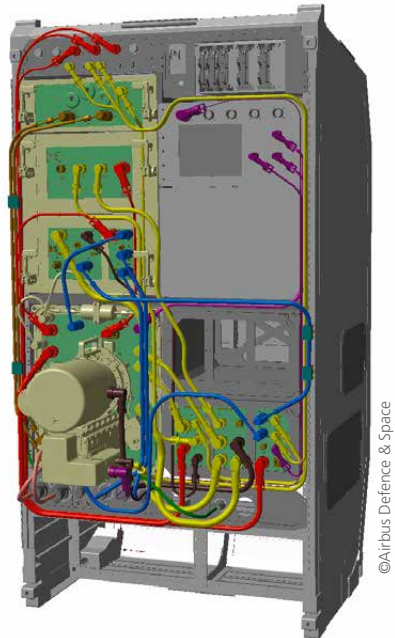
Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Während der geplanten Lebensdauer der EML-Anlage sollen bis zu sechs Probenkammern mit je 18 Legierungsproben bestückt, zur Raumstation transportiert und verarbeitet werden. Die Kammern kommen anschließend mit der Dragon-Kapsel von SpaceX zur Erde zurück. Man vergleicht diese Proben mit Analogproben, die auf der Erde geschmolzen und erstarrt wurden. Letztendlich sollen so die Wechselbeziehungen von Herstellungsprozess, Werkstoffgefüge und Werkstoffeigenschaften genauer als bisher möglich aufgeklärt werden. Die thermophysikalischen Messdaten dienen der Verbesserung von Computermodellen für industrielle Prozesse. Terrestrische Produkte mit gezielt eingestellten Materialeigenschaften von „Superlegierungen“ durch verbesserte Verfahren sind ein mittelfristiges Ziel. In einer weiteren Ausbaustufe wird EML ein spezielles Messgerät zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit von levitierten Schmelzen sowie eine Diagnostikeinheit zur Messung und Manipulation des Sauerstoffgehalts in der Prozessatmosphäre erhalten.

Start

Sommer 2014 / ATV-5 Georges Lemaître (geplant)

ISS-Zeitraum	ab Sommer 2014 beginnend mit der Blue Dot-Mission
Unterbringung	European Drawer Rack (EDR) im Columbus-Modul
Experimentator	14 ausgewählte Experimente, davon 13 unter deutscher Federführung
Einrichtung	DLR-Institut für Materialphysik im Weltraum, Köln; diverse Universitäten; andere Forschungseinrichtungen
Bereich	Materialwissenschaften
Partner	DLR; ESA; multinationales Topical Team



EML-Modul integriert im European Drawer Rack (EDR)



In der Schwerelosigkeit werden Legierungen zukünftig behälterfrei mit der EML-Anlage geschmolzen. Der deutsche ESA-Astronaut Alexander Gerst trainiert am EAC in Köln, wie sie funktioniert. Er wird EML auf der Raumstation in Empfang und in Betrieb nehmen.



NASA-Astronautin Catherine Coleman entfernt den Low Gradient Furnace (LGF)-Ofeneinsatz aus dem MSL und installiert stattdessen den Solidification and Quenching Furnace (SQF)-Ofeneinsatz für die zweite Probenreihe von CETSOL.



CETSOL: Der Übergang von gerichteter zu ungerichteter Erstarrung in Aluminium-Legierungen

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Untersuchungsreihen an Legierungen in Laboren auf der Erde werden durch die Schwerkraft häufig verfälscht. Konvektion und Ablagerung – die sogenannte Sedimentation – führen bei der Erstarrung zur ungleichmäßigen Verteilung der Legierungsbestandteile im Werkstück. Die Wissenschaftler weichen deshalb in den Weltraum aus, wo sie ohne störende Schwerkraft ihre Proben schmelzen und erstarren lassen können. Das CETSOL-Experiment untersucht diese Abkühlungsvorgänge genauer. Zum Beispiel wachsen tannenbaumartige Strukturen – die sogenannten Dendriten – in der Schmelze gerichtet oder ungerichtet heran und bilden die sogenannte Kornstruktur. Die Wissenschaftler interessieren sich dabei vor allem für die kritischen Vorgänge beim Übergang von gerichteter zu ungerichteter Erstarrung – dem sogenannten CET – in Aluminium-Silizium-Legierungen. Forschung unter Schwerelosigkeit bietet dabei die Chance, das freie Dendriten-Wachstum ohne Sedimentation und Strömungseffekte zu studieren. Durch die Raumstations-Experimente wollen die Forscher verstehen, wie der CET-Effekt entsteht. Damit sollen bestehende 3D-Computersimulationen überprüft und verbessert werden, um künftig die Struktur von Gussteilen in der industriellen Fertigung – zum Beispiel bei der Herstellung von Turbinenschaufeln – gezielter zu beeinflussen und so die Materialeigenschaften entscheidend zu verbessern.

Experimentbeschreibung:

Im Rahmen von CETSOL werden Aluminium-Silizium-Legierungen in den Öfen Low Gradient Furnace (LGF) beziehungsweise Solidification and Quenching Furnace (SQF) des Materials Science Laboratory (MSL) aufgeschmolzen und anschließend erstarrt. Dabei werden wichtige Eigenschaften des Erstarrungsprozesses wie der Temperaturgradient in der Schmelze oder die Erstarrungsgeschwindigkeit verändert. Die Einstellungen sind so gewählt, dass daraus kritische Parameter für den Übergang von gerichtetem zu ungerichtetem Wachstum abgeleitet werden können.

Das international aufgestellte CETSOL-Team wird von ACCESS e.V. Aachen koordiniert und besteht aus dem IM2NP der Aix Marseille Universite in Marseille, ARMINES MINES Paris Tech CEMEF in Sophia Antipolis, dem University College in Dublin sowie Partnern aus den USA. Unterstützt wird das Team von europäischen Industrieunternehmen, insbesondere von der Hydro-Aluminium Deutschland GmbH in Bonn, die das Probenmaterial für die Raumstationsexperimente bereitgestellt hat.

Status:

MSL wurde im Rahmen der STS-128 Mission Ende August 2009 mit dem Space Shuttle Discovery zur ISS transportiert und in das Destiny-Modul eingebaut. Die sechs CETSOL-Proben des sogenannten Batch-1 wurden zwischen Dezember 2009 und April 2010 im LGF erfolgreich gewonnen und zur Analyse zur Erde zurückgebracht. Zwei der insgesamt sieben Proben der Batch-2a-Serie transportierte das Space Shuttle Atlantis (STS-135) im Juli 2011 zur ISS. Eine dieser Proben wurde nach dem Einbau des SQF zu Anfang des Jahres 2011 und im Herbst desselben Jahres geschmolzen und mit der Dragon-Kapsel von Space X im Mai 2012 zur Erde zurückgebracht. Allerdings sorgte ein Stromausfall im MSL-Rack während des SQF-Betriebs für eine Verunreinigung des Ofens und führte somit im Jahr 2012 zu einer längeren Unterbrechung der Experimente. Die Ursache und die Folgen des unerwarteten Ausfalls wurden genau untersucht. Nach der Reinigung des SQF-Ofens im November 2012 und letzten Check-ups im Dezember konnte die zweite Batch-2a-Probe schließlich Anfang Februar 2013 erfolgreich gewonnen werden. Bis Ende Januar 2014 wurden dann weitere vier der insgesamt sieben Batch 2a-Proben störungsfrei aufgeschmolzen und kontrolliert erstarrt.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Im Jahr 2014 sollen die beiden noch verbliebenen Batch-2a-Proben verarbeitet und alle fertigen Proben zur wissenschaftlichen Untersuchung zur Erde zurückgebracht werden. Das CETSOL-Experiment soll uns dabei helfen wichtige Erkenntnisse über das Erstarrungsverhalten von Metalllegierungen, insbesondere was den Einfluss der Schwerkraft und wesentlicher Prozessparameter auf die Kornstruktur angeht, zu erschließen. Dieses Wissen soll zeitnah in die industrielle Fertigung von Gussteilen einfließen. Weitere CETSOL-Experimente sind ab 2015 mit der neuen europäischen TRANSPARENT-1-Anlage in der Microgravity Science Glovebox (MSG) geplant.

Start 29. August 2009 / Space Shuttle Discovery (STS-128)	
ISS-Zeitraum	seit Dezember 2009 auf der ISS, derzeit Batch-2a-Serie
Unterbringung	Materials Science Laboratory (MSL) im Destiny-Modul
Experimentator	Dr. Gerhard Zimmermann
Einrichtung	ACCESS e.V., Aachen
Bereich	Materialphysik
Partner	ESA; NASA; multinationales Team

Längsschliffe aus zwei CETSOL-Flugproben: In der Schmelze wachsen tannenbaumartige Strukturen – die sogenannten Dendriten – gerichtet (links) oder ungerichtet (rechts) heran und bilden die sogenannte Kornstruktur. Die Wissenschaftler interessieren sich dabei vor allem für die kritischen Vorgänge beim Übergang von gerichteter zu ungerichteter Erstarrung in Aluminium-Silizium-Legierungen.



MICAST: Das Erstarrungsverhalten von Aluminium-Gusslegierungen

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Wird flüssiges Metall in eine Form gegossen, so kühlt es ab und erstarrt. Dabei bilden sich in der Schmelze Kristalle in Form von tannenbaumartigen Kristallstrukturen – die sogenannten Dendriten. Unter dem Mikroskop lässt sich nach dem vollständigen Abkühlen des Gussstücks ein dichtes Netz solcher Dendriten erkennen. Je feiner und dichter es ist, desto fester und stabiler ist der Werkstoff. Wie wirken Strömungen in der Schmelze auf die Entstehung dieses Dendriten-Netzwerks? Fände man eine Antwort auf diese Frage, so hätte man eines der größten ungelösten Probleme bei der Erstarrung von metallischen Legierungen entschlüsselt und gleichzeitig einen Weg gefunden, die Festigkeit von Legierungen gezielt zu erhöhen.

Im Rahmen des MICAST-Projektes wird die Ausbildung des dendritischen Netzwerkes in Aluminium-Gusslegierungen unter Schwerelosigkeit untersucht. Diese idealen Bedingungen sorgen dafür, dass es keine schwerkraft-getriebenen Strömungen gibt. So lässt sich in den ISS-Experimenten gezielt der Einfluss von unterschiedlich starken Schmelzströmungen untersuchen. Dabei wird während des Erstarrens ein rotierendes Magnetfeld zugeschaltet und so eine kontrollierte Strömung erzeugt. Untersucht man deren Wirkung auf das Dendriten-Netzwerk im Vergleich zu den absolut strömungsfrei erstarrten Bereichen in einer Probe, so können mathematische Modelle entwickelt werden, die Gießprozesse auf der Erde deutlich verbessern sollen.

Experimentbeschreibung:

Im Rahmen von MICAST werden Aluminium-Silizium- beziehungsweise Aluminium-Silizium-Eisen-Legierungen unterschiedlicher Zusammensetzung in den Öfen Low Gradient Furnace (LGF) beziehungsweise Solidification and Quenching Furnace (SQF) des Materials Science Laboratory (MSL) aufgeschmolzen und anschließend erstarrt. Dabei werden wichtige Eigenschaften des Erstarrungsprozesses wie der Temperaturgradient in der Schmelze und die Erstarrungsgeschwindigkeit variiert. Ein Teil der Proben wird jeweils unter strömungsfreien Verhältnissen erstarrt, während im anderen Teil eine kontrollierte Strömung durch Einschalten eines externen Magnetfeldes erzeugt wird.

Das MICAST-Team wird vom DLR-Institut für Materialphysik im Weltraum unter Beteiligung von ACCESS e.V. Aachen koordiniert. Mit dabei sind die Universität Miskolc in Ungarn sowie Partner in Frankreich, Kanada, Mexiko, der Tschechischen Republik, Rumänien und Ägypten. Unterstützt wird das Team von Industrieunternehmen, insbesondere die Hydro-Aluminium Deutschland GmbH in Bonn, die die Proben für die Raumstationsexperimente hergestellt hat.

Der belgische ESA-Astronaut Frank De Winne schwebt mit einer Probenkartusche für den Ofen im Materials Science Laboratory (MSL) durch das Destiny-Modul.

Status:

Das MSL wurde im Rahmen der STS-128 Mission Ende August 2009 mit dem Space Shuttle Discovery zur ISS transportiert und in das Destiny-Modul eingebaut. Die ersten sechs MICAST-Proben des sogenannten Batch-1 wurden zwischen Dezember 2009 und April 2010 im LGF des MSL auf der ISS erfolgreich gewonnen und später zur eingehenden Analyse zur Erde zurückgebracht. Zwei Proben der sogenannten Batch-2a-Serie von MICAST wurden im Juli 2011 mit dem Space Shuttle Atlantis (STS-135) zur ISS transportiert. Beide Proben wurde nach dem Einbau des SQF im Frühjahr und im Herbst 2011 gewonnen und mit der Dragon-Kapsel von SpaceX im Mai 2012 zur Erde zurückgebracht.

Allerdings sorgte ein Stromausfall im MSL-Rack während des SQF-Betriebs für eine Verunreinigung des Ofens und führte somit im Jahr 2012 zu einer längeren Unterbrechung der Experimente. Die Ursache und die Folgen des unerwarteten Ausfalls wurden genau untersucht. Nach der Reinigung im November 2012 und letzten Check-ups im Dezember konnte die insgesamt dritte Batch-2a-Probe von MICAST schließlich Ende Februar 2013 erfolgreich gewonnen werden. Bis Ende Januar 2014 wurden dann zwei weitere der insgesamt acht Batch-2a-Proben störungsfrei aufgeschmolzen und kontrolliert erstarrt.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Im Jahr 2014 sollen die drei noch verbliebenen Batch-2a-Proben verarbeitet und alle fertigen Proben zur wissenschaftlichen Untersuchung zur Erde zurückgebracht werden. MICAST soll uns dabei helfen, einerseits das ungestörte Erstarrungsverhalten metallischer Legierungen in Schwerelosigkeit zu verstehen sowie andererseits mehr über den Einfluss kontrollierter Strömungen auf das Werkstoffgefüge zu erfahren. Dieses Wissen soll der industriellen Fertigung von Gussteilen zugutekommen.

Start
29. August 2009 / Space Shuttle Discovery (STS-128)

ISS-Zeitraum	seit Dezember 2009 auf der ISS, derzeit Batch-2a-Serie
Unterbringung	Materials Science Laboratory (MSL) im Destiny-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Lorenz Ratke; Dr. Gerhard Zimmermann
Einrichtung	DLR-Institut für Materialphysik im Weltraum, Köln; ACCESS e.V., Aachen
Bereich	Materialwissenschaften
Partner	ESA; NASA; multinationales Team

Materialwissenschaften



Auf der ISS wird auch Forschung betrieben, die Turbinenschaufeln leichter machen soll. Eine Schaufel auf Titan-Aluminium-Basis ist zum Beispiel nur halb so schwer wie eine gewöhnliche Nickel-basierte Schaufel.



ESA-Astronaut Frank de Winne mit MSL-Hardware im Destiny-Modul



Dr. Petra Neuhaus von EADS Astrium (heute Airbus Defence & Space), Dr. Harald Lenski von EADS Astrium und Dr. Alex Lehoczy, Materialwissenschaftler des Marshall Space Flight Center (v. l.) untersuchen eine Probe nach ihrer Rückkehr auf die Erde.



SETA: Das Erstarrungsverhalten von mehrkomponentigen Legierungen

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Sogenannte eutektische Legierungen haben im Gegensatz zu vielen anderen Legierungen, die einen Schmelzbereich aufweisen, einen eindeutig bestimmaren Schmelzpunkt. Da alle Bestandteile gleichzeitig erstarren und dies stets bei einer viel niedrigeren Temperatur geschieht, als es bei den reinen Bestandteilen der Schmelze der Fall wäre, entsteht ein feines und gleichmäßiges Werkstoffgefüge mit einer Lamellen-Struktur. Bisher wurden bei diesen Erstarrungsvorgängen vornehmlich Legierungen untersucht, die nur aus zwei Bestandteilen bestehen. Im Gegensatz zu diesen sogenannten binären Eutektika ist das Erstarren von dreikomponentigen (ternären) eutektischen Legierungen bisher kaum erforscht. Das soll das SETA-Experiment nun ändern und die Dynamik der Lamellen-Struktur bei der Erstarrung von komplexen Legierungen aufklären. Die Experimente erfolgen an metallischen Legierungen aus Aluminium-Mangan-Silizium und aus Aluminium-Kupfer-Silizium. Darüber hinaus wird die organische Modelllegierung SCN-DC-NPG (Succinonitril-(D)Campher-Neopentylglykol) benutzt. SETA soll die bestehenden eutektischen Wachstumsmodelle überprüfen und erweitern. Langfristiges Ziel ist dabei die Entwicklung neuer eutektischer Verbundwerkstoffe für terrestrische Anwendungen auf der Basis verbesserter Wachstumsmodelle.

Experimentbeschreibung:

Die SETA-Experimente mit metallischen Legierungen werden im Solidification and Quenching Furnace (SQF) des Materials Science Laboratory (MSL) durchgeführt. Die Proben werden zunächst zu zwei Dritteln aufgeschmolzen und anschließend über 50 Millimeter kontrolliert erstarrt und abgeschreckt. Darüber hinaus werden insgesamt fünf Flugproben mit transparenten organischen Legierungen für die künftige ESA-Anlage TRANSPARENT-1 in der Microgravity Science Glovebox (MSG) gefertigt. Diese Experimente erlauben im Gegensatz zu den metallischen Proben, die Bildung der Lamellen-Struktur während der Erstarrung direkt zu beobachten.

Das SETA-Team wird von ACCESS e.V. in Aachen koordiniert und umfasst als weitere Partner das DLR-Institut für Materialphysik im Weltraum, das Institut für Metallurgie und Werkstofftechnik der KU Leuven, das Institut für Nanowissenschaft INSP der CNRS in Paris, das Institut für Materialwissenschaft und Werkstoffkunde der Iowa State University in Ames sowie das Institut für Maschinenwesen der Koc University in Istanbul.

Status:

MSL wurde im Rahmen der STS-128 Mission Ende August 2009 mit dem Space Shuttle Discovery zur ISS transportiert und in das Destiny-Modul eingebaut. Die ersten beiden SETA-Proben wurden im Rahmen des Batch-2a im Juni 2011 mit dem Space Shuttle Atlantis (STS-135) zur ISS gebracht. Die erste davon wurde im September 2011 im SQF-Ofen des MSL prozessiert. Eine dieser Proben wurde nach dem Einbau des SQF im Frühjahr 2011 und im Herbst desselben Jahres geschmolzen und mit der Dragon-Kapsel von Space X im Mai 2012 zur Erde zurückgebracht. Allerdings sorgte ein Stromausfall im MSL-Rack während des SQF-Betriebs für eine Verunreinigung des Ofens und führte somit im Jahr 2012 zu einer längeren Unterbrechung der Experimente. Die Ursache und die Folgen des unerwarteten Ausfalls wurden genau untersucht. Nach der Reinigung des SQF-Ofens im November 2012 und letzten Check-ups im Dezember 2012 konnte die zweite Batch-2a-Probe schließlich Anfang Februar 2013 erfolgreich gewonnen werden. Ende Mai 2012 wurde schließlich diese erste SETA-Probe mit dem Erstflug der Dragon-Kapsel von SpaceX zurück zur Erde gebracht und eingehend auf ihre wissenschaftliche Verwendbarkeit untersucht.

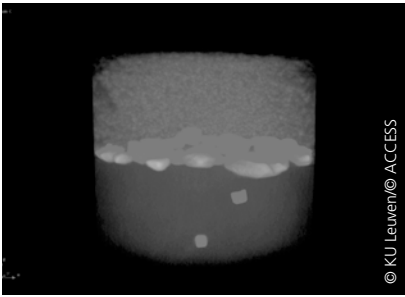
Nach der Reinigung des SQF-Ofens im November 2012 und dem Abschluss der letzten Check-ups im Januar 2013 wurden zunächst weitere Batch-2a-Proben der Experimente MICAST und CETSOL erfolgreich geschmolzen. Bei der Verarbeitung der zweiten Batch-2a-Probe von SETA Mitte Mai 2013 kam es dann leider zu einem unplanmäßigen Reboot des Standard Payload Computers (SPLC). In dessen Folge wurde das Experiment nach lediglich sieben Millimetern Erstarrungslänge erneut frühzeitig abgebrochen. Eine wissenschaftliche Auswertung war damit leider nicht mehr sinnvoll durchzuführen. Bis zur endgültigen Klärung der Ursache für den ungeplanten Reboot wurden weitere Experimente im SQF erneut ausgesetzt und erst im Herbst 2013 wieder aufgenommen. Die SETA-Probe ist für den Fall einer möglichen Experimentwiederholung derzeit noch auf der ISS verblieben.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Die Verarbeitung der nächsten SETA-Proben ist für Ende 2015 vorgesehen. Derzeit werden für den sogenannten Batch-2b insgesamt acht SETA-Flugproben auf ESA-Seite sowie sechs Flugproben auf Seiten der NASA für den Flug zur ISS vorbereitet. Der Abschluss der Entwicklung der TRANSPARENT-1-Anlage und der entsprechenden Probenbehälter ist für Mitte 2015 geplant.



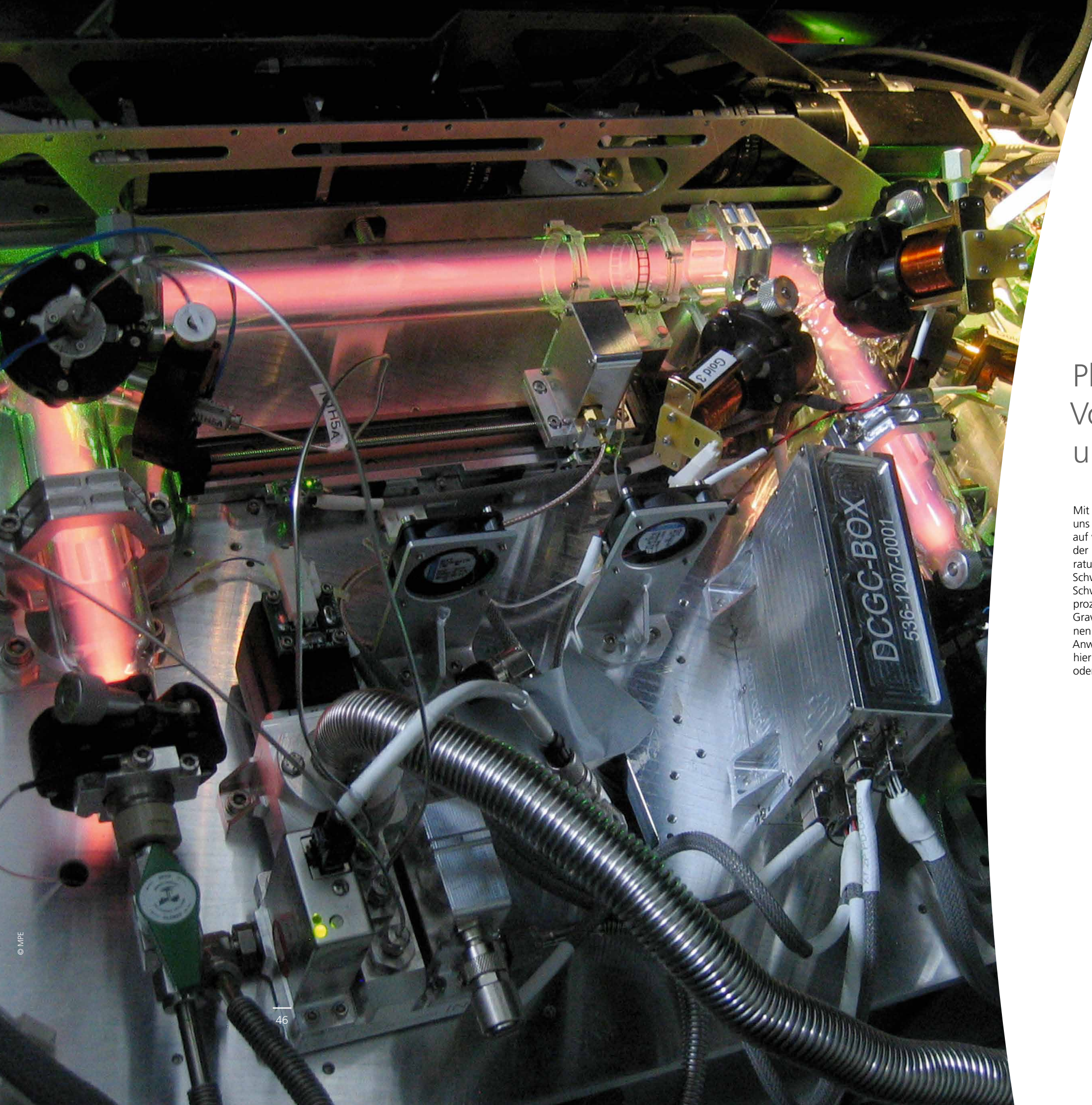
Rekonstruierte 3D-Partikel in einer SETA-3-Probe



Röntgenaufnahme einer erstarrten SETA-Schmelze: Die Aufnahme zeigt ein Partikel-Cluster vor der Erstarrungsfront.

Start 8. Juli 2011 / Space Shuttle Atlantis (STS-135)	
ISS-Zeitraum	seit Sommer 2011 auf der ISS, derzeit Batch-2a-Serie
Unterbringung	Materials Science Laboratory (MSL) im Destiny-Modul und TRANSPARENT-1-Anlage in der Microgravity Science Glovebox (MSG) im Columbus-Modul
Experimentator	Dr. Stephan Rex
Einrichtung	ACCESS e.V., Aachen
Bereich	Materialwissenschaften
Partner	ESA; NASA; multinationales Team

Erstarrte SETA-3-Probe



Physikalische Forschung – Von Plasmen, Flüssigkeiten und Strömungen im Erdinneren

Mit Experimenten im Weltraum lassen sich grundlegende Erkenntnisse gewinnen, die uns auf der Erde verborgen bleiben würden, da die Schwerelosigkeit Auswirkungen auf viele physikalische Prozesse hat: In Flüssigkeiten entfallen die Auftriebskonvektion, der hydrostatische Druck und die Ablagerung (Sedimentation). Unter erhöhter Temperatur dehnen sich flüssige Stoffe aus, ihre Dichte nimmt ab und unter dem Einfluss der Schwerkraft strömen sie nach „oben“. Der Wegfall dieser Auftriebskonvektion in der Schwerelosigkeit ermöglicht zum Beispiel, theoretische Vorstellungen von Transportprozessen in Flüssigkeiten und Gasen zu überprüfen. Plasmakristalle kann man unter Gravitation lediglich zweidimensional erzeugen. Nur unter der Schwerelosigkeit können große, dreidimensionale Kristalle hergestellt und untersucht werden. Praktische Anwendungen, etwa zur Beschichtung von elektronischen Mikrochips, zeichnen sich hier ab. Die Schwerelosigkeit ermöglicht auch, Phänomene zur Planetenentstehung oder die Strömungen im Inneren unserer Erde zu untersuchen.

PK-3 und PK-3 Plus: Komplexen Plasmen auf der Spur

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Plasmen gelten eigentlich als der ungeordnetste Zustand der Materie. Die sichtbare Materie im Universum besteht zu circa 99 Prozent daraus – auch die Sonne, Blitze und Nordlichter. Ein komplexes Plasma, wie beispielsweise in den Saturnringen oder Kometenschweiften, besteht aus einem Niedertemperaturplasma – einem elektrisch geladenen Gas mit freien Elektronen und Ionen, wie etwa das Leuchtmedium in einer Leuchtstoffröhre – und kleinen Partikeln („Staub“) von einigen Mikrometern Größe. Die Partikel werden in dem Gas elektrostatisch aufgeladen und treten miteinander in Wechselwirkung. Beide Reaktionspartner verhalten sich dabei wie ein Stoff. Abhängig von den Experimentbedingungen – variiert werden das plasmaerzeugende elektrische Feld und der Gasdruck – verändert ein solches komplexes Plasma seine Struktur und verhält sich wie eine Flüssigkeit, ein Gas oder bei dreidimensionaler regelmäßiger Anordnung der Partikel wie ein Kristall. Diese geordnete Struktur bezeichnet man daher auch als „Plasmakristall“. Sie konnte erstmals 1994 experimentell nachgewiesen werden. Neben ihrer Bedeutung in der Astronomie sind Plasmen auf vielen Gebieten wie etwa in der Beleuchtungstechnik, Oberflächentechnik, Werkstoffverarbeitung, Hygiene oder Medizin technisch von großer Bedeutung. Plasmakristalle können sich wie ein „normales“ Material mit den Aggregatzuständen gasförmig – flüssig – fest verhalten, weisen aber besondere Eigenschaften auf: Die Teilchen sind groß genug, um ihre Dynamik mit einfachen Mikroskop-Techniken zu verfolgen. Die Vorgänge lassen sich gut beobachten, weil sie wegen der großen Teilchenmasse langsam ablaufen und das Plasma-bildende Edelgas sehr dünn ist. So werden die Teilchen in ihrer Bewegung nicht gedämpft.

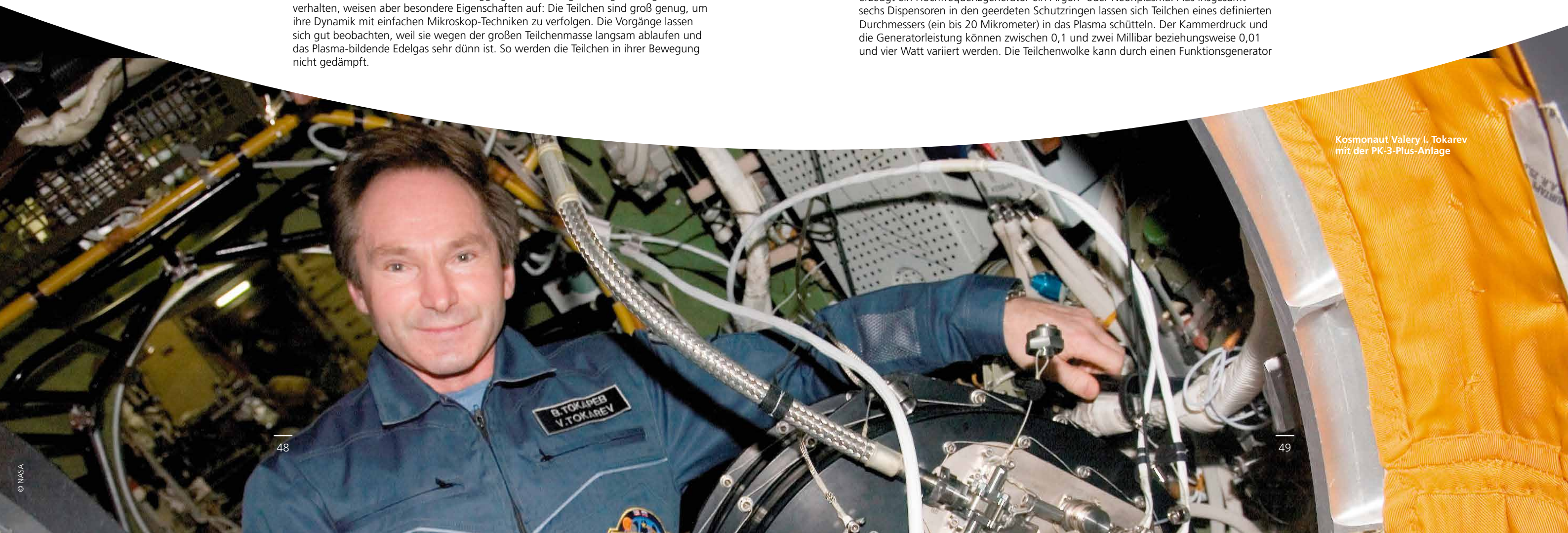
Für ein gewöhnliches Plasma ist die Schwerkraft von untergeordneter Bedeutung. Ein komplexes Plasma reagiert jedoch aufgrund der hundert Milliarden Mal größeren Masse der eingebrachten Mikropartikel im Vergleich zu Elektronen und Ionen sehr empfindlich auf die Schwerkraft: Die Partikel sinken ab und stauchen das komplexe Plasma in Richtung der Schwerkraft. Daher ist ein Plasmakristall auf nur wenige Gitterebenen begrenzt. Nur unter Schwerelosigkeit können große, dreidimensionale Strukturen ungestört kreierte und erforscht werden. Hierbei interessieren die Wissenschaftler einerseits die physikalischen Eigenschaften des komplexen Plasmas. Andererseits dient es wegen seines Verhaltens als Modell für „normale“ Materialien, da strukturelle Veränderungen von „Atom“ zu „Atom“ beobachtet werden können. So interessieren sich die Forscher dafür, wie sich Wellen ausbreiten, wie sich Flüssigkeiten mischen, wie ein Flüssigkeitswirbel entsteht oder wie ein Kristall schmilzt. Besondere Aufmerksamkeit widmen sie dem Übergang von flüssig zu gasförmig und dem kritischen Punkt, an dem der Unterschied zwischen Flüssigkeit und Gas verschwindet. Die Untersuchung kalter staubiger Plasmen im Labormaßstab ist heute ein etabliertes und gleichzeitig zukunfts-trächtiges Gebiet der physikalischen Grundlagenforschung. Schwerelosigkeit ist vor allem für die Erforschung ungestörter dreidimensionale Plasmakristalle erforderlich. Die Untersuchung dieser Phänomene anhand großer kristalliner Plasmastrukturen mit den Forschungsanlagen PK-3 und PK-3 Plus war Schwerpunkt der ISS-Experimente.

Anlagenbeschreibung:

Herz der Anlagen ist die Plasmakammer mit 400 Milliliter Volumen. Zwischen zwei Plattenelektroden von sechs Zentimetern Durchmesser und drei Zentimetern Abstand erzeugt ein Hochfrequenzgenerator ein Argon- oder Neonplasma. Aus insgesamt sechs Dispensoren in den geerdeten Schutzringen lassen sich Teilchen eines definierten Durchmessers (ein bis 20 Mikrometer) in das Plasma schütteln. Der Kammerdruck und die Generatorleistung können zwischen 0,1 und zwei Millibar beziehungsweise 0,01 und vier Watt variiert werden. Die Teilchenwolke kann durch einen Funktionsgenerator



Der deutsche ESA-Astronaut Thomas Reiter forschte mit Hilfe der PK-3-Plus-Apparatur im russischen Swesda-Modul der ISS an der Entstehung von komplexen Plasmen unter Schwerelosigkeit.



Kosmonaut Valery I. Tokarev mit der PK-3-Plus-Anlage

mit Hilfe eines niederfrequenten Signals an den Elektroden (0,1 bis zehn Hertz bei maximal 50 Volt) oder mit verschiedenen Wellenformen angeregt werden. Beobachtet werden die Teilchen in einem ein bis 1,5 Millimeter breiten Laserlichtschnitt mit vier Videokameras, von denen eine das gesamte Volumen scannen kann. Die Experimentkammer mit ihren peripheren Geräten sowie Elektronik und Experimentrechner sind in einem zylindrischen Container eingebaut. Diese Experimentapparatur ist mit der Kontrollkonsole für den Astronauten – der sogenannten Telescience-Apparatur – verbunden. Von ihr aus können sowohl vorprogrammierte als auch manuell gesteuerte Experimente durchgeführt werden. Die gewonnenen Daten werden auf vier Videorekordern gespeichert und deren Festplatten mit Sojus zeitnah zur Erde zurücktransportiert.

Status:

Die Anlage PK-3, die in Deutschland im Auftrag vom DLR mit den Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMBF) gebaut wurde, war 2001 die erste betriebene Forschungsanlage auf der ISS. Im Jahr 2006 folgte dann Nachfolgemodell PK-3 Plus. Der russische Kooperationspartner stellte für beide Anlagengenerationen die ISS-Ressourcen einschließlich den Transport zur Raumstation bereit. Während der bis zum Juli 2013 andauernden zwölf Jahren kontinuierlicher Forschung sind über einhundert Einzelexperimente in 34 jeweils drei- bis viertägigen Experimentserien erfolgreich durchgeführt worden. Die federführenden deutschen und russischen Wissenschaftler von Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) und dem Joint Institute for High Temperatures (JIHT) haben kooperativ weitere Wissenschaftler aus Deutschland, Frankreich und Japan in das Forschungsprogramm einbezogen.

Ergebnisse:

Mehr als 70 Veröffentlichungen unter Verwendung der ISS-Daten liegen bisher vor. Die meisten davon sind in wissenschaftlichen Journalen erschienen. Diese Bilanz wird von keinem anderen Raumstationsexperiment erreicht. Durch die Breite des Forschungsfeldes sind die experimentellen Ergebnisse auf der ISS auch sehr vielfältig. Sie haben die Plasmaphysik bereichert (Verbesserung der Ionenreibungstheorie), bieten die Basis für neue Theorien über frühe Phasen der Planetenentstehung (Anhäufung von Mikroteilchen durch ladungsinduzierte Gelbildung) und enthüllten neue Details zu Phasenübergängen (direkte Analyse einer Kristallisationsfront und deren Dynamik, Entmischung von binären Flüssigkeiten, Ausbildung elektrorheologischer Fluide). Neben der Grundlagenforschung bilden neue Technologien, die für die Forschungsapparaturen auf der ISS entwickelt wurden, bereits heute die Basis für die Anwendung im Bereich der Plasmahygiene und Plasmamedizin (Spin-offs zur bakterienabtötenden Wirkung von Plasmen, Behandlung chronischer Wunden in Kliniken).

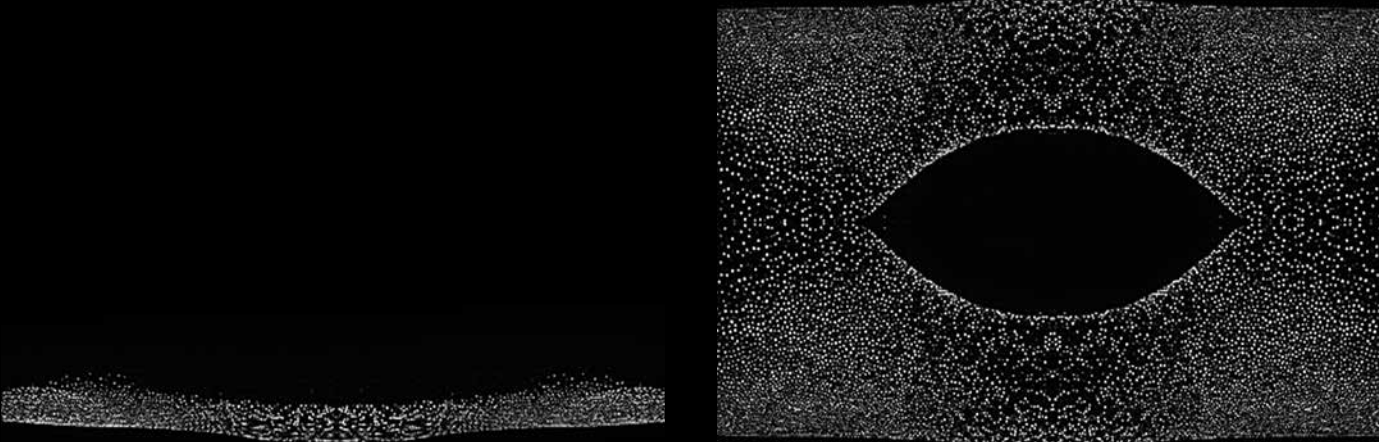
Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Die gewonnen Grundlagenkenntnisse haben ein weitreichendes, interdisziplinäres Anwendungspotenzial. Beispiele sind die Entwicklung von Designermaterialien auf dem Gebiet der Weichen Materie (Kolloide, Gele, Granulate) sowie industrielle Plasmatechnologien (Beschichtungsprozesse von Flachbildschirmen, Solarzellen, Microchips), bei denen staubige Verunreinigungen störend wirken. Die nächste Anlagengeneration PK-4 wurde im ESA-Programm entwickelt und soll im Sommer 2014 zur ISS gebracht werden. Ihr Betrieb, der kooperativ mit Roskosmos erfolgt, ist 2015 im Columbus-Modul geplant. Während mit der PK-3-Anlagengeneration der Schwerpunkt auf der Untersuchung kristalliner komplexer Plasmen lag, ist PK-4 speziell für Experimente im flüssigen Zustand eines solchen Plasmas geeignet.



Kalte Plasmen wirken gegen Keime und Hauterkrankungen und lassen Wunden schneller heilen. Die Forscher haben zudem Indizien, dass Plasma auch gegen Krebszellen wirksam sein könnte.

Ein komplexes Plasma wird unter dem Einfluss der Schwerkraft in Richtung Erdmittelpunkt gestaucht (links). In Schwerelosigkeit hingegen kann ein großes, dreidimensionales, komplexes Plasma entstehen entstehen (rechts).



Start	
26. Februar 2001 / PK-3 mit Progress 3P	
21. Dezember 2005 / PK-3 Plus mit Progress 20P	
ISS-Zeitraum	PK-3: März 2001 bis Ende 2005 PK-3 Plus: Januar 2006 bis Juli 2013
Unterbringung	Zunächst temporär während der Experimentdurchführung im Transfermodul zwischen den beiden Modulen Swesda und Sarja, ab Mitte 2010 permanent im Poisk-Modul (Miniforschungsmodul MIM-2)
Experimentator	Prof. Dr. Gregor Morfill; Prof. Dr. Vladimir E. Fortov
Einrichtung	MPI für extraterrestrische Physik (MPE), Garching; Joint Institute for High Temperatures (JIHT), RAS, Moscow
Bereich	Plasmaphysik
Partner	DLR; Roskosmos; RKK Energija



PK-4: Neue Dimension in der plasmaphysikalischen Forschung

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

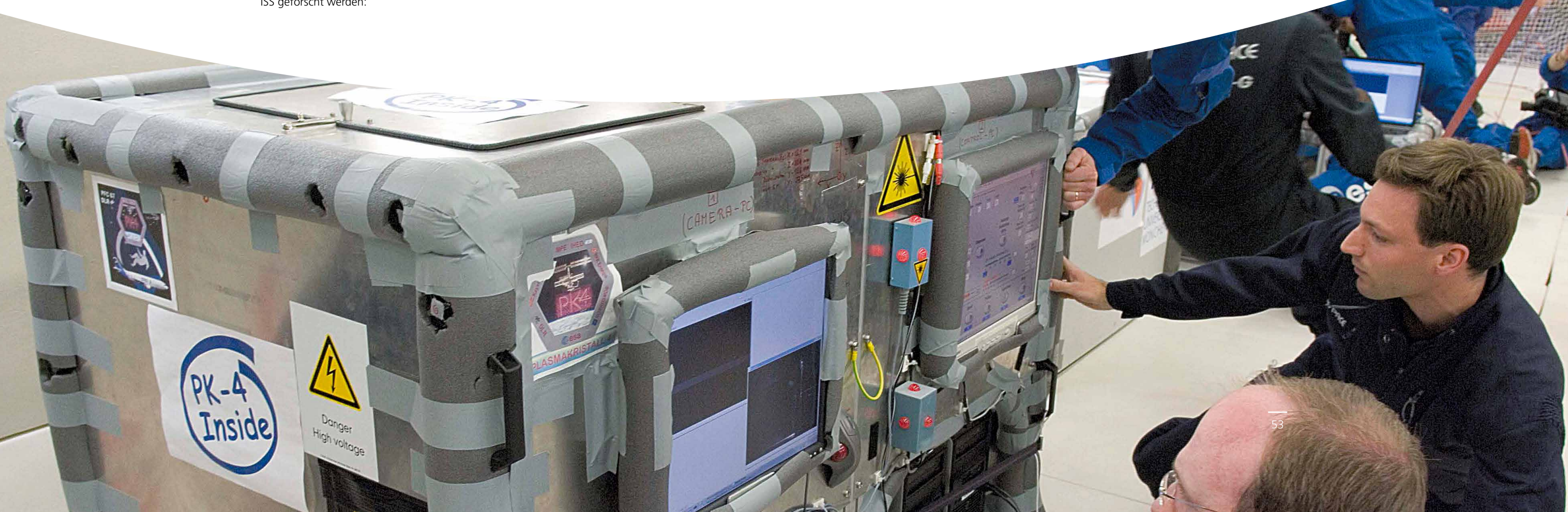
Komplexe Plasmen treten in der Natur beispielsweise in den Saturnringen auf. Sie können aber auch im Labor erzeugt werden. Sie entstehen, wenn im Plasma neben neutralem Gas auch Staubteilchen enthalten sind. Unter geeigneten Bedingungen – abhängig von Feldstärke, Gasdruck und Partikeldichte – können komplexe Plasmen gasförmige, flüssige oder kristalline Strukturen ausbilden. Diese Entdeckung gelang 1994 und stand im Gegensatz zu der bis dahin geltenden Lehrmeinung vom Plasma als ungeordnetem Zustand der Materie. Es handelt sich um ein System, in dem Vorgänge wegen der vergleichsweise hohen Partikelmasse langsam und deshalb gut beobachtbar ablaufen. Die Teilchenpositionen können mit einfachen Mikroskop-Techniken verfolgt werden. Untersuchungen physikalischer Vorgänge sind so auf der fundamentalsten Ebene – dem Bewegungslevel (Kinetik) einzelner Staubteilchen – möglich. Damit sind komplexe Plasmen nicht nur für Astronomen interessant, sondern vor allem ideale Modellsysteme zur Untersuchung von Vorgängen in Materie, bei denen die Staubteilchen Atome oder Moleküle repräsentieren. Unter normaler Schwerkraft können im Wesentlichen nur zweidimensionale Strukturen erzeugt werden. Da die Partikel absinken und das komplexe Plasma in Richtung der Schwerkraft stauchen, ist ein Plasmakristall daher auf nur wenige Gitterebenen begrenzt. Nur unter Schwerelosigkeit können große, homogene 3D-Strukturen ungestört kreiert und erforscht werden. Die Anlage PK-4 ist primär für die Untersuchung fluider Systeme geeignet. Zu folgenden Schwerpunkten soll auf der ISS geforscht werden:

- Mikroskopische Phänomene: Teilchenladung, Ionenreibung, Partikelkräfte, Agglomeration;
- Kollektive Phänomene: Untersuchung von selbsterregten/induzierten Wellen (Staubwellen, Staubdichtewellen, Soliton-Wellen, Schockwellen und Machkegel) und Dichteinstabilitäten, Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung, Strömung in einer Laval-Düse, elektrorheologische Plasmen;
- Transporteigenschaften: Scherflüsse, Viskosität, Wärmefluss, Selbstdiffusion, Nanofluidik;
- Phasenübergänge: Struktureigenschaften von Staubwolken und Grenzflächen, Phasenübergänge unter externen Kräften, Kristallisation unter Druck, Kritischer Punkt, Spalierbildung bei sich durchdringenden Plasmawolken, Relaxation in komplexem Plasma, Thermodynamik von Plasmen beziehungsweise Flüssigkeiten (Zustandsgleichung), Yukawa- und Staub-Cluster;

Experimentbeschreibung:

PK-4 besteht aus der Integrierten Basisplatte (IBP) mit dem eigentlichen Experimentaufbau sowie dem Experimentanlagen Container (EAC). Letzterer wird mit einem Adapter, der die Vakuumventile und die Stromverteilung enthält, im European Physiology Module (EPM) des Columbus-Moduls befestigt. Als weitere Rack-Einschübe gehören zu PK-4 eine Kontroll- und Videomanagementeinheit (CVMU) einschließlich der Datenspeicherung, sowie eine Gasversorgung. Bedient wird die Anlage über den Rack-eigenen Laptop. Das Herzstück besteht aus einer zylindrischen Experimentkammer aus Glas mit einem Durchmesser von 30 Millimetern. Die Elektroden, die das Gleichspannungsfeld in der Kammer erzeugen sowie der Gas-Ein- und Auslass mit

Bevor die PK-4-Experimente auf der Raumstation starten, wird die Anlage auf Parabelflügen getestet. Während eines Parabelflugs an Bord des Airbus A300 Zero-G finden auch ergänzende wissenschaftliche Untersuchungen statt.



angeschlossener Vakuumpumpe befinden sich an den Enden der Zylinderstücke. Die Staubpartikel können über sechs Zugänge eingebracht werden. Die beobachtbare Zylinderlänge, in der die Experimente ablaufen, beträgt 20 Zentimeter. Zwei Kameras dienen der Partikeldiagnostik, eine Kamera und ein Spektrometer der Plasmadiagnostik. Die Beleuchtung erfolgt im Lichtschnitt durch einen Laser an der Stirnseite der Kammer. Ist die Experimentkammer geleert und das Vakuum hergestellt, wird sie mit einem der Edelgase gefüllt. Das Plasma wird durch Anlegen einer Spannung gezündet und Partikel werden eingestreut. Durch Variation des Gasdrucks (10^{-5} Bar bis 1,5 Millibar) und der Stärke des Gleichspannungsfeldes lassen sich die Partikel zu verschiedenen Strukturen anordnen: von ungeordneten „gasförmigen“ bis zu „kristallinen“. Sechs Partikelgrößen mit Durchmessern von 1,3 bis elf Mikrometer und die Edelgase Argon und Neon sind für die Experimente verfügbar.

Darüber hinaus enthält der Experimentaufbau eine weitere Vorrichtung, mit der Partikel in einem bestimmten Kammerbereich eingefangen werden. Die Elektroden lassen sich schnell umpolen. Zwei um die Kammer gelegte Spulen können ein zusätzliches Hochfrequenzfeld einbringen. Ein Heizring erzeugt ein zusätzliches thermisches Feld. Die Manipulation einzelner Teilchen oder Teilchenensembles (Scherflüsse und Schockwellen) kann durch einen weiteren Laser, die Veränderung des Gleichspannungsfeldes, die Bewegung einer Hochfrequenzspule, durch Hochfrequenzpulse oder den Gasfluss erreicht werden. Mit einer weiteren ringförmigen Elektrode kann der Gasstrom wie bei einer Düse zusammengeschnürt werden. Das Spektrum an Variationen der Experimentparameter ist damit riesig.

Status:

Die Anlage PK-4 wird voraussichtlich am 22. Oktober 2014 mit einem russischen Progress-Raumschiff zur ISS gebracht. Nach der Inbetriebnahme soll sie für mindestens vier Jahre aktiv sein. Die umfangreichen Bilddaten werden nach den Experimentläufen auf Datenträgern zeitnah zur Auswertung zurückgebracht und an die Wissenschaftler zur Auswertung übergeben.

Ergebnisse:

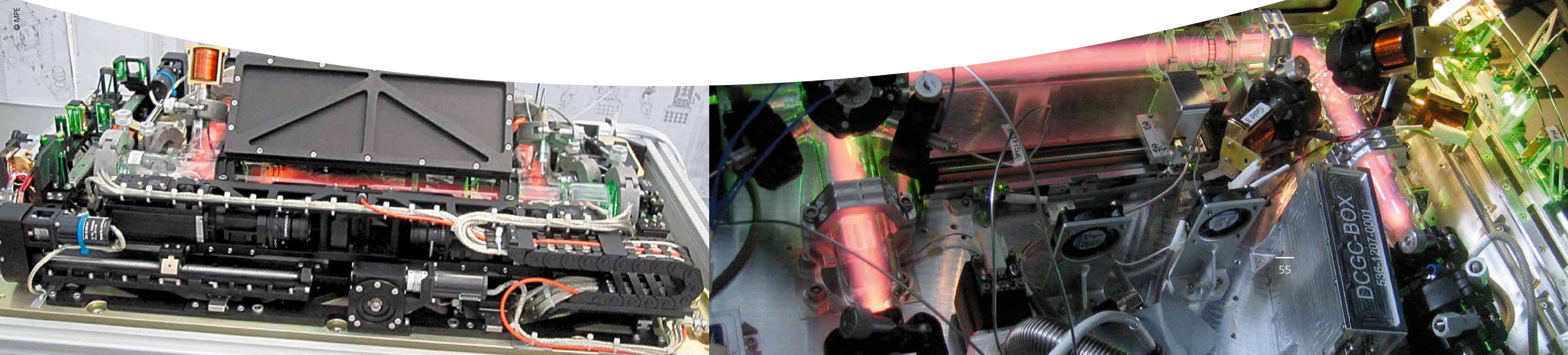
Während der Entwicklungsphasen von PK-4 entstanden aus vorbereitenden Labor- und Parabelflug-Untersuchungen zur Messung der Teilchenladung und Ionenreibungskräfte, zu Scherflüssen, Strömungen und Phasenübergängen bereits 15 Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Die erwarteten Resultate – vor allem zu „flüssigen“ Zuständen komplexer Plasmen auf atomarer Ebene – sind zunächst für das detaillierte Verständnis komplexer Plasmen selbst wichtig. Für die Physik kondensierter Materie und die Fluidphysik dienen komplexe Plasmen als Modellsysteme. Auch für die Industrie ist die PK-4-Forschung interessant. So könnten die Ergebnisse die Chipherstellung oder die Technik in Fusionsreaktoren verbessern. Darüber hinaus sind wertvolle Erkenntnisse für astrophysikalische Fragestellungen – wie etwa bei der Staubanreicherung im Zuge der Planetenentstehung – zu erwarten.

Start 22. Oktober 2014 / Progress 57P (geplant)	
ISS-Zeitraum	ab 2015 geplant
Unterbringung	European Physiology Module (EPM)-Rack im Columbus-Modul
Experimentator	Dr. Hubertus Thomas; Prof. Dr. Markus Thoma; Prof. Dr. Vladimir E. Fortov
Einrichtung	DLR-Gruppe in Oberpfaffenhofen; 1. Physikalisches Institut der Universität Gießen; Joint Institute for High Temperatures (JIHT), RAS
Bereich	Plasmaphysik
Partner	ESA; Roskosmos

Die neue ISS-Experimentanlage „PK-4“ kann komplexe Plasmakristalle mittels einer Gleichstrom-Entladung mit etwa 800 Volt in einer mit einem Edelgas gefüllten Glasröhre entstehen lassen – im Prinzip eine Neonröhre als Versuchsreaktor.



GeoFlow: Einblicke ins Innere der Erde

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Das Innere unserer Erde gleicht den Schichten einer Zwiebel. Aber was genau passiert dort drinnen? Welche Strömungsmuster herrschen zum Beispiel im flüssigen Teil des Erdkerns und im ebenfalls flüssigen Erdmantel? Welchen Einfluss üben diese Strömungen auf die Temperaturverteilung aus? Bislang gelang es der theoretischen Physik nicht, abschließende Antworten auf diese Fragen zu finden. Allerdings gewann man mit Hilfe von zeitlich und räumlich hoch aufgelösten dreidimensionalen Modellsimulationen in den letzten Jahren eine genauere Vorstellung der Phänomene im Erdinneren. Die Strömungen können jedoch nicht direkt beobachtet und die Temperaturen nicht direkt gemessen werden.

Will man diese Strömungen im Erdlabor erforschen, stößt man allerdings auf ein Problem: die Schwerkraft. Sie tritt als annähernd homogene, senkrecht nach unten wirkende Kraft auf. Die realen Verhältnisse sind jedoch ganz anders und lassen sich nicht unter dem Einfluss irdischer Schwerkraft simulieren: Auf der „echten“ Erde herrscht Gravitation, die vom Erdmittelpunkt ausgeht und deren Stärke zur Erdkruste hin abnimmt. Dieses radiale Kraftfeld sorgt so für eine charakteristische Verteilung der Temperatur im Erdmantel und im äußeren Kern. Um die Bedingungen, wie sie auf der Erde herrschen, mit Hilfe einer „Miniatur-Erde“ zu untersuchen, muss dieses Modell unseren Heimatplaneten verlassen. Auf der ISS, wo sich Erdanziehung und Zentrifugalkraft die Waage halten, muss dieses radiale Kraftfeld innerhalb einer Apparatur künstlich erzeugt werden, um das Rätsel der Strömungs- und Temperaturverhältnisse im Erdinneren experimentell aufklären zu können.

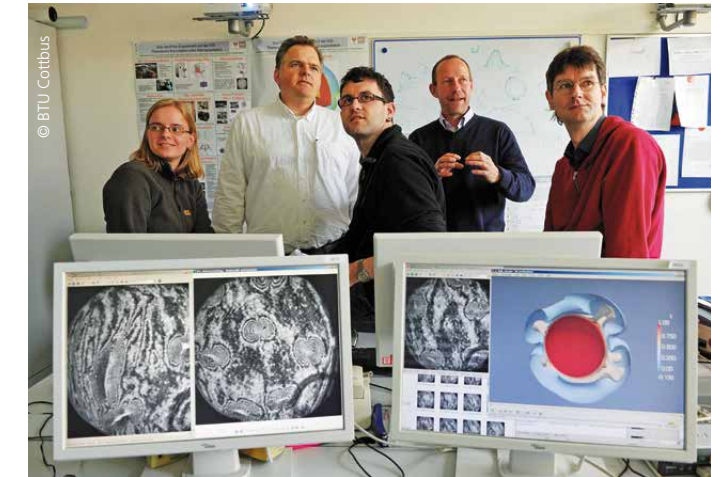
Experimentbeschreibung:

Genau aus dieser Idee heraus entstand die schuhkartongroße Apparatur namens „Geophysical Flow Simulation“ – kurz GeoFlow. Zwischen einer inneren, massiven Kugel und einer äußeren Hohlkugel befindet sich eine zähe dielektrische Ölschicht. Entsprechend den Temperaturverhältnissen im Erdinneren wird die innere Kugel geheizt und die äußere Hohlkugel gekühlt. Im Kugelspalt wird dann durch das Anlegen einer Hochspannung in Höhe von zehn Kilovolt ein unverzerrtes, zentralsymmetrisches Kraftfeld erzeugt, das die auf der Erde herrschende Schwerkraft simuliert. Eine Kamera oberhalb der „Mini-Erde“ zeichnet die Strömungsmuster auf, die während eines Experimentdurchlaufs auftreten. Die Kamera deckt dabei rund ein Sechstel der Kugeloberfläche ab, so dass man die vollständige Halbkugel mit insgesamt sechs Aufnahmen erfassen kann. Bei diesen Interferogramm-Aufnahmen werden zwei Lichtstrahlen einer externen Lichtquelle ausgesandt, von denen einer direkt in die Kamera gelenkt wird und der andere die GeoFlow-Apparatur durchläuft, bevor beide in der Kamera überlagert werden. Die

Die Erde passt in einen schuhkartongroßen Experimentcontainer: Die GeoFlow-Versuchsreihe erlaubt Einblicke in die Vorgänge im Inneren unseres Planeten.



Astronaut Greg Chamitoff installiert den GeoFlow-Experimentcontainer im Columbus-Modul der Raumstation.



Das GeoFlow-Team der BTU Cottbus ist sieben Tage die Woche rund um die Uhr im Einsatz, um die einkommenden Daten zu sichten. Sechs Mitarbeiter verarbeiten die Informationen, die ihnen 20 Sekunden nach dem Aufzeichnen auf der Raumstation zur Verfügung stehen, im Schichtbetrieb. Während GeoFlow II haben die Wissenschaftler ein Datenvolumen von mehr als 200 Gigabyte erhalten.

Streifenmuster (Interferogramme) vergleichen die Wissenschaftler mit Modellsimulationen und schließen so auf die Temperaturverteilung und die Strömungsverhältnisse innerhalb des Fluids.

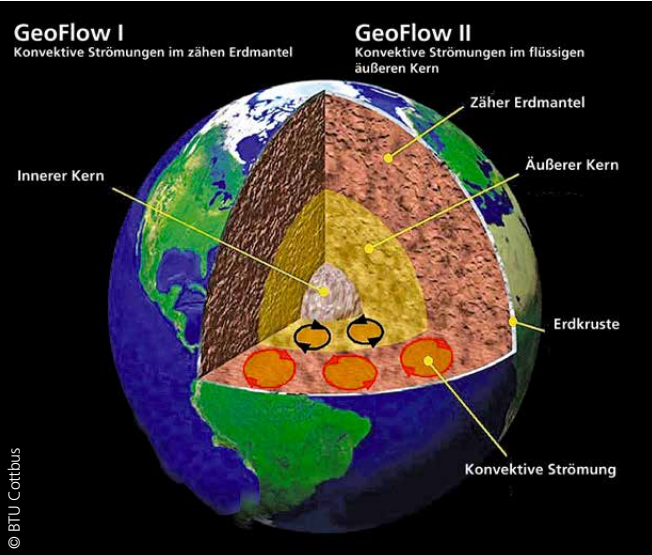
Der Experimentablauf wird nach dem Download der Daten vom Columbus-Modul zur NASA durch das deutsche Columbus-Kontrollzentrum in Oberpfaffenhofen, das italienische Microgravity Advanced Research and Support Centre MARS in Neapel, das spanische User Support und Operations Centre E-USOC in Madrid sowie einer eigens für GeoFlow eingerichtete Bodenstation an der BTU Cottbus überwacht. Die Telemetriedaten erreichen die Bodenstation mit einem zeitlichen Abstand von circa 20 Sekunden nach Start der Downloadsequenz. Parallel dazu werden die gesammelten Videoaufzeichnungen im Abstand von einigen Tagen heruntergeladen und ausgewertet.

Status und Ausblick:

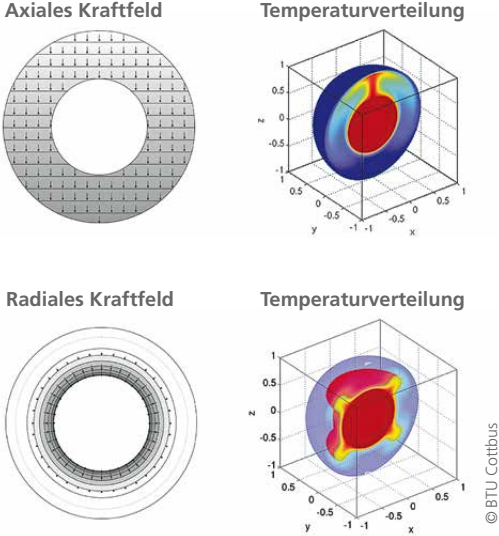
Das Experiment GeoFlow I, mit dem die konvektiven Strömungen im flüssigen Erdkern simuliert werden, wurde gemeinsam mit dem europäischen Columbus-Modul im Februar 2008 mit dem Space Shuttle Atlantis zur ISS gebracht und im Fluid Science Lab (FSL) von Columbus installiert. GeoFlow I lief von August 2008 bis Januar 2009 und lieferte in diesem Zeitraum eine Datenmenge von 15 Gigabyte. Im März 2009 wurde der Experimentcontainer mit dem Space Shuttle Discovery zur Erde zurückgebracht und dort umgebaut. Insbesondere wurde der Kugelspalt mit einem anderen Fluid befüllt, dessen Zähigkeit stark temperaturabhängig ist, um so im Rahmen des Nachfolgeexperiments GeoFlow II die Strömungen im flüssigen Erdmantel zu simulieren und so beispielsweise das physikalische Verständnis von Magma-Strömungen im Erdinneren zu verbessern.



Die schuhkartongroße „Mini“-Erde GeoFlow



Das Innere der Erde gleicht den Schichten einer Zwiebel. Die innerste Schicht bildet dabei den festen, sogenannten inneren Kern mit einem Radius von etwa 1.250 Kilometern. Er besteht hauptsächlich aus Eisen, Nickel und Silizium. Darüber befindet sich eine rund 2.200 Kilometer dicke Schicht aus flüssigem Eisen. Dieser äußere Kern, dessen bewegliche und elektrisch leitfähige Schicht die Quelle des Erdmagnetfeldes ist, wird vom Mantel abgelöst. Auf diesem liegt die nur circa 30 bis 60 Kilometer dicke Kruste. Wie der äußere Kern ist auch der hauptsächlich aus Silikaten und Oxiden bestehende Mantel flüssig, allerdings erheblich zähflüssiger als der Kern.



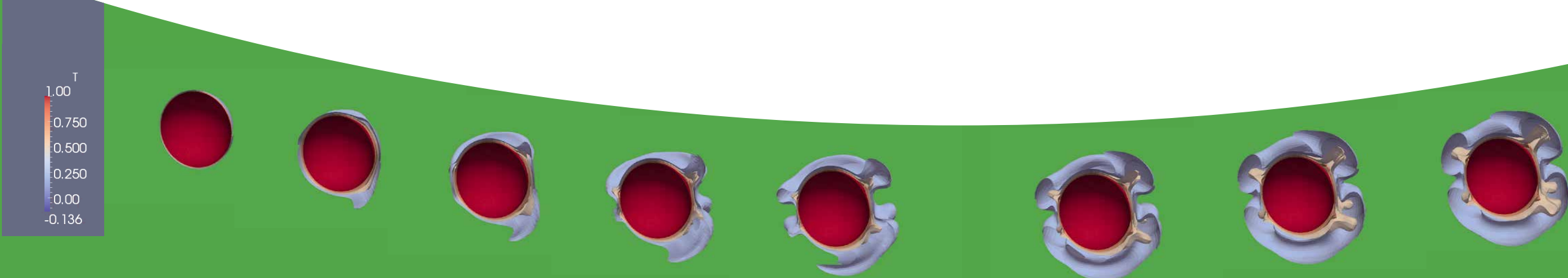
Das GeoFlow-Experiment würde auf der Erde völlig andere Ergebnisse als im Weltall zu Tage fördern: Im terrestrischen Labor tritt die Schwerkraft als annähernd homogene, senkrecht nach unten wirkende Kraft auf. Dieses axiale Kraftfeld hat unmittelbare Auswirkungen auf die Temperaturverteilung: Wärme steigt nach oben, während Kälte absinkt. Ganz im Norden des Globus würde demnach große Hitze herrschen, während die Temperatur nach Süden stark abnehmen würde. Auf der „echten“ Erde herrscht Gravitation, die vom Erdmittelpunkt ausgeht und deren Stärke zur Kruste hin abnimmt. Dieses radiale Kraftfeld sorgt so für eine gleichmäßigere Verteilung der Temperatur im Mantel und im äußeren Kern.

Im Februar 2011 wurde GeoFlow II mit dem europäischen Raumtransporter ATV-2 „Johannes Kepler“ zur ISS transportiert. Nach erfolgreicher Integration in das Fluid Science Lab (FSL) des Columbus-Moduls lief GeoFlow II erfolgreich von Mitte März 2011 bis Anfang Mai 2012, wobei mehr als 200 Gigabyte an wissenschaftlichen Daten gewonnen wurden. Parallel dazu wurden umfangreiche zwei- und dreidimensionale numerischen Simulationen durchgeführt, um die gewonnenen Experimentdaten mit den theoretischen Vorstellungen zu vergleichen. Die bisherigen Auswertungen zeigen dabei neben einigen überraschenden Ergebnissen für einen weiten Bereich des untersuchten Parameterraums gute Übereinstimmung zwischen dem Experiment und den theoretischen Vorstellungen über das Strömungsverhalten im Inneren der Erde.

Mitte 2012 genehmigte die ESA eine Nachfolgemission „GeoFlow IIb“, die zunächst von Mitte Dezember 2012 bis Anfang Mai 2013 lief. Neben Langzeitmessungen sollten bestimmte Parameterbereiche untersucht werden, die von GeoFlow II gar nicht oder nur grob abgedeckt wurden. Bis zum vorläufigen Ende von GeoFlow IIb wurden dabei circa 30 Prozent der geplanten Experimentläufe abgeschlossen. Die Fortführung von GeoFlow IIb ist für das Frühjahr 2014 geplant.

Außerdem ist bereits ein Nachfolgeexperiment GeoFlow III im Gespräch, das neben einem radialen auch über einen Temperaturgradienten zwischen Pol und Äquator des Erdmodells verfügen soll. Damit könnte man nach den Vorgängen im Erdinneren nunmehr die komplexen Strömungen in der Erdatmosphäre untersuchen, um so zum Beispiel die klimatischen Bedingungen und Veränderungen auf der Erde besser verstehen zu können.

Start GeoFlow I: 7. Februar 2008 / Space Shuttle Atlantis (STS-122); GeoFlow II: 16. Februar 2011 / ATV-2 Johannes Kepler	
ISS-Zeitraum	von August 2008 bis voraussichtlich Frühjahr 2014
Unterbringung	Fluid Science Lab (FSL) im Columbus-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Christoph Egbers
Einrichtung	Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Bereich	Geophysik, Fluidphysik
Partner	ESA; multinationales Team



Die Temperaturverteilung im Inneren der Erde ist nicht homogen. Computersimulationen berechnen die theoretische Temperaturverteilung, die dann mit den Daten von GeoFlow auf der ISS verglichen wird.

CCF: Untersuchung von kapillaren Kanalströmungen

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Im Benzintank eines Autos sammelt sich der restliche Treibstoff immer am Boden des Tanks und kann so von der Benzinpumpe vollständig zum Motor befördert werden. Kommt aber beispielsweise ein Raumfahrzeug in der antriebslosen Flugphase (Schwerelosigkeit) ins Taumeln, so beginnt der Treibstoff im nicht mehr vollständig gefüllten Tank unkontrolliert umher zu schwappen. Wie kann er unter diesen Bedingungen sicher zu den Steuerdüsen transportiert und wie können die Treibstoffleitungen blasenfrei gehalten werden? Welche maximalen Strömungsgeschwindigkeiten sind erreichbar, ohne dass der Flüssigkeitsstrom abreißt? Die Gleichungen der klassischen Strömungsmechanik beschreiben die wirkenden Kräfte und der Flüssigkeitsstrom wird heutzutage meistens auch numerisch simuliert. Eine Überprüfung der theoretischen Modelle kann allerdings nur durch Experimente unter Schwerelosigkeit erfolgen. Um Antworten auf diese Fragen zu finden, haben daher deutsche und US-amerikanische Forscher die Capillary Channel Flow (CCF)-Apparatur mit zwei unterschiedlichen Experimenteinheiten zur ISS geschickt.

Experimentbeschreibung:

Bei allen Systemen, die an Bord von Weltraumfahrzeugen eine Flüssigkeit enthalten, wie etwa Trinkwasserbehälter, Toiletten oder Treibstofftanks können Probleme während des Flüssigkeitstransports sowie mit dem Auftreten von Blasen entstehen. Die CCF-Apparatur simuliert den Flüssigkeitstransport in solchen Systemen unter den besonderen Bedingungen der Schwerelosigkeit. Sie besteht aus einer Pumpe, die aus einem Tank Modellflüssigkeit durch seitlich offene Leitungen – den sogenannten Kapillarkanälen – saugt. In der Experimenteinheit 1 besteht diese Leitung aus zwei parallelen Glasplatten, die durch Schließen eines Schiebers auch in einen U-förmigen Kanal umgewandelt werden kann. In der Experimenteinheit 2 besteht die Leitung aus einem V-förmigen Glaskanal. Die Wissenschaftler untersuchen wie sich unterschiedliche, offene Kanalformen auswirken und wie hoch jeweils die Pumpgeschwindigkeit sein darf, ohne dass Luftblasen in die Strömung eingesogen werden. Man spricht hier von der kritischen Strömungsgeschwindigkeit. In den Experimentserien werden die Länge der Kanäle sowie die Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit variiert. Bei Kanälen mit V-förmigem Querschnitt können zusätzlich noch Gasblasen mit steuerbarer Frequenz und Größe in die Flüssigkeit eingebracht werden. Das DLR Raumfahrtmanagement beauftragte EADS Astrium (heute Airbus Defence & Space) mit Entwicklung und Bau der Anlage. Die Mission selbst beruht auf einer Projektvereinbarung zwischen der NASA und dem DLR Raumfahrtmanagement, die im Februar 2007 in Kraft trat. Bereits drei Jahre später war die Anlage im Orbit – ein für Weltraumprojekte zügiger Ablauf, der durch eine ausgeprägte Partnerschaft aller Beteiligten gelang. Die NASA transportierte die Anlage mit dem Space Shuttle Discovery zur ISS und stellt bis heute sämtliche ISS-Ressourcen zur Verfügung. Die Apparatur ist in der Microgravity Science Glovebox (MSG) des Columbus-Moduls installiert. Das Versuchsteam besteht aus Wissenschaftlern des Zentrums für Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) der Universität Bremen und der Portland State University (PSU). Die Experimente laufen quasi in Echtzeit und ausschließlich ferngesteuert von den Bodenstationen an den beiden Universitätsinstituten ab. Auch sämtliche Messdaten werden über Telemetrie zum Boden übermittelt.



Status:

Am 5. April 2010 wurde die CCF-Hardware mit dem Space Shuttle Discovery (STS-131) zur ISS transportiert. Bis Ende 2013 haben die Wissenschaftler im deutsch-amerikanischen Kooperationsprojekt drei erfolgreiche, mehrmonatige Experimentserien mit beiden Experimenteinheiten durchgeführt. Eine weitere ist ab Spätsommer 2014 geplant.

Bisherige Ergebnisse:

In einem Parameterbereich, welcher auf der Erde nicht zugänglich ist, wurden kritische Strömungsgeschwindigkeiten für zahlreiche Kanallängen und drei unterschiedliche Kanalformen ermittelt. Die experimentellen Ergebnisse haben die zuvor entwickelte Theorie bisher voll bestätigt. Die Stoffeigenschaften der Modellflüssigkeit wie Zähigkeit, Dichte und Oberflächenspannung wurden so gewählt, dass sie in Kombination mit der Form des Testkanals realen Treibstofftransporten sehr ähnlich sind. Dadurch lassen sich die Ergebnisse vom experimentellen Modell auf der ISS relativ leicht auf den Tank in einem Raumfahrzeug übertragen.

Unter Schwerelosigkeit erfolgt die Trennung von Luft und Flüssigkeit mangels Auftrieb nicht automatisch, sondern muss aktiv durch Zentrifugieren oder ähnlich aufwendige Maßnahmen erreicht werden. Im CCF-Experiment wurde daher eine ganz neue Trennungsstrategie für ein Gas-Flüssigkeits-Gemisch unter Schwerelosigkeit demonstriert: Nimmt man einen V-förmigen Kapillarkanal und die „richtige“ Strömungsgeschwindigkeit, dann erfolgt die Trennung selbstständig aufgrund von Kapillarkräften.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Den vorhandenen Treibstoff möglichst vollständig auszunutzen, ist eine Herausforderung im Design von Raumfahrzeugen. Die Lebensdauer von Satelliten kann dadurch verlängert werden, weil sie länger stabil in ihrer Position bleiben. Spezielle kanalartige Strukturen in den Tanks sind beispielsweise geeignet, den Treibstoff durch Kapillarkräfte zum Tankauslass zu befördern, wo er vollständig abgepumpt werden kann. CCF hat dazu bereits wertvolle Grundlagenerkenntnisse geliefert. So hoffen die Wissenschaftler, maßgeschneiderte Treibstoffleitungen entwickeln zu können. Denkbar sind auch Verbesserungen von Flüssigkeitsströmungen im Mikroformat, den sogenannten Bio-Chips für ein biologisches Gesundheits-Screening.

Start

5. April 2010 / Space Shuttle Discovery (STS-131)

ISS-Zeitraum	seit April 2010 bis 2014/15
Unterbringung	Microgravity Science Glovebox (MSG) im Columbus-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Michael Dreyer; Prof. Dr. Mark Weislogel
Einrichtung	ZARM, Universität Bremen; Portland State University, USA
Bereich	Fluidphysik
Partner	DLR; NASA



Im Mission Control Center in Huntsville wurde eine zweite CCF Experimenteinheit in einem Modell der Microgravity Science Glovebox installiert. Diese zweite Einheit erlaubt Wissenschaftlern und Ingenieuren, vom Boden aus Versuchsszenarien zu simulieren.



Flüssigkeiten strömen in Schwerelosigkeit bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit unbeeinträchtigt konstant. Wird der Saugdruck der Pumpe soweit erhöht, so dass die Strömungsgeschwindigkeit ein bestimmtes Maß überschreitet, dann bilden sich am Rand der Apparatur Blasen und der Flüssigkeitsstrom reißt ab.



Der kanadische Astronaut Robert Thirsk installiert die SODI-Apparatur in der Microgravity Science Glovebox (MSG) im Columbus-Modul.



DCMIX: Diffusionsvorgängen in mehrkomponentigen Fluiden auf der Spur

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Durchmischen sich mit der Zeit zwei oder mehrere Stoffe wie Gase oder Flüssigkeiten durch die Verteilung der beteiligten Teilchen, handelt es sich um eine Diffusion. Sie wird durch mehrere Faktoren beeinflusst: Wärme, Konzentration, Druck und Schwerkraft. In einem Fluid (Flüssigkeit, Gas), das aus mehreren Bestandteilen zusammengesetzt ist, führt eine räumliche Änderung der Temperatur – der sogenannte Temperaturgradient – nicht nur zu einem Transport von Wärme, sondern auch zu einem Massentransport und damit auch zu Konzentrationsunterschieden zwischen den verschiedenen Komponenten. Diese sogenannte Thermodiffusion (Soret-Effekt) wurde bislang fast ausschließlich in zweikomponentigen Fluiden untersucht, obwohl insbesondere viele anwendungsrelevante Fluide wie Rohöl aus deutlich mehr als nur zwei Komponenten bestehen. Um diese experimentelle Lücke zu schließen und gleichzeitig bestehende theoretische Modelle zu überprüfen, braucht man Ergebnisse aus Thermodiffusions-Experimenten mit Fluiden, die wenigstens drei oder auch mehr Komponenten enthalten. Sie sollen auch dabei helfen, die Kompositionsvariationen in Erdöllagerstätten künftig besser zu verstehen.

Experimentbeschreibung:

Derartige Thermodiffusionsuntersuchungen werden im Experiment DCMIX mit Fluiden durchgeführt, die mindestens aus drei Komponenten bestehen (sogenannte ternäre Mischungen). Dazu dient die ESA-Apparatur Selectable Optical Diagnostics Instrument (SODI), die in der Microgravity Science Glovebox (MSG) im Columbus-Modul der ISS untergebracht ist. Die Versuchsserien müssen unter Schwerelosigkeit ablaufen, da nur unter dieser Umgebungsbedingung Störfaktoren wie Auftriebskonvektion und Ablagerung (Sedimentation) ausgeschaltet werden können. Das DCMIX-Experiment vereint Wissenschaftler-Teams aus Belgien, Deutschland, Frankreich, Japan, Kanada, Russland und Spanien.

Um Thermodiffusion in den dreikomponentigen Fluiden des DCMIX-Experiments zu untersuchen, bedient man sich der Methode der Laser-Interferometrie bei verschiedenen Wellenlängen (670 und 935 Nanometern). Dabei werden die Konzentrationsunterschiede der einzelnen Bestandteile eines ternären Fluids gemessen. Daraus lassen sich die jeweiligen Transportkoeffizienten der einzelnen Bestandteile ableiten. Während binäre Mischungen durch jeweils einen einzigen Diffusions- und Thermodiffusionskoeffizienten beschrieben werden können, benötigt man für ternäre Systeme bereits vier unabhängige Diffusions- und zwei Thermodiffusionskoeffizienten. Von entscheidender Bedeutung für die wissenschaftliche Analyse dieser Mikrogravitationsexperimente ist die hochgenaue Bestimmung der sogenannten Kontrastfaktoren. Sie sind ein Maß für

die Änderung des Brechungsindex mit der Temperatur beziehungsweise der Konzentration eines Fluids. Anders als die Diffusionskoeffizienten können diese Kontrastfaktoren im Erdlabor vermessen werden. Hierzu bedient man sich ebenfalls der Laser-Interferometrie. Die Bayreuther Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Werner Köhler, die maßgeblich an DCMIX mitwirkt, hat daher eine eigene Apparatur entwickelt, um die Kontrastfaktoren über einen großen Wellenlängenbereich präzise zu vermessen.

Status:

Ein erster Experimentdurchgang von DCMIX konnte von Dezember 2011 bis Mitte Januar 2012 erfolgreich absolviert werden. Die Vorbereitung und Durchführung des Experiments an Bord der ISS oblag dabei insbesondere dem ESA-Astronauten André Kuipers. Die auf Festplatten gespeicherten Daten wurden den beteiligten Wissenschaftlern auf der Erde im Sommer 2012 zur weiteren Auswertung ausgehändigt. Die Auswertung der Ergebnisse von DCMIX-1 dauert derzeit noch an. Von Dezember 2013 bis Ende Januar 2014 lief der zweite Experimentdurchgang mit dem Namen DCMIX-2 unter Federführung einer belgischen Arbeitsgruppe. Der Datentransfer zur Erde sowie die Datenauswertung sollen in den kommenden Monaten erfolgen. Die nächste Serie namens DCMIX-3 soll im November 2014 gestartet werden. Sie wird federführend von der Bayreuther Forschergruppe koordiniert. Weitere DCMIX-Experimentläufe sind für die kommenden Jahre bereits geplant.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Zunächst steht bei DCMIX der grundlagenphysikalische Erkenntnisgewinn zum Diffusionsprozess anhand von organischen Modellflüssigkeiten im Vordergrund. Eine äußerst wichtige Rolle spielt DCMIX bei der Etablierung verlässlicher konvektionsfreier Referenzdaten für spätere weiterführende Experimente am Boden. Mit dem Erfolg von DCMIX ist aber auch die Hoffnung verbunden, einer weiteren Untersuchung technologisch relevanter mehrkomponentiger Fluide Vorschub zu leisten. Wirtschaftliches Potenzial wird beim verbesserten Verständnis von Kompositionsvariationen in Erdöllagerstätten aber auch bei der Fraktionierung von mehrkomponentigen Polymerlösungen erwartet.



ESA-Astronaut André Kuipers mit mehreren Einschüben der SODI-Apparatur, die im November 2011 auf die Raumstation gebracht wurden

Start

3. Februar 2010 / Progress 36P

ISS-Zeitraum	seit Herbst 2011
Unterbringung	Microgravity Science Glovebox (MSG) im Columbus-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Werner Köhler
Einrichtung	Physikalisches Institut der Universität Bayreuth
Bereich	Fluidphysik
Partner	ESA; multinationales Topical Team



Der italienische ESA-Astronaut Luca Parmitano hat die Proben für die FASES-Anlage aus dem europäischen Weltraumtransporter ATV-4 geholt und die Anlage drei Stunden lang im Columbus-Labor installiert.



FASES: Stabilität von Emulsionen

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Emulsionen spielen in vielen Bereichen der Industrie eine wichtige Rolle, so in der Lebensmittelproduktion, der kosmetischen und pharmazeutischen Industrie, aber auch in der Ölindustrie. Ein Problem der Emulsionstechnologie ist die Stabilitätskontrolle. Denn viele dieser speziellen Mischungen müssen in Lebensmitteln, Kosmetika und pharmazeutischen Produkten lange Zeit hochstabil bleiben. Jüngste Studien haben gezeigt, dass die Emulsionswissenschaft sowohl aus Ergebnissen der klassischen, physikalisch-chemischen Grundlagenforschung an Oberflächen als auch von neuerdings durchgeführten Experimenten unter Schwerelosigkeit profitiert. Forscher wollen vor allem wissen, welche Effekte an den Grenzflächen der sich vermischenden Flüssigkeiten ablaufen. Die Eigenschaften dieser sogenannten Flüssig-Flüssig-Grenzflächen spielen eine Schlüsselrolle im Verhalten von Emulsionen – insbesondere bezüglich ihrer Stabilisierung oder Destabilisierung. Emulsionen sind Mixturen aus zwei sich nicht ohne weiteres zu vermischenden, eigentlich ineinander unlöslichen Flüssigkeiten, bei dem die eine in Form kleiner Tröpfchen in der anderen verteilt ist. Die Flüssigkeiten mischen sich nicht freiwillig, sondern benötigen dazu ein Hilfsmittel: Erst wenn man Tenside – also beispielsweise Spülmittel – hinzugibt, vermengen sich die beiden Flüssigkeiten sehr fein. Die Tensidmoleküle reichern sich auf der Oberfläche der emulgierten Tröpfchen an und stabilisieren die Mischung. Auch die dynamische Elastizität der Grenzflächen – die sogenannte dynamische Oberflächenspannung – nimmt Einfluss auf die Stabilität einer Emulsion. Weil Auftrieb oder Absinken der emulgierten Tröpfchen in der Schwerelosigkeit verhindert wird, bietet die Weltraumforschung eine einzigartige Möglichkeit, Untersuchungen aller grundlegenden Mechanismen (Ostwald-Reifung, Koaleszenz und Aggregation) im Zusammenhang mit der Stabilität von Emulsionen durchzuführen. Experimente in der FASES-Anlage sollen den Zusammenhang zwischen Stabilität der Emulsion und den physikalisch-chemischen Eigenschaften der Tröpfchen-Grenzflächen unter Schwerelosigkeit herausfinden.

Experimentbeschreibung:

FASES wird im Fluid Science Labor (FSL) der ESA im europäischen Columbus-Modul betrieben. Die 35 Kilogramm schwere und 40 x 28 x 27 Zentimeter große FASES-Box beherbergt 44 kleine, mit Flüssigkeiten gefüllte Experimentzellen, zwei Diagnose-Einheiten und eine Fördereinrichtung. Für FASES wurden zwei unterschiedliche Typen

von Experimentzellen entwickelt, die mit exakt definierten, in Zusammensetzung und Konzentration unterschiedlichen Gemischen aus hochreinem Wasser, Paraffin und Hexan gefüllt sind. Ein „Förderband“ transportiert die je einen Milliliter fassenden Experimentzellen an zwei Messstationen vorbei. An den beiden Diagnoseinstrumenten angekommen, laufen die eigentlichen Messungen ab. So ist die Thermal Conditioning Unit (TCU) mit angeschlossenem Mikroskop für die transparente Probengruppe zuständig. Mit der TCU wird die zeitliche Änderung der Tröpfchengrößenverteilung gemessen. Im Differential Scanning Calorimeter (DSC) werden die nicht-transparenten Proben in festgelegten Versuchsabläufen untersucht. Gemessen werden Unterschiede von Wärmeströmen in einer Probe beim Durchfahren definierter Temperaturrampen. Wiederholte Messungen in definierten zeitlichen Abständen lassen dann ebenfalls auf die zeitliche Änderung der Tröpfchengrößenverteilung schließen. FASES wurde kurz nach dem Andocken des europäischen Weltraumtransporters ATV-4 an der Raumstation von der Crew entladen. Die haltbarkeitsbeschränkten Zellen mussten zügig nach ihrer Ankunft auf der ISS im FSL verarbeitet werden. Die weiteren Experimente sind im Zeitraum von sechs bis acht Monaten geplant. Die Daten werden in dieser Zeit kontinuierlich zur Erde gesandt und an die Wissenschaftler zur Auswertung verteilt.

Status:

Der Transport zur ISS erfolgte mit ATV-4 Anfang Juni 2013. Die Messkampagnen erstrecken sich von September 2013 bis Mitte 2014.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Aus den ISS-Experimenten werden grundlegende Erkenntnisse und Daten zum dynamischen Verhalten von Emulsionen erwartet. Damit können dann Vorhersagen zur Produktion maßgeschneiderter Mischungen gemacht werden, was für industrielle Anwendungen interessant ist.

Start
6. Juni 2013 / ATV-4 Albert Einstein

ISS-Zeitraum	Mitte 2013 bis 2014
Unterbringung	Fluid Science Lab (FSL) im Columbus-Modul
Experimentator	Dr. Reinhard Miller
Einrichtung	Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung
Bereich	Fluidphysik
Partner	ESA; multinationales Topical Team



FASTER: Untersuchung von Flüssig-Flüssig-Grenzflächen

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Emulsionen spielen in vielen Bereichen der Industrie eine wichtige Rolle, so in der Lebensmittelproduktion, der kosmetischen und pharmazeutischen Industrie, aber auch in der Ölindustrie. Ein Problem der Emulsionstechnologie ist die Kontrolle deren Stabilität. Denn viele dieser speziellen Mischungen müssen in Lebensmitteln, Kosmetika und pharmazeutischen Produkten lange Zeit hochstabil bleiben. Jüngste Studien haben gezeigt, dass die Emulsionswissenschaft sowohl aus Ergebnissen der klassischen physikalisch-chemischen Grundlagenforschung an Oberflächen als auch von neuerdings durchgeführten Experimenten unter Schwerelosigkeit profitiert. Forscher wollen vor allem wissen, welche Effekte an den Grenzflächen der sich vermischenden Flüssigkeiten ablaufen. Die Eigenschaften dieser sogenannten Flüssig-Flüssig-Grenzflächen spielen eine Schlüsselrolle im Verhalten von Emulsionen, insbesondere bezüglich ihrer Stabilisierung oder Destabilisierung. Emulsionen sind Mixturen aus zwei sich nicht ohne weiteres zu vermischenden, eigentlich ineinander unlösbaren Flüssigkeiten, bei dem die eine in Form kleiner Tröpfchen in der anderen verteilt ist. Die Flüssigkeiten mischen sich nicht freiwillig, sondern benötigen dazu ein Hilfsmittel: Erst wenn man Tenside – also beispielsweise Spülmittel – hinzugibt, vermengen sich die beiden Flüssigkeiten sehr fein. Die Tensidmoleküle reichern sich auf der Oberfläche der emulgierten Tröpfchen an und stabilisieren die Mischung. Auch die dynamische Elastizität der Grenzflächen – die sogenannte dynamische Oberflächenspannung – nimmt Einfluss auf die Stabilität einer Emulsion. Weil Auftrieb oder Absinken der emulgierten Tröpfchen in der Schwerelosigkeit verhindert wird, bietet die Weltraumforschung eine einzigartige Möglichkeit, Untersuchungen aller grundlegenden Mechanismen (Ostwald-Reifung, Koaleszenz und Aggregation) im Zusammenhang mit der Stabilität von Emulsionen durchzuführen.

Experimentbeschreibung:

FASTER ist ein Tensiometer zur Messung der dynamischen Eigenschaften von Wasser-Öl-Grenzflächen an einzelnen, suspendierten Tropfen. In der Anlage wird ein Tropfen (zum Beispiel Wasser) in einer mit Matrixflüssigkeit (zum Beispiel Öl) gefüllten Kammer erzeugt. Anschließend wird ein oberflächenaktiver Stoff injiziert. Ein Piezoelement erzeugt periodische Druckänderungen in der Matrixkammer, die das Tropfenprofil verändern. Dabei wird die Druckdifferenz zwischen Tropfen und Matrix mit Sensoren detektiert und das Tropfenprofil mit einer Videokamera aufgezeichnet. Die Wissen-

schaftler werden 22 Proben unterschiedlicher Zusammensetzung bei drei verschiedenen Temperaturen und drei unterschiedlichen Amplituden der Druckänderung vermessen. Die FASTER-Apparatur ist ein Experimenteinschub für das European Drawer Rack (EDR) im Columbus-Modul und wird von der Bodenstation in einem weitgehend automatischen Modus betrieben.

Status:

Das Raumschiff CRS3 des kommerziellen, US-amerikanischen Startdienstleisters SpaceX startete am 18. April 2014 mit der FASTER-Apparatur vom Weltraumbahnhof Cape Canaveral zur ISS. Im ersten Halbjahr 2014 sollen bereits die ersten Messungen beginnen.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Aus den ISS-Experimenten werden grundlegende Erkenntnisse und Daten zum dynamischen Verhalten von Emulsionen erwartet. Die Forscher hoffen, einen tieferen Einblick in die Adsorptionsdynamik von Molekülen an der Grenzschicht und den Tensidtransport zu bekommen. Die Rolle oberflächenaktiver Additive in der Grenzflächenrheologie zur Stabilisation von Suspensionen soll aufgeklärt werden. Damit können dann Vorhersagen zur Produktion maßgeschneiderter Mischungen gemacht werden, was für industrielle Anwendungen interessant ist.

Start 18. April 2014 / Falcon 9 (SpaceX CRS3)	
ISS-Zeitraum	seit April 2014
Unterbringung	European Drawer Rack (EDR) im Columbus-Modul
Experimentator	Dr. Reinhard Miller
Einrichtung	Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung
Bereich	Fluidphysik
Partner	ESA; multinationales Topical Team



Am 20. April 2014 erreichte der kommerzielle Weltraumtransporter Dragon (SpaceX CRS3) mit der FASTER-Hardware die ISS.



Raumfahrtmedizin – Die Geheimnisse unseres Körpers im Zeitraffer lüften

Was haben Astronauten und Kosmonauten mit älteren Menschen auf der Erde gemeinsam? In der Schwerelosigkeit des Weltraums läuft im Zeitraffer dasselbe ab, was Menschen beim Alterungsprozess auf der Erde erleben: Muskelabbau, Osteoporose, Rückenbeschwerden, Kreislauf- und Orientierungsprobleme, zunehmende Kraftlosigkeit sowie Probleme im Immunsystem. Daher können in der Raumfahrtmedizin an gesunden Astronauten irdische Krankheiten und Alterungsphänomene studiert werden, um so die Funktionen vieler Systeme des menschlichen Körpers und ihr faszinierendes Zusammenspiel erst richtig zu verstehen. Die neuen Erkenntnisse über die Wirkung des Salzgehalts in der Nahrung auf das Zusammenspiel von Muskel- und Knochenstoffwechsel, Bluthochdruck und Immunsystem sind nur ein aktuelles Beispiel. Zudem werden neue Trainingsmethoden erarbeitet, um die Astronauten im Weltall gesund und leistungsfähig zu erhalten. Sie werden auch für den Menschen auf der Erde von großem Nutzen sein und zum Beispiel in Trainingspläne für Sportler oder in Rehabilitationsmaßnahmen einfließen. Und nicht zuletzt: Innovative, nicht-invasive Diagnostikgeräte und neue Technologien werden für den Einsatz im Weltraum entwickelt, die zunehmend ihren Weg auch in den Klinikalltag finden. Das 3D-Eye-Tracking-Device (3D-ETD) mit seinem Einsatz in der Laserhornhaut-Chirurgie und der nicht-invasive Thermosensor zur Messung der Körperkerntemperatur mit Anwendungsmöglichkeiten bei Herztransplantationen oder im Neugeborenen-Inkubator sind zwei prominente Beispiele dafür.

Insgesamt 19 Experimente zu humanphysiologischen Themen wurden bislang unter Federführung deutscher Wissenschaftler durchgeführt oder laufen derzeit noch auf der ISS. Bei diesen Projekten dienen Astronauten und Kosmonauten nicht nur als verlängerter Arm der Wissenschaftler: Sie stellen sich auch als Versuchspersonen zur Verfügung. Im Dienst der medizinischen Forschung im Weltraum und speziell auf der ISS helfen Astronauten und Wissenschaftler dabei, der globalen Herausforderung nach einem mobilen und möglichst ansprechenden Leben in einer immer älter werdenden Gesellschaft zu begegnen.



PMDIS und TRAC: Feinmotorik auf dem Prüfstand

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Als der deutsche ESA-Astronaut Thomas Reiter nach seiner erfolgreichen Astrolab-Mission mit dem amerikanischen Space Shuttle Discovery (STS-116) kurz vor Weihnachten 2006 zur Erde zurückkehrte, markierte dies gleichzeitig den Beginn von PMDIS/TRAC (Perceptual Motor Deficits in Space/Test of Reaction and Adaptation Capabilities). Das deutsch-kanadische Experiment war ein gemeinsames Projekt der Deutschen Sporthochschule (DSHS) in Köln und der York University Toronto unter Beteiligung der NASA. Das DLR hat im Wesentlichen die Entwicklung der Experimentanlage durch die deutsche Raumfahrtindustrie sowie die Forschung an der Sporthochschule unterstützt. Kanada stellte als ISS-Partner die notwendigen Ressourcen bereit. Bei dem Experiment PMDIS/TRAC sollte die Koordination von Bewegungen während der Anpassungsprozesse an die Schwerelosigkeit und nach der Rückkehr zur Erde analysiert werden. Insbesondere untersuchten die Kölner Sportmediziner, wie sich die manuelle Geschicklichkeit von Astronauten im Laufe einer Weltraummission verändert.

Experimentbeschreibung:

Beim deutschen TRAC-Experiment mussten die Astronauten vor, während und nach der Mission mit der linken Hand auf einer Fünf-Knopf-Box verschiedene Reaktionstests und mit der rechten Hand mittels eines Joysticks eine Folgeaufgabe durchführen. Dabei erfolgten die Reaktions- und Folgeaufgaben sowohl separat als auch gleichzeitig.

Status:

Das Experiment wurde auf der ISS im Zeitraum Dezember 2006 bis Juli 2007 an drei Astronauten durchgeführt und ist abgeschlossen.

Ergebnisse:

Das Experiment baute auf früheren Forschungsergebnissen der Arbeitsgruppen auf. Während der Spacelab-Mission Neurolab im Jahre 1998 und auf späteren Parabelflügen hatten die Wissenschaftler herausgefunden, dass sich Versuchspersonen in Schwerelosigkeit mehr anstrengen: Sie stellen für die Lösung einer Aufgabe also mehr Rechenkapazität im Gehirn zur Verfügung, um vergleichbar gute Ergebnisse wie unter normalen Schwerkraftbedingungen zu erzielen. Für Langzeitastronauten gelten diese Ergebnisse offenbar nicht: Bei ihnen war die Feinmotorik über einen längeren Zeitraum beeinträchtigt und normalisierte sich auf der ISS in Schwerelosigkeit nur langsam. Im Detail zeigte sich, dass Reaktionszeit und Folgefehler unter Doppeltätigkeit höher waren als unter Einzeltätigkeit, wobei die Reaktionszeiten vor, während und nach der Mission vergleichbar waren. Die Folgefehler nahmen am Anfang der Schwerelosigkeit deutlich zu und normalisierten sich nur sehr langsam. Die Schwerelosigkeit ist also für die Feinmotorik eine Herausforderung, die nicht durch einen erhöhten kognitiven Aufwand zu kompensieren ist.

NASA-Astronautin Sunita Williams mit dem TRAC-Experiment im Destiny-Modul der ISS

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Die Ergebnisse aus diesen Experimenten sind für die Planung künftiger bemannter Weltraummissionen von Bedeutung. Sie führen zum Beispiel zu der Empfehlung, Bedienelemente größer und ergonomisch besser zu gestalten, um die reduzierte manuelle Geschicklichkeit der Astronauten zu berücksichtigen und tragen auch zum besseren Verständnis der Bewegungskontrolle bei. Generell ist das Thema „Motorisches Lernen“ – nicht zuletzt vor dem Hintergrund einer alternden Gesellschaft – derzeit ein intensiv untersuchtes Feld der neurowissenschaftlichen Forschung. Eine vergleichende Studie an Senioren und jungen Menschen bestätigte im Nachgang des ISS-Experiments die Defizite in der Greifmotorik bei Senioren sowie die Nützlichkeit bestimmter Trainingsmethoden.

Start 9. Dezember 2006 / Space Shuttle Discovery (STS-116)	
ISS-Zeitraum	Dezember 2006 bis Juli 2007
Unterbringung	Destiny-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Otmar Bock
Einrichtung	Deutsche Sporthochschule (DSHS) Köln
Bereich	Humanphysiologie
Partner	CSA; NASA



Astronaut Clayton Anderson führt das Perceptual-Motor Deficits in Space (PMDIS) Experiment im US-amerikanischen Destiny-Labor durch.



Die amerikanische NASA-Astronautin Sunita Williams beim Training für das deutsch-kanadische Experiment PMDIS/TRAC während der Mission STS-116



An Bord der ISS testet der Kosmonaut Juri Malentschenko Pneumocard – ein einfaches, robustes und zuverlässiges Gerät zur Kreislaufdiagnostik.

Puls und Pneumocard: Kreislaufregulation im Weltraum

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Kurz- und Langzeit-Raumflüge haben Auswirkungen auf die Kreislaufregulation der Astronauten. Die fehlende Schwerkraft verursacht eine rasche Verschiebung des Blutvolumens in die obere Körperhälfte. Parallel dazu kommt es zu Veränderungen der Regulation des autonomen, nicht willentlich beeinflussbaren Nervensystems. Auch das Herzkreislaufsystem passt sich an die fehlende Schwerkraft an. Nach der Rückkehr der Astronauten zur Erde wird es praktisch schlagartig wieder mit der Schwerkraft konfrontiert. Dadurch treten in den ersten Tagen oft Kreislaufstörungen auf. Um diese Anpassungsprozesse individuell zu erfassen, werden nicht-invasive Methoden zur Überwachung der Kreislauffunktion eingesetzt und in der Auswertung miteinander kombiniert. Ähnliche Kreislaufprobleme wie bei den Astronauten nach der Landung können auch bei Patienten beobachtet werden. Die Wissenschaftler wollen durch die Experimente Puls und Pneumocard die Ursachen von Kreislaufstörungen im Weltall besser verstehen, um ihnen noch effektiver vorzubeugen. Die Ergebnisse sollen auch für diagnostische und therapeutische Konzepte zur Behandlung von Patienten auf der Erde genutzt werden.

Experimentbeschreibung:

Die Kreislaufexperimente mit den Geräten Puls und Pneumocard wurden vor der Mission, monatlich während der Mission und zweimal in der ersten Woche nach der Landung durchgeführt. Aufgezeichnet wurden ein Elektrokardiogramm (EKG), die Atemfrequenz, der Fingerpuls, ein Impedanzkardiogramm zur Bestimmung des Schlagvolumens des Herzens sowie ein Seismokardiogramm zur Bestimmung der Herzzeitintervalle.

Status:

Das Experiment Puls wurde im Zeitraum 2002 bis 2007 an insgesamt acht Kosmonauten durchgeführt. Das Experiment Pneumocard wurde seit März 2007 an insgesamt 25 Kosmonauten durchgeführt.

Ergebnisse:

Die Herzfunktion, der Blutdruck sowie die Herz- und Atemfrequenz passen sich erstaunlich schnell und gut an die neuen Bedingungen im Weltraum an. Nach etwa drei Monaten scheint es zu einer Veränderung der Anpassungsprozesse zu kommen. Als Ursache dafür werden strukturelle Veränderungen des Herzens und der Gefäße diskutiert. Die weitaus stärksten Abweichungen treten bei den Astronauten nach der Landung auf. Die an die lange Schwerelosigkeit angepassten Organsysteme werden schlagartig wieder der Schwerkraft ausgesetzt. Jedoch benötigt die notwendige Rückanpassung Zeit, die nur durch gezieltes Training verringert werden kann. Die Untersu-

chungsergebnisse zeigen, dass sich das Herzkreislaufsystem schon in der ersten Woche stabilisieren kann – ein Beweis für die Effektivität der ISS-Trainingsprogramme. Allerdings waren große individuelle Unterschiede bei den Kosmonauten zu erkennen. Die Wissenschaftler – ermutigt durch die bisherigen Ergebnisse – hoffen, Astronauten und Kosmonauten in verschiedene regulatorische Typen einteilen zu können und sie dementsprechend während und nach einer Mission individuell noch besser zu betreuen.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen haben neue Fragestellungen aufgeworfen, die in Folgeprojekten in der Schwerelosigkeit untersucht werden sollen. Darüber hinaus können die entwickelten Untersuchungs- und Auswertungsmethoden auch an gesunden Probanden und Patienten auf der Erde eingesetzt werden – zum Beispiel in der Früherkennung von Störungen der Kreislaufregulation in der Präventionsmedizin, der Bestimmung des Trainingszustandes in der Sportmedizin oder der Verlaufskontrolle von Kreislaufpatienten in der Rehabilitationsmedizin.

ISS-Zeitraum	Puls: November 2002 bis Februar 2007 Pneumocard: seit März 2007 bis Oktober 2012
Unterbringung	russischer Teil der ISS
Experimentator	Dr. Jens Tank; Dr. Roman M. Baevsky
Einrichtung	Medizinische Hochschule Hannover; IBMP Moskau
Bereich	Humanphysiologie
Partner	Roskosmos; IBMP Moskau



Das Experiment Puls wurde im Zeitraum 2002 bis 2007 an insgesamt acht Kosmonauten durchgeführt.





Diese Komponenten des DLR-HealthLabs trugen die Astronauten während des Experiments am Körper.



Der russische Kosmonaut Oleg Kononenko mit dem Experiment HealthLab auf der Internationalen Raumstation

HealthLab: Mentale und motorische Leistungsfähigkeit unter Extrembedingungen

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Vieles deutet darauf hin, dass das Autonome, nicht willentlich beeinflussbare Nervensystem auf psychische Belastung wie etwa Stress bei verschiedenen Menschen unterschiedlich reagiert. So erhöht sich bei vielen Personen der Blutdruck, einige reagieren mit Schweißausbrüchen und andere verspüren Magendruck. Man nennt dies das „Reaktionsmuster des Autonomen Nervensystems“. Diese Erfahrungen konnten bislang jedoch nicht mit einer standardisierten Versuchsanordnung durch messbare Daten bestätigt werden – weder im Weltraum noch auf der Erde. Astronauten eignen sich besonders gut, um die Reaktionen des Autonomen Nervensystems zu testen, denn Weltraummissionen sind nicht nur physiologisch, sondern auch psychisch eine große Herausforderung. Dabei sind Andockmanöver besonders wichtig, denn sie sind für den Erfolg einer ganzen Mission entscheidend. Sie fordern die Astronauten mental und motorisch in hohem Maße, da sie zeitgleich alle sechs Freiheitsgrade im Raum kontrollieren müssen. Zum Vergleich: Beim Autofahren ist man lediglich mit zwei unabhängigen Freiheitsgraden konfrontiert, beim Fliegen eines Flugzeuges mit vier. Im Projekt HealthLab des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin und des Instituts für Biomedizinische Probleme (IBMP, Moskau) wurden Raumfahrer der Stresssituation eines von Hand zu steuernden, fiktiven Andockmanövers eines Raumschiffs an eine Raumstation ausgesetzt. Dabei wurden ihre psychischen und physiologischen Reaktionen gemessen, um die Leistungsfähigkeit zu ermitteln. So kann objektiv entschieden werden, welcher Astronaut in einer konkreten Situation am besten in der Lage ist, das nächste reale Docking durchzuführen. Dazu ist bei ausreichend guter Genauigkeit auch eine ausreichende innere Ruhe erforderlich.

Experimentbeschreibung:

HealthLab besteht aus einer Vielzahl kleiner Messmodule, die am Körper getragen werden. Sie erfassen gleichzeitig nicht-invasiv mehr als zehn Werte wie beispielsweise Blutdruck, Puls, Atmung und Stimme. Aus diesen physiologischen Parametern wird die Beanspruchung des Kosmonauten während des Dockingtrainings ermittelt.

Status:

Die Messungen auf der ISS begannen im Sommer 2008 im Inkrement 17. Sie wurden im Sommer 2011 abgeschlossen. Eine Erweiterung auf das Training mit dem kanadischen Roboterarm Canadarm 2 ist mit den russischen Partnern und der kanadischen

Raumfahrtagentur in Vorbereitung. Auf der Erde wurden parallel zu den Weltraumuntersuchungen entsprechende Experimente im Labor, im Parabelflug und unter Langzeitisolation (Mars500) durchgeführt, um die Datenbasis zu erweitern.

Ergebnisse:

Die bisherigen Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass alle russischen Kosmonauten deutlich besser für das Docking ausgebildet waren als während der MIR-Missionen. Damals waren noch primär die Kommandeure zum Docking befähigt.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Mit HealthLab wurde ein diagnostisches Verfahren entwickelt, mit dessen Hilfe die Zuverlässigkeit von Handlungen unter Stress in bestimmten Situationen vorhergesagt werden kann. So lässt sich beispielsweise die Beanspruchung von Menschen ermitteln, die eine hohe berufliche Verantwortung wie Fluglotsen, Piloten oder Sprengstoffexperten tragen. Erste Tests unter extremen Bedingungen an AWACS- und Hubschrauber-Piloten bei der Deutschen Luftwaffe verliefen erfolgreich. Die neueste Erfolgsmeldung kommt aus dem Curacao Dolphin Therapy Center, wo die Wirksamkeit der sogenannten Delfin-Therapie an Kindern mit Autismus (Asperger) oder Down-Syndrom getestet wurde.

Start 14. Mai 2008 / Progress 29P	
ISS-Zeitraum	Juni 2008 bis Juni 2011
Unterbringung	russischer Teil der ISS
Experimentator	Dr. Bernd Johannes; Dr. V. Salnitsky
Einrichtung	DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln; IBMP Moskau
Bereich	Humanphysiologie
Partner	Roskosmos; IBMP Moskau

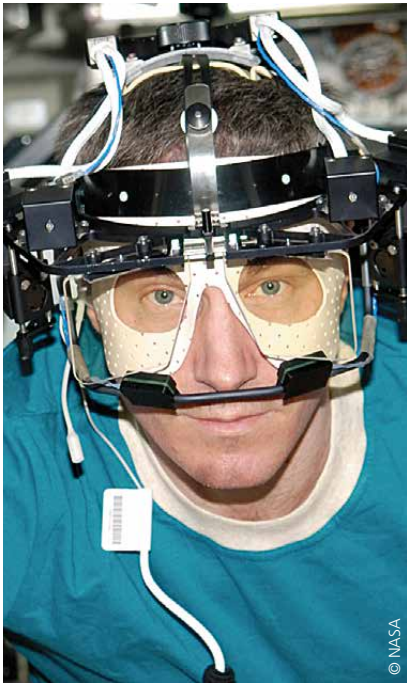


Erste Tests unter extremen Bedingungen an AWACS-Piloten bei der Deutschen Luftwaffe verliefen erfolgreich.



Während des Langzeit-Isolationsexperiments Mars500 mussten die Bewohner der Weltraum-WG ihre mentale und motorische Leistungsfähigkeit im HealthLab-Experiment unter Beweis stellen.





Der russische Kosmonaut Sergey Krikalev führte ein Experiment mit dem ETD durch. Das wohl umfangreichste, abgeschlossene deutsche Experiment der Raumfahrtmedizin befasste sich mit der Bewegungskrankheit – auch Kinetose genannt.

3D-Eye-Tracking-Device (3D ETD): Veränderungen des Gleichgewichtssystems in der Schwerelosigkeit

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

3D-Eye-Tracking-Device (3D-ETD) befasste sich mit der Bewegungskrankheit – auch Kinetose genannt. Die auftretenden Probleme bestehen aus einer Reihe von Symptomen wie Hautblässe, kalter Schweißausbruch, Übelkeit und Erbrechen. Zusätzlich stellt sich oft ein Gefühl von Lethargie und Müdigkeit ein. Diese Phänomene treten häufig bei Schiffsreisen auf und werden daher auch als See- oder Reisekrankheit bezeichnet. Treten bei Astronauten gleiche Symptome aufgrund von veränderten Schwerkraftbedingungen auf, spricht man von Weltraumkrankheit. Die allgemein anerkannte Ursache für die Kinetose ist ein sensorischer Konflikt, bei dem vorwiegend zwei verschiedene Systeme des Körpers „konkurrieren“ – einerseits der Gleichgewichtssinn (vestibuläres System im Innenohr), der zu jeder Zeit die Lage des Kopfes zur Schwerkraft erfasst, andererseits das visuelle System. Liefern uns beide widersprüchliche Informationen, kann es zu einem sensorischen Konflikt kommen. So übermittelt das visuelle System in der Schwerelosigkeit die üblichen Informationen, während das Gleichgewichtsorgan keine Reizung über unsere gewohnte Ausrichtung zur Schwerkraft erfährt. 3D-ETD sollte den Ursachen für die Kinetose auf den Grund gehen.

Experimentbeschreibung:

Die Untersuchung des Gleichgewichtssystems erfolgt in der klinischen Diagnose oft mittels der Messungen der Augenbewegungen. Vestibular-Apparat und Augen sind bei Mensch und Tier evolutionsbedingt eng verschaltet. Eine Bewegung des Kopfes melden die Schwerkraftsensoren im Innenohr sofort ans Gehirn. Binnen Millisekunden geht dann ein unwillkürliches Nervensignal an die Augen, die sich automatisch in die entgegengesetzte Richtung bewegen. Dieser „vestibulo-okuläre Reflex“ war für die räumliche Orientierung entwicklungsgeschichtlich überlebensnotwendig. Diesen Reflex nutzten die Wissenschaftler für das Langzeitexperiment auf der ISS: Über die Messung der kompensatorischen Augenbewegungen wollten sie Funktion und Veränderungen des Gleichgewichtssystems der Astronauten analysieren. Für den Einsatz auf der ISS wurde hierzu das 3D-ETD entwickelt. Mit diesem Gerät wurden vor, während und nach den Weltraummissionen Messungen der kompensatorischen Augenbewegungen bei den Astronauten vorgenommen – eines der umfangreichsten, abgeschlossenen deutschen Experimente der Raumfahrtmedizin.

Status:

Die Messungen auf der ISS begannen bereits im April 2004 und wurden Mitte 2008 abgeschlossen. Bodenmodelle des 3D-ETD wurden anschließend noch bei Otolith – einem weiteren Experiment von Prof. Dr. Andrew Clarke – eingesetzt, das zwischen 2008 und 2011 durchgeführt wurde. Russische Wissenschaftler nutzen das ETD auf der ISS weiterhin für ihre Forschung.

Ergebnisse:

Unsere Augen können um drei Achsen rotieren, jedoch werden normalerweise nur zwei Achsen benutzt. Das Koordinatensystem, das die Bewegung der Augen im Kopf beschreibt, nennt man Listingsche Ebene, in der bei raschen Augenbewegungen alle Drehachsen des Auges liegen. Bereits wenige Wochen nach den ersten Messungen auf der ISS im April 2004 zeigte die Auswertung der Daten, dass sich diese Listingsche Ebene in Abhängigkeit der Schwerkraftbedingungen ändert. Dieser Befund bestätigte sich bei den weiteren Astronauten, die sich bis Mitte 2008 als Versuchspersonen zur Verfügung stellten und passt auch zu den Ergebnissen aus Parabelflügen. Zurück in der Schwerkraft gleichen sich die Systeme nach längerer Zeit wieder an. Zwar sind die Konsequenzen dieses Befundes für unser Verständnis der Raumorientierung noch nicht absehbar. Die Ergebnisse legen aber nahe, dass nicht nur das Gleichgewichtssystem, sondern auch die allgemeine Steuerung der Augenbewegung und damit der Sehvorgang selbst durch die Schwerkraft beeinflusst werden. Zudem ist die Wechselwirkung im zentralen Nervensystem zwischen dem Gleichgewichtssystem und der Augenmotorik weniger koordiniert. Die Ergebnisse bestätigen die Schwerkraft als maßgebliche Bezugsgröße für unsere räumliche Orientierung.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Das Eye-Tracking-Device wird bereits seit einigen Jahren in verschiedenen kommerziellen Ausgestaltungen von zwei Firmenausgründungen in Berlin erfolgreich vermarktet. Die Einsatzmöglichkeiten sind vielfältig. Sie reichen von der klinischen Anwendung – zum Beispiel Verlaufskontrolle bei der Laser-Hornhautabtragung zur Behandlung von Kurzsichtigkeit oder Diagnose bestimmter neurologischer Erkrankungen wie Schwindel – bis hin zur Verfolgung der Kopf- und Augenbewegung von Probanden bei der Werbewirkungsforschung und zur Feststellung der Müdigkeit von LKW- und Busfahrern. Die Entwicklung des 3D-ETD wurde mit mehreren Innovationspreisen gewürdigt.



NASA-Astronaut Greg Chermittoff mit dem 3D-ETD-Experiment



Eye-Tracking wird zum Beispiel bei der Verlaufskontrolle bei Laser-Hornhautabtragung zur Behandlung von Kurzsichtigkeit angewandt.

Start 19. April 2004 / Sojus TMA-4	
ISS-Zeitraum	April 2004 bis Juli 2008
Unterbringung	russischer Teil der ISS
Experimentator	Prof. Dr. Andrew Clarke
Einrichtung	Charité Berlin
Bereich	Humanphysiologie
Partner	NASA; ESA; Roskosmos; IBMP Moskau

Otolith: Neue Ansätze zur Erklärung der Raumkrankheit

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Während der gesamten Evolution auf der Erde hat die Schwerkraft die Entwicklung von Organismen maßgeblich beeinflusst. Zudem ist sie eine unverzichtbare Bezugsgröße für die räumliche Orientierung und die Koordination sämtlicher Körperbewegungen. Beim Menschen und bei vielen Tieren sind die Otolithenorgane (Utriculus und Sacculus) des Gleichgewichtssystems im Innenohr für die Wahrnehmung der Schwerkraft zuständig. Gemeinsam mit der visuellen Reizverarbeitung und den Meldungen aus Muskeln und Gelenken erlaubt das Gleichgewichtssystem koordinierte und gezielte Bewegungen und räumliche Orientierung, indem es ständig alle Bewegungen des Kopfes sowie seine Stellung zur Schwerkraft misst. Entsprechend stellt deren Abwesenheit – zum Beispiel während eines bemannten Raumfluges – das Gleichgewichtssystem (sensomotorisches System/Vestibularis-System) vor eine große Herausforderung. Dieses System ist zwar in der Lage, sich innerhalb von wenigen Tagen effektiv an die neue Situation anzupassen. Dennoch leiden viele Astronauten während dieses Adaptationsprozesses mehr oder weniger stark an der Raumkrankheit. Nach der Landung auf der Erde, dem Mond oder einem anderen Planeten muss sich das System erneut auf die Schwerkraft einstellen. Diese Anpassung kann die Leistungsfähigkeit der Astronauten stark beeinträchtigen. Deshalb ist die Entwicklung wirksamer Gegenmaßnahmen sehr wichtig. Weltraumexperimente bieten einzigartige Möglichkeiten, diese Adaptationsstrategien an gesunden Menschen zu untersuchen und zu verstehen.

Experimentbeschreibung:

Beim Experiment Otolith wurden vor und unmittelbar nach einer Weltraummission mehrere Funktionen der Otolithenorgane untersucht. Zum Einsatz kamen dabei neue Methoden, die in jüngster Zeit etabliert wurden und bereits im klinischen Labor - zum Beispiel für die Untersuchung von Schwindelpatienten – im Einsatz sind: die Messung des Otolith-Okulären Reflexes (OOR), die Bestimmung der Subjektiven Visuellen Vertikale (SVV) sowie die Messung von Vestibulär Evozierten Myogenen Potentiale (VEMP). Besonderes Merkmal aller drei Methoden ist die seitengetrennte – oder unilaterale – Prüfung der Otolithenfunktion im rechten beziehungsweise linken Innenohr.

Beim Experiment Otolith wurden vor und unmittelbar nach einer Weltraummission mehrere Funktionen der Otolithenorgane untersucht.

Status:

Die Messungen begannen im April 2008 und wurden Mitte 2011 abgeschlossen. Insgesamt konnten Daten von zehn Astronauten gewonnen werden, die mit dem Space Shuttle zur ISS unterwegs waren und sich zwischen zehn und 14 Tagen in der Schwerelosigkeit aufhielten.

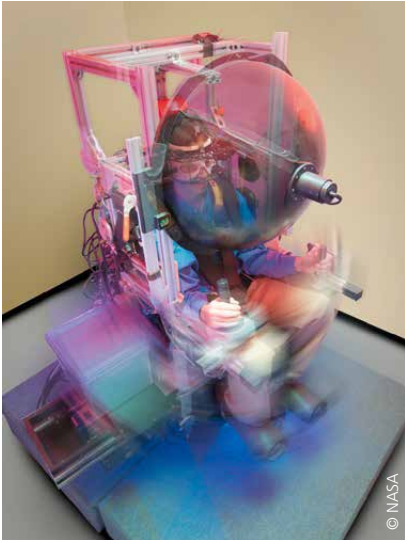
Ergebnisse:

Diese Studie hat erstmals umfangreich die seitengetrennte Otolithenfunktion in Schwerelosigkeit untersucht. Die Ergebnisse weisen auf deutliche Veränderungen während eines Weltraumaufenthalts hin. Nach der Mission dauerte die erneute Anpassung an die Schwerkraft auf Werte vor dem Raumflug bis zu zehn Tage, wobei große Unterschiede zwischen den einzelnen Astronauten festgestellt wurden. Bemerkenswert ist die Veränderung in der Symmetrie zwischen den Antworten der rechten und linken Utriculus-Organen, die innerhalb unseres Gleichgewichtssinns horizontale Linearbeschleunigungen erfassen: Während die Antwort eines der beiden Utriculi im Normalbereich lag, wich die Antwort des zweiten Utriculus stark ab. Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass jeder Mensch ein dominantes Gleichgewichtslabyrinth besitzt – ähnlich der Händigkeit. Otolith lässt die Raumkrankheit somit in einem neuen Licht erscheinen: Im Gegensatz zu der bisherigen Otolithen-Asymmetrie-Hypothese, die von physikalischen Massenunterschieden in den Organen als Ursache der Raumkrankheit ausgeht, weisen die jetzigen Ergebnisse eher auf Unterschiede in den neuronalen Prozessen in den peripheren Organen sowie im zentralen Nervensystem hin.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Die durch das Experiment gewonnenen Erkenntnisse sind nicht nur wichtig für das Verständnis von Raum- und Bewegungs- und von bestimmten neurologischen Erkrankungen, sondern auch für die Weiterentwicklung der klinischen Diagnostik. Außerdem sind sie für die Entwicklung von wirksamen Gegenmaßnahmen und Rehabilitationsstrategien bei Astronauten sowie bei Schwindelpatienten von Bedeutung.

Zeitraum	April 2008 bis Juli 2011
Unterbringung	Vor-/Nachfluguntersuchungen am Boden
Experimentator	Prof. Dr. Andrew Clarke
Einrichtung	Charité Berlin
Bereich	Humanphysiologie
Partner	ESA; NASA



Drehstuhl-anlage mit unilateralem Zentrifugieren für die Messung des OORs und Bestimmung der SVV



Astronauten testen die Otolith-Anlage mit dem DLR Eye-Tracking-Device zur Messung der Augenbewegungen in Houston.



Thermisch gefährdete Berufsgruppen wie zum Beispiel die Feuerwehr sollen zukünftig von dem nicht-invasiven Sensor profitieren.

Thermo: Wärmeregulation in Schwerelosigkeit

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Bei Eintritt in die Schwerelosigkeit verteilen sich beim Menschen Körperflüssigkeiten wie Blut und Lymphe schnell um. Entsprechend verändert sich der Wärmehaushalt: Astronauten klagen oft über kalte Füße und Finger. Bei Einsätzen außerhalb der Raumstation sind Astronauten zudem extremen thermischen Umweltbedingungen ausgesetzt: +200 Grad Celsius in der Sonne, -180 Grad im Schatten. Die anstrengende Arbeit in den Raumanzügen kann innerhalb kürzester Zeit zu einem gefährlichen Anstieg der Körperkerntemperatur auf über 39 Grad führen, die deshalb kontinuierlich erfasst werden sollte. Allerdings sind die bisherigen Verfahren aus messtechnischen oder hygienischen Gründen nicht für den alltäglichen Einsatz bei Astronauten geeignet. Eine Arbeitsgruppe an der Charité Berlin hat daher in enger Zusammenarbeit mit der Drägerwerk AG ein nicht-invasives Messverfahren entwickelt. Mit diesem neuen Thermosensor wird bei den Astronauten die Körperkerntemperatur gemessen, um einer Überhitzung vorzubeugen und dabei auch zu neuen Erkenntnissen in der Regulation der Wärmebilanz in Schwerelosigkeit zu gelangen.

Experimentbeschreibung:

Beim Experiment Thermo (Thermoregulation in Microgravity) erfasste ein neu entwickelter Wärmesensor die Körpertemperatur der Astronauten auf der ISS. Der Thermosensor wird am Kopf und am Brustbein des Astronauten angebracht, um dort den Wärmefluss zu messen. Anschließend erfolgte mittels bestimmter mathematischer Algorithmen die Umrechnung der Daten in die Körperkerntemperatur. Die Messungen wurden vor und nach dem Flug (jeweils an vier Zeitpunkten) sowie an sechs Zeitpunkten während des Aufenthaltes auf der ISS durchgeführt.

Status:

Die Hardware wurde im Frühjahr 2009 mit Progress zur ISS gebracht. Im Herbst 2009 begannen im Inkrement 20 die Messungen an den Astronauten. Sie wurden im Herbst 2012 nach Beteiligung von insgesamt zwölf Astronauten abgeschlossen. Ein Nachfolgeexperiment, bei dem vor allem die circadiane Rhythmik der Körperkerntemperatur im Mittelpunkt steht, hat im Jahre 2012 bereits begonnen.

Ergebnisse:

Der neue Sensor, der beim ISS-Experiment Thermo zum Einsatz kam, wurde vorher bereits auf Parabelflügen des DLR erfolgreich getestet. Zusätzlich setzten die Wissenschaftler hier eine Wärmebildkamera zur Erfassung der Temperaturverteilung und weitere moderne Verfahren zur Messung von raschen Flüssigkeitsverschiebungen bei wechselnden Schwerkraftbedingungen ein. Ergebnis: Unmittelbar nach Wegfall der Schwerkraft steigt mehr als ein halber Liter Blut von den Beinen aus in Richtung Kopf. Die Wärmeabstrahlung, die bereits auf der Erde zu rund 30 Prozent über den Kopf erfolgt, erhöht sich in der Schwerelosigkeit deutlich. Auf der ISS wurde das Experiment Thermo mit weiteren leistungsphysiologischen Experimenten der NASA und des DLR kombiniert, um gemeinsam zu detaillierten Erkenntnissen über die Regulation des Herz-Kreislauf-Systems und des Wärmehaushalts zu gelangen. Erste Ergebnisse deuten an, dass es unter Mikrogravitations-Bedingungen bei gleicher Belastung zu höheren Körperkerntemperaturen als unter terrestrischen Bedingungen kommt und die Körperkerntemperaturen in der Ruhephase nach Belastung wesentlich länger erhöht bleiben. Diese Ergebnisse sind wichtig, um die Arbeitsbelastungen und notwendigen Ruhephasen bei Astronauten in Zukunft besser einschätzen zu können.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Einsatzmöglichkeiten des neuen Thermosensors auf der Erde sind in Vorbereitung: Thermisch gefährdete Berufsgruppen wie Feuerwehr, Polizei und Sondereinsatzkräfte sollen von der nicht-invasiven Methodik profitieren. Auch im klinischen Alltag soll Thermo bei Operationen und im Neugeborenen-Inkubator zum Einsatz kommen. Bei Herztransplantationen im Berliner Herz-Zentrum wurde der neue Doppelsensor bereits erfolgreich angewendet. Die Markteinführung durch die Firma Dräger ist für die nahe Zukunft vorgesehen.



Der nicht-invasive Doppelsensor zur Messung der Körperkerntemperatur beim Experiment Thermo

Start 7. Mai 2009 / Progress 33P (Start von Thermolab)	
ISS-Zeitraum	Oktober 2009 bis Oktober 2012
Unterbringung	Destiny-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Hanns-Christian Gunga
Einrichtung	Charité Berlin
Bereich	Humanphysiologie
Partner	ESA; NASA
Deutsche Industrie	Doppelsensor: Drägerwerk AG & Co.KG aA, Lübeck; Thermolab: Koralewski Industrie-Elektronik oHG, Hambühren; Kayser-Threde (München)

Astronaut Dave Williams misst während eines leistungsphysiologischen Tests auf der ISS kontinuierlich die Körperkerntemperatur mit dem Doppelsensor (gelb) am Kopf. Die Daten werden im Thermolabsystem (silberne Box am Gürtel) aufgezeichnet, danach ausgelesen und per Downlink an die Bodenstation geschickt.





Circadian Rhythm: Einfluss der Körperkerntemperatur auf die Innere Uhr des Menschen

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Beim Menschen kommt es in Schwerelosigkeit zu verschiedenen Anpassungsreaktionen – zum Beispiel im Herz-Kreislauf-System, im Stoffwechsel und im Wärmehaushalt. Vor allem die Temperaturregulation ist derzeit ein Feld der intensiven Forschung: Wie unter anderem das gerade abgeschlossene ISS-Experiment Thermo derselben Arbeitsgruppe zeigen konnte, ist die Thermoregulation in Schwerelosigkeit nachhaltig beeinflusst. Zudem sind die Mechanismen der kardiovaskulären Anpassung bei thermischem Stress, insbesondere bei körperlichem Training und bei Außenbordeinsätzen noch nicht ausreichend erforscht. Unklar ist auch, ob die Rhythmik der Körperkerntemperatur – die als wichtiger Zeitgeber für verschiedene Systeme des Organismus wie zum Beispiel den Schlaf fungiert – bei Langzeitaufenthalten im Weltraum verändert ist. Veränderungen der circadianen Rhythmik – der inneren Uhr des Menschen – haben aber einen negativen Einfluss auf die Schlafqualität, die Aufmerksamkeit und die mentale Arbeitsleistung. Bis auf einige Ergebnisse aus den lange zurückliegenden Skylab-Missionen der NASA sind entsprechende circadiane Temperaturverläufe bislang noch nicht beschrieben worden. Wie tickt die innere Uhr der Astronauten in Schwerelosigkeit? Wie verändern sich die Temperaturverläufe unter den besonderen Bedingungen des Weltalls? Verschieben sich die Temperaturminima und -maxima auf andere Tageszeiten? Das Experiment Circadian Rhythm soll Antworten auf diese Fragen finden, indem die Temperaturverläufe kontinuierlich aufgezeichnet werden.

Experimentbeschreibung:

Die circadiane Rhythmik der Körperkerntemperatur soll an zwölf Astronauten im Langzeitexperiment vor, während und nach ihrem ISS-Aufenthalt erfasst werden. Hierbei kommt wiederum der für das ISS-Experiment Thermolab neu entwickelte nicht-invasive Thermosensor zum Einsatz. Die gewonnenen Temperaturdaten werden dann mit den Melatonin-Daten – eines der am besten untersuchten Hormone zur Steuerung der menschlichen Rhythmik – in Verbindung gesetzt.

Status:

Das Experiment Circadian Rhythm hat im Sommer 2012 mit ersten Messungen begonnen. Sein Abschluss wird für 2015/2016 erwartet.

Ergebnisse:

Für das ISS-Experiment liegen noch keine Ergebnisse vor. Der erfolgreiche Einsatz des Thermosensors beim ISS-Experiment Thermo sowie im Rahmen der Isolationsstudie Mars500 ebenfalls zur circadianen Rhythmik in Isolation lässt aber aufschlussreiche Resultate erwarten.

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 italienische Astronaut Luca Parmitano trägt auf der Stirn einen nicht-invasiven Thermosensor, der seine Körperkerntemperatur aufzeichnet. Alexander Gerst wird diese Forschung nun fortsetzen.

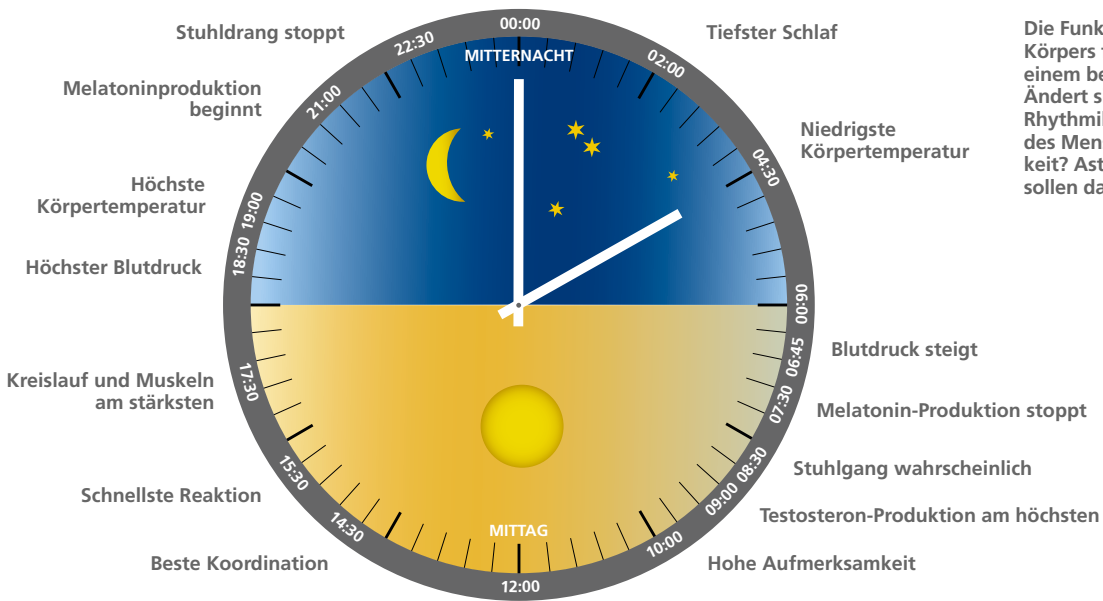
Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Der für das ISS-Experiment Thermolab in Zusammenarbeit mit Dräger Medical (Lübeck) neu entwickelte nicht-invasive Thermosensor zur Messung der Körperkerntemperatur hat bereits vielfältige Anwendung gefunden. So wurde er erfolgreich bei Herz-Transplantationen am Berliner Herzzentrum eingesetzt, da eine kontinuierliche Erfassung der Körperkerntemperatur bei Operationen nicht nur während sondern auch nach einem Eingriff wichtig ist, weil die Narkose die Temperaturregulation beeinträchtigt. Für die Feuerwehr, THW und Sondereinsatzkräfte wird derzeit an einem Einbau des Sensors in die Schutzhelme beziehungsweise Atemschutzmasken gearbeitet. Die Anwendung des Doppelsensors zur Erfassung der Körperkerntemperatur im Neugeborenen-Inkubator ist in Vorbereitung. Diesem großen Anwendungspotenzial Rechnung tragend wird die Firma Dräger den neuen Sensor in naher Zukunft in den Markt einführen.

Start 7. Mai 2009 / Progress 33P (Start von Thermolab)	
ISS-Zeitraum	seit Juli 2012
Unterbringung	Destiny-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Hanns-Christian Gunga
Einrichtung	Charité Berlin
Bereich	Humanphysiologie
Partner	ESA; NASA
Deutsche Industrie	Doppelsensor: Drägerwerk AG & Co.KG aA, Lübeck; Thermolab: Koralewski Industrie-Elektronik oHG, Hambühren; Kayser-Threde GmbH (München)



Der deutsche ESA-Astronaut Alexander Gerst trainiert am Europäischen Astronauten Zentrum EAC in Köln das Circadian Rhythm-Experiment.



Die Funktionen unseres Körpers folgen auf der Erde einem bestimmten Rhythmus. Ändert sich diese circadiane Rhythmik – die innere Uhr des Menschen – in Schwerelosigkeit? Astronauten auf der ISS sollen das herausfinden.

EKE: Neue Niederleistungsdiagnostik erfasst Fitness der ISS-Astronauten

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Astronauten müssen gerade während einer laufenden Mission ein umfangreiches Trainingsprogramm absolvieren, um dem Verlust an physischer Fitness zu begegnen. Primär geht es dabei um die Ausdauerleistungsfähigkeit, die mit Hilfe von Ausbelastungstests bestimmt und durch die maximale Sauerstoffaufnahme beurteilt wird. Der Proband muss hierbei bis an die Grenze seiner körperlichen Leistungsfähigkeit gehen. Will man diese Erschöpfungszustände vermeiden, kann nach Auffassung von Wissenschaftlern der Deutschen Sporthochschule (DSHS) in Köln auch der Zeitverlauf der muskulären Sauerstoffaufnahme nach Leistungsänderungen bei leichten bis mittleren Belastungen erfasst werden. Diese Methode ist bislang aber noch nicht allgemein etabliert. Genau hier setzt das Exercise-Kinetics-Experiment (EKE) an.

Experimentbeschreibung:

Beim EKE-Experiment müssen die Astronauten vor, während und nach dem Aufenthalt in Schwerelosigkeit bestimmte Belastungstests absolvieren. Dabei werden neben dem Gasaustausch beim Atmen auch Herzfrequenz und Herzzeitvolumen bestimmt. Während des ISS-Aufenthaltes werden Daten von Leistungstests zur Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme erhoben und mit den Vergleichsmessungen auf der Erde in das Modell eingerechnet. EKE ist mit dem NASA-Experiment V'O2max und dem Experiment Thermo der Charité Berlin koordiniert. Die beteiligten Wissenschaftler erhoffen sich, zu einem umfassenden Bild der Kreislauf- und Wärmeregulation sowie der Leistungserfassung zu gelangen.

Status:

Die Messungen auf der ISS begannen im Herbst 2009 und endeten mit der letzten Nachflug-Datenerhebung im Dezember 2012. Insgesamt haben in diesem Zeitraum zwölf Astronauten an dem EKE-Projekt teilgenommen. Momentan werden die erhobenen Daten weiter ausgewertet und mit Parametern aus den verbundenen Projekten V'O2max und Thermo, an denen dieselben Astronauten teilgenommen haben, analysiert.



Niederleistungsdiagnostik: Der Zeitverlauf der muskulären Sauerstoffaufnahme nach Leistungsänderungen bei leichten Belastungsintensitäten könnte zukünftig Ausbelastungstests von Astronauten ersetzen.

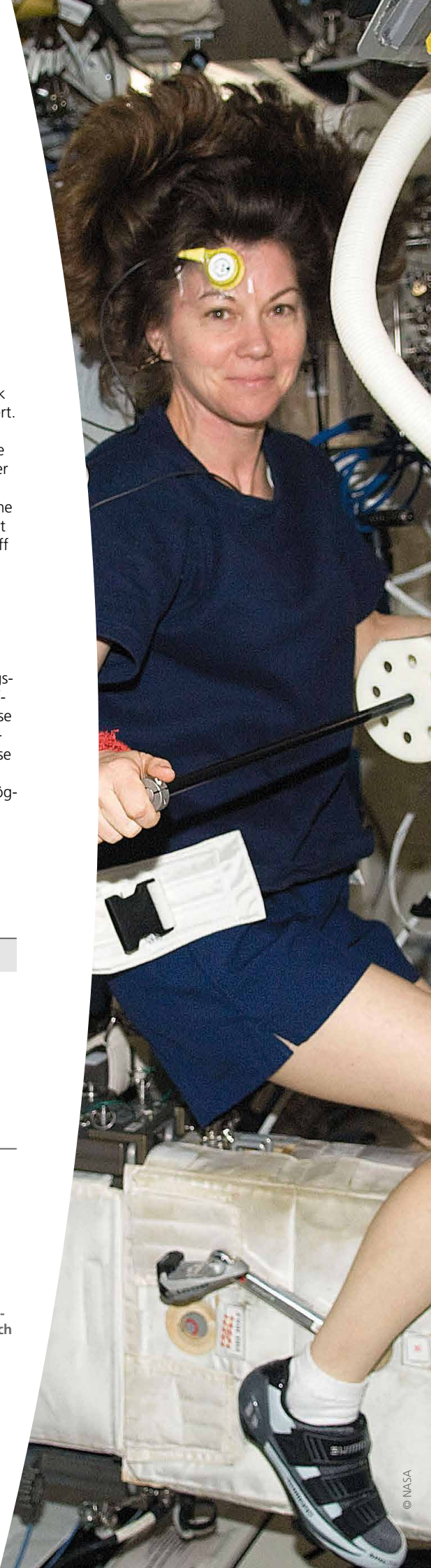
Ergebnisse:

Die vorläufigen Ergebnisse lassen darauf schließen, dass sich die Herzfrequenz-Kinetik nach langfristigem Weltraumaufenthalt scheinbar nicht oder nur sehr gering verändert. Anders sieht es bei der Sauerstoffaufnahme aus. Hier deutet sich eine Verschlechterung der Kinetik unmittelbar nach Rückkehr aus langfristiger Schwerelosigkeit an. Die Kinetik der Herzfrequenz und der Sauerstoffaufnahme beschreibt die Schnelligkeit der Anpassung dieser Größen nach Belastungswechseln. Die Steuerung dieser Parameter ist hier also von Bedeutung. Bei der Sauerstoffaufnahme-Kinetik nimmt der allgemeine individuelle Ausdauerleistungszustand unmittelbaren Einfluss auf die Geschwindigkeit der Sauerstoffaufnahme: Je besser die Ausdauer, desto schneller kann auch Sauerstoff aufgenommen werden. Bei der Herzfrequenz-Kinetik ist keine eindeutige Aussage möglich. Hier scheint es eher so zu sein, dass die Herzfrequenz-Kinetik mit dem Alter geringer wird.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

EKE soll zur Entwicklung einer Methode führen, mit der man die körperliche Leistungsfähigkeit anhand der Veränderungen der Sauerstoffaufnahme und der Herz-Kreislauf-Parameter in Abhängigkeit auf dynamische Belastungswechsel abschätzen kann. Diese wechselnden leicht intensiven Belastungen sind im Alltag häufiger vorhanden als beispielsweise sehr intensive oder gar maximale Belastungen. Die Informationen auf diese Belastungswechsel können mit entsprechenden Instrumenten während des Trainings nicht-invasiv erhoben werden, was eine großflächige und einfache Anwendung ermöglicht. Häufige Leistungstests bis zur Erschöpfung können somit zusätzlich vermieden werden, um die Leistungsfähigkeit der Astronauten für den Alltag sicherzustellen. Während eine Ausbelastung beim Sportler noch akzeptabel sein mag, könnte diese neue „Niederleistungsdiagnostik“ in Zukunft auch bei Kindern, in der Rehabilitation und Patienten mit Herzinsuffizienz eingesetzt werden.

ISS-Zeitraum	Oktober 2009 bis Oktober 2012
Unterbringung	gesamte ISS
Experimentator	Dr. Uwe Hoffmann
Einrichtung	Deutsche Sporthochschule (DSHS) Köln
Bereich	Humanphysiologie
Partner	ESA



Astronauten müssen auf der Raumstation viel trainieren, um körperlich fit zu bleiben.



Schwächt eine hohe Kochsalzkonzentration in der Nahrung die Knochen der Astronauten noch mehr? Das Experiment SOLO will eine Antwort auf diese Frage finden.

Mehrere tausend Blut-, Urin- und Speichelproben mussten während und nach der Mars500-Mission ausgewertet werden. Auch auf der ISS haben Astronauten ebenfalls Blut-, Urin- und Speichelproben für das SOLO-Experiment abgegeben.

SOLO: Macht Kochsalz die Knochen der Astronauten noch schwächer?

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Viele Prozesse im Körper des Menschen werden durch seine Ernährung beeinflusst. Die überzeugenden und teilweise überraschenden Erkenntnisse der letzten Jahre haben dafür gesorgt, dass die Ernährungswissenschaft Einzug in die Raumfahrtmedizin gefunden hat und einen hohen Stellenwert in der humanphysiologischen Forschung genießt. Versuche auf der russischen Raumstation MIR hatten bereits Ende der 1990er-Jahre Zweifel an der strengen Kopplung von Salz- und Wasserhaushalt bei Astronauten in Schwerelosigkeit ausgelöst und damit Lehrbuchwissen in Frage gestellt. In nachfolgenden Bodenstudien entdeckten Forscher in der Tat einen bislang unbekannten Salzspeicherungsmechanismus in der Haut. Den Ergebnissen zufolge wird dabei Natrium an bestimmte Zucker-Eiweiß-Moleküle gebunden. Zudem scheint zu hoher Salzkonsum einen nachteiligen Effekt auf das Skelettsystem auszuüben: Hohe Kochsalzzufuhr steigert den Knochenabbau, wie in Betruhestudien bereits gezeigt werden konnte. Treibt eine hohe Kochsalzzufuhr den durch die Schwerelosigkeit ohnehin schon stattfindenden Knochenabbau bei Astronauten also noch zusätzlich voran? Das Sodium Loading in Microgravity (SOLO)-Experiment soll diese Frage beantworten. Experten des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin in Köln und der Universität Bonn untersuchen hierbei das Zusammenspiel von Ernährung, Salz-, Flüssigkeits- und Säuren-Basenhaushalt sowie deren Einfluss auf den Knochenstoffwechsel.

Experimentbeschreibung:

Die Astronauten müssen während ihres Aufenthaltes auf der ISS zweimal jeweils fünf Tage lang eine festgelegte Diät einhalten, die einmal einen niedrigen und einmal einen hohen Salzgehalt aufweist. Dabei wird die Ausscheidung von Salz sowie die von bestimmten Markern, die einen Hinweis auf den Knochenstoffwechsel geben, über den Urin exakt erfasst. Blutabnahmen dienen zur Bestimmung weiterer Knochenmarker und der Hormone des Salz- und Wasserhaushalts. Indem sich die Astronauten einen Tropfen Kapillarblut aus der Fingerkuppe entnehmen, wird zusätzlich der Säuren-Basen-Status untersucht. Das regelmäßige Wiegen der Astronauten im All liefert den Wissenschaftlern eine Aussage über die Flüssigkeitsmenge, die über die Haut verlorengegangen ist. Um diesen Fragestellungen nachgehen zu können, bedient sich das Experiment verschiedener Messeinrichtungen, die in das europäische Physiologie-Labor European Physiology Module (EPM) an Bord von Columbus eingebaut sind. Zum Einsatz gelangen so auch verschiedene Module des in deutsch-französischer Kooperation entwickelten Cardiolab – einer Bereitstellung der französischen Raumfahrtagentur CNES und des DLR Raumfahrtmanagements zu den EPM der ESA.

Status:

Die Messungen auf der ISS begannen im Herbst 2008. Insgesamt neun Astronauten nahmen bis zum Ende des Experiments im Sommer 2012 daran teil. Die letzten Nachflugmessungen fanden im Juni 2013 statt.

Ergebnisse:

Erste vorläufige Ergebnisse zeigen, dass bei einer hohen Kochsalzzufuhr mehr Calcium ausgeschieden wird als bei einer niedrigen Kochsalzzufuhr. Dies könnte langfristig zu einer negativen Calciumbilanz und damit zu einer erhöhten Knochenresorption führen. Der Knochenaufbau dagegen scheint, wie auch zu erwarten war, nicht von der Höhe der Kochsalzzufuhr beeinträchtigt. Bei den Markern des Knochenabbaus ergeben erste Auswertungen individuell sehr unterschiedliche Resultate. Etwa die Hälfte der beteiligten Astronauten zeigt einen deutlichen kochsalzbedingten Anstieg, während dies bei der anderen Hälfte nicht zu beobachten ist. Diese individuellen Reaktionsmuster werden derzeit vor allem in Hinblick auf einen möglichen Zusammenhang zur Natriumspeicherung noch genauer untersucht.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Kochsalzbedingter, erhöhter Knochenabbau hat nicht nur negative Folgeerscheinungen für den Astronauten, sondern wäre auch für den Menschen auf der Erde gerade in unserer alternden Gesellschaft von großer Bedeutung. Sollten sich die vorläufigen Resultate individuell bestätigen, hieße dies, dass wenig körperliche Anstrengung und Aktivität – so wie sie bei alten und bettlägerigen Menschen vorliegt – gekoppelt mit einem hohen Salzverzehr langfristig entweder über eine jahrelange erhöhte Calciumausscheidung oder über einen direkten kochsalzbedingten Anstieg der Knochenresorption zu einem erhöhten Knochenabbau führen würde. Die Entwicklung entsprechender, diätetischer Gegenmaßnahmen zusammen mit geeigneten Fitnessprogrammen wäre dann ein noch wichtigeres Element in der Gesundheitsvorsorge.



ESA-Astronaut Frank De Winne bei einer Überprüfung der SLAMMD-Hardware. Das Gerät bestimmt die Masse der Astronauten in Schwerelosigkeit.

ISS-Zeitraum	Oktober 2008 bis Mai 2012
Unterbringung	Columbus-Modul
Experimentator	Dr. Petra Frings-Meuthen; PD Dr. Martina Heer
Einrichtung	DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln; Profil Institut für Stoffwechselforschung GmbH, Neuss; Universität Bonn
Bereich	Humanphysiologie
Partner	ESA
Deutsche Industrie	Airbus Defence & Space, Friedrichshafen



Luca Parmitano und Karen Nyberg auf der ISS: Beide nehmen am Pro-K-Experiment teil. Dafür müssen sie sich speziell ernähren sowie Blut- und Urinproben abgeben, die im Labor auf der Erde untersucht werden.

Pro-K: Knochenabbau der Astronauten über veränderte Nahrungsaufnahme steuern

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Die Ernährung spielt nicht nur beim Menschen auf der Erde, sondern auch bei Astronauten für den Erhalt von Gesundheit und Leistungsfähigkeit eine wichtige Rolle. Darüber hinaus können durch eine gezielte Ernährung wie durch eine Veränderung des Verhältnisses von tierischem Eiweiß zu Kalium in der Nahrung bestimmte physiologische Prozesse gesteuert werden. Der Methionin-Abbau – eine vermehrt in tierischem Eiweiß vorhandene Aminosäure – führt im Stoffwechsel unter anderem zu Schwefelsäure. Sie verursacht, sofern kein ausreichender alkalischer Ausgleich stattfindet, eine sogenannte latente metabolische Azidose, also eine Ansäuerung. Dies fördert wiederum die Aktivität der Knochen-abbauenden Osteoklasten-Zellen. Kalium befindet sich in unterschiedlichen Salzen – zum Beispiel als Kaliumcitrat und damit als alkalisches Salz – vermehrt in pflanzlichen Lebensmitteln. Das Verhältnis von tierischem Eiweiß zu Kalium ist damit ein Anzeichen für eine eher saure oder basische Kost. Durch eine bewusste Verschiebung dieses Verhältnisses in der Nahrung der Astronauten in Richtung des basischen Milieus wollen die Forscher den Knochenabbau verringern. In Experimenten während Bettruhestudien konnte dies bereits gezeigt werden. Die Daten aus der laufenden Studie sollen die notwendige Grundlage bilden, um Ernährungsempfehlungen für Weltraumaufenthalte, aber auch für die sich eher wenig bewegende und alternde Bevölkerung auf der Erde zu geben.

Experimentbeschreibung:

Vor, während und nach den Weltraummissionen wird das Verhältnis von tierischem Eiweiß zur Kaliumzufuhr bewusst einmal in Richtung eines höheren Anteils an tierischem Eiweiß, ein anderes Mal zu einer eher basischen Kost verändert. Beide Experimentphasen werden zu Beginn und am Ende einer Mission absolviert. Parallel werden andere Einflussfaktoren der Ernährung auf den Knochenstoffwechsel, wie Gesamtenergie, das Gesamteiweiß, Natrium, Magnesium, Phosphor und Kalzium konstant gehalten und erfasst. Blut- und Urinproben werden genommen und anschließend auf der Erde im Labor untersucht. In den Urinproben werden bestimmte Markersubstanzen des Knochenabbaus und im Blut bestimmte Marker der Knochenbildung analysiert. Zusätzlich wird die Knochendichte mittels Dual-Energy X-ray Absorptiometry (DEXA) bestimmt. Diese Messungen geschehen in einer Kooperation zwischen NASA Johnson Space Center und Wissenschaftlern der Universität Bonn, die sich auf die Untersuchung der Knochenmarker spezialisiert haben.

Status:

Das Experiment hat im Oktober 2009 begonnen.

Ergebnisse:

Ergebnisse von ersten Astronauten liegen vor und bestätigen, dass ein hohes Verhältnis von tierischem Eiweiß zu Kalium einen knochenabbauenden Effekt hat. Dieser Effekt einer eher sauren Nahrungszusammensetzung scheint zum Ende einer sechs-monatigen Mission wesentlich stärker ausgeprägt zu sein als zu Beginn.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Fortschritte im Verständnis der Ernährung haben vielfältige Anwendungsmöglichkeiten auf der Erde. Sollten sich die Erwartungen und die vorläufigen Ergebnisse bestätigen, dass eine Absenkung des Verhältnisses von tierischem Eiweiß zu Kalium einen positiven Effekt auf den Knochenabbau hat, sollte diese Erkenntnis das Ernährungsverhalten gerade in einer alternden, weniger mobilen Gesellschaft entscheidend verbessern.

ISS-Zeitraum	seit Oktober 2009
Unterbringung	Columbus-Modul
Experimentator	PD Dr. Martina Heer; Dr. Scott Smith
Einrichtung	Profil Institut für Stoffwechselforschung GmbH, Neuss/ Universität Bonn; NASA Johnson Space Center (Houston)
Bereich	Humanphysiologie
Partner	NASA
Deutsche Industrie	Airbus Defence & Space, Friedrichshafen



Nutrition: Einfluss der Ernährung auf die Physiologie der Astronauten

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Die Ernährung spielt nicht nur beim Menschen auf der Erde, sondern auch bei Astronauten für den Erhalt von Gesundheit und Leistungsfähigkeit eine wichtige Rolle. Untersuchungen zur Nährstoffversorgung haben schon in der frühen Phase der bemannten Raumfahrt gezeigt, dass Astronauten – sofern sie ihre Lebensmittelauswahl nach ihren Vorlieben treffen – unter einer Fehlernährung im Sinne unzureichender Kalorienzufuhr, unzureichender Vitamin- (zum Beispiel Vitamin D) und zum Teil zu hoher Mineralstoffzufuhr (zum Beispiel Natrium und Eisen) leiden. Eine direkte Verbindung zwischen der bestehenden Fehlernährung und metabolischen oder physiologischen Veränderungen konnte bisher nur beobachtet und angenommen, jedoch aufgrund fehlender genauer Untersuchungen aber nicht nachgewiesen werden. Bereits bei der ersten Crew an Bord der ISS wurde der Ernährungsstatus der Astronauten verfolgt. Während man sich anfangs auf Vor- und Nachfluguntersuchungen von Blut und Urin beschränken musste und während des Fluges auf Fragebögen angewiesen war, können seit der Inbetriebnahme von weiteren Gefriergeräten im Jahre 2006 auch Blut- und Urinproben, die während des Fluges genommen werden, an Bord der ISS aufbewahrt werden. Damit begann im September 2006 auch das Experiment „Nutrition“, bei dem eine Vielzahl von Faktoren des Knochenstoffwechsels, des oxidativen Stresses, Risikofaktoren des Herz-Kreislaufsystems sowie des Muskelstoffwechsels erfasst wurden. Auf diese Weise sollte der Einfluss der Ernährung auf körperliche Veränderungen untersucht werden.

Experimentbeschreibung:

Vor, während und nach den Weltraummissionen werden bei den Astronauten Blut- und Urinproben genommen und anschließend auf der Erde im Labor analysiert. Ebenso werden Menge und Zusammensetzung der Nahrung genau protokolliert. Dies geschieht in einer Kooperation zwischen NASA Johnson Space Center mit Wissenschaftlern der Universität Bonn, die sich auf die Untersuchung der Knochenmarker spezialisiert haben.

Status:

Das Experiment begann im September 2006 und wurde im September 2013 abgeschlossen.

Ergebnisse:

Vorläufige Ergebnisse zeigen zum ersten Mal, dass Astronauten auch im All ihre Knochenmasse erhalten können, sofern sie neben dem Krafttraining über eine ausgewogene Ernährung ausreichend mit Energie, Eiweiß und Vitamin D versorgt sind. Unter diesen Bedingungen wird die für das Training notwendige Energiezufuhr dann aus der Nahrung entnommen, und Fett- oder Muskelmasse werden nicht abgebaut. Ein spezielles Problem an Bord der Raumstation ist – aufgrund der fehlenden Sonnenstrahlung – eine ausreichende Vitamin D-Versorgung. Vitamin D-Mangel begünstigt jedoch nicht nur den Knochenabbau, sondern steht auch zum Beispiel mit erhöhten Blutzuckerspiegeln in Zusammenhang. Um diesem Problem zu begegnen, wurden die entsprechen-

den Zusätze an Vitamin D in der täglichen Ernährung bereits erhöht. Weitere Aussagen können nach Abschluss der Analysen gemacht werden.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Fortschritte im Verständnis der Bedeutung der Ernährung und einzelner Nährstoffe insbesondere im Zusammenhang mit der reduzierten mechanischen Belastung des muskulo-skelettalen Systems haben weitgehende Anwendungsmöglichkeiten auf der Erde. Verstehen die Forscher den Zusammenhang von Nährstoffzufuhr und Knochenabbau besser, dann können sie daraus wichtige Vorschläge für ein geändertes und ausgewogenes Ernährungsverhalten ableiten. Dies ist insbesondere für eine alternde, sich weniger bewegende Gesellschaft von Interesse, bei der der Anteil an Personen mit Muskelschwund und Osteoporose kontinuierlich steigt.

ISS-Zeitraum	September 2006 bis September 2013
Unterbringung	Columbus-Modul
Experimentator	PD Dr. Martina Heer; Dr. Scott Smith
Einrichtung	Profil Institut für Stoffwechselforschung GmbH, Neuss/ Universität Bonn; NASA Johnson Space Center (Houston)
Bereich	Humanphysiologie
Partner	NASA



ISS Astronaut Bill McArthur überprüft die SLAMMD-Apparatur. Das Gerät bestimmt die Masse von Astronauten. Die Erfassung der Masse im Weltraum ist schwierig, weil sie in Schwerelosigkeit nicht mit dem Gewicht gleichzusetzen ist.



Zeitvertreib: Die amerikanischen Astronauten Shane Kimbrough und Sandra Magnus spielen an Bord der ISS mit schwerelosen Früchten.



Cartilage: Morphologie und Biologie des Gelenkknorpels

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Mechanische Belastung durch Gravitation und körperliche Aktivität ist für uns Menschen auf der Erde für den Erhalt und die Funktion des muskulo-skelettalen Bewegungssystems entscheidend. Dabei passt sich nicht nur der aktive Bewegungsapparat (Muskeln), sondern auch der passive Stützapparat (Knochen, Knorpel, Sehnen und Bänder) an die mechanische Belastungen an. Allerdings ist diese Adaptationsfähigkeit beim Gelenkknorpel im Vergleich zu Knochen und erst recht zu Muskeln stark eingeschränkt. Dies zeigt sich zum Beispiel darin, dass sich degenerierter Gelenkknorpel – nach derzeitigem Kenntnisstand – nicht regenerieren kann. Bei einem zerstörten Gelenkknorpel ist ein künstliches Gelenk daher die einzige Therapiemöglichkeit. Chronische oder akute Überbeanspruchung kann ebenfalls zum Abbau des Gelenkknorpels bis hin zur Osteoarthritis führen. Eine moderate Gelenkbelastung ist zur Nährstoffversorgung und für die Funktion des Gelenkknorpels unverzichtbar. Deswegen kann eine reduzierte mechanische Belastung wie bei Astronauten im Weltraum oder bei Patienten während längerer Immobilisation zu einer Schädigung des Gelenkknorpels führen. Während es zum Muskel- und Knochenabbau in Schwerelosigkeit eine Vielzahl gesicherter Erkenntnisse gibt, ist der Gelenkknorpel bei Astronauten bis heute noch nicht untersucht worden. Selbst auf der Erde gibt es zur Adaptationskapazität von Gelenkknorpel noch viele ungeklärte Fragen. In einer Studie an querschnittsgelähmten Patienten über einen Zeitraum von sechs Monaten konnte allerdings eine deutliche Abnahme der Knorpeldicke festgestellt werden. Cartilage soll den Einfluss der Schwerelosigkeit auf den Aufbau und die Biologie des Kniegelenkknorpels der Astronauten untersuchen und einen möglichen Zusammenhang mit dem Muskelabbau herstellen.

Aufsicht auf Gelenkknorpel des Knies

Experimentbeschreibung:

Unmittelbar vor und nach dem Flug zur ISS sowie noch einmal vier bis sechs Wochen nach dem Flug wird der Gelenkknorpel der Astronauten mittels Kernspintomographie (Magnet-Resonanz-Tomographie, MRT) des Knies abgebildet und die Morphologie (Volumen und Dicke) erfasst. Zusätzlich werden in Blut- und Urinproben bestimmte Biomarker des Knorpelstoffwechsels wie zum Beispiel Cartilage Oligomeric Matrix Protein (COMP) nachgewiesen, um Erkenntnisse über den Stoffwechsel zu erhalten.

Status:

Das Experiment Cartilage begann mit ersten Vorfluguntersuchungen im Frühjahr 2013. Der Abschluss des Experiments wird für 2015 erwartet.

Ergebnisse:

Für das ISS-Experiment liegen noch keine Ergebnisse vor. Allerdings gibt es bereits interessante Daten derselben Arbeitsgruppe aus einer 14-tägigen Bettruhestudie. Hier konnte gezeigt werden, dass die Dicke des Knorpels am Schienbein, aber nicht am Oberschenkelknochen deutlich abnahm. Vibrationstraining, das als Gegenmaßnahme zum Muskel- und Knochenabbau getestet wurde, bewirkte hingegen einen Erhalt beziehungsweise eine Zunahme der Knorpeldicke. Allerdings liefern diese Messungen keine Aussagen über die Qualität des Knorpels.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Besonders im Hinblick auf längerfristige Aufenthalte auf der ISS oder während exploratorischer Missionen zu Mond, Mars und anderen Zielen ist das Wissen über den Effekt der Schwerelosigkeit auf den Gelenkknorpel der Astronauten und die Erarbeitung entsprechender Gegenmaßnahmen wichtig. Die Ergebnisse nützen jedoch auch dem Menschen auf der Erde: Patienten mit eingeschränkter Bewegungsfähigkeit oder Menschen in einer immer älter werdenden und sich weniger bewegenden Gesellschaft werden von Cartilage profitieren. Erfolgreiche Gegenmaßnahmen würden auch hier das Leben im Alter verbessern.



Magnet-Resonanz-Tomograph



Bildliche Darstellung des Muskelabbaus

ISS-Zeitraum	seit Frühjahr 2013
Unterbringung	Columbus-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Gert-Peter Brüggemann; Dr. Anna-Maria Liphardt; PD Dr. Anja Niehoff
Einrichtung	Deutsche Sporthochschule (DSHS) Köln
Bereich	Humanphysiologie
Partner	ESA; NASA



Sarcolab: Dem Muskelschwund bei Astronauten auf der Spur

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Die Gesäß- und Beinmuskulatur baut sich beim Astronauten in Schwerelosigkeit ab. Die betreffenden Muskeln verlieren dabei nicht nur an Volumen, sondern werden zusätzlich auch ‚intrinsisch‘ schwächer. Ähnliche Beobachtungen wurden auch bei Bettlägerigen und bei alten Menschen gemacht. Man nimmt deshalb an, dass die wesentliche Ursache für den Muskelschwund im Weltraum das Fehlen von mechanischen Reizen ist – ganz allgemein könnte man somit von ‚Bewegungsmangel‘ sprechen. Der Umstand, dass die Trainingsmethoden auf der ISS, also zum Beispiel Fahrrad-, Laufband- und Krafttraining nur teilweise wirksam sind, deutet aber darauf hin, dass die Ursachen des Muskelschwundes im All – und wohl auch auf der Erde – nicht vollständig aufgeklärt sind. Das Sarcolab-Experiment soll daher diesen Ursachen auf den Grund gehen. Dafür soll zunächst der innere Aufbau des Muskels untersucht werden. Die Untersuchung der Muskel-‘Architektur‘ erfolgt mit Ultraschall und gibt über die Länge und Orientierung der Fasern oder Faszikel Auskunft. Ein größerer Fiederungswinkel (Muskelfasern verlaufen schräg zur Ansatzsehne) steigert die Kraft der Kontraktion und senkt ihre Geschwindigkeit. Die Messung des Muskelvolumens durch eine Kernspin-Tomographie und die Erfassung von Muskelkraft und -leistung durch eine Funktionsuntersuchung vervollständigen das Bild über den Einfluss der Muskelarchitektur auf die erwarteten Funktionseinbußen. Eine weitere mögliche Ursache könnte die Abnahme der neuronalen Reize auf den Muskel sein. Diese Einflüsse werden im Sarcolab-Experiment durch Elektrostimulation des Muskels und seiner versorgenden Nerven bestimmt. Dazu werden Muskel und Nerv gereizt und dann die mechanische Reizantwort ermittelt. Erfahrungen aus früheren Untersuchungen auf der Erde lassen aber auch direkte Veränderungen im Muskelgewebe selber als Ursache für den Muskelschwund vermuten. Darum werden Gewebeprobe untersucht, die vor und nach dem Weltraumaufenthalt aus den Beinen der Astronauten gewonnen werden. Die Entnahme erfolgt durch einen kleinen Eingriff mit örtlicher Betäubung, die sogenannte Muskelbiopsie. Mit dem gewonnenen Material lassen sich Funktionsuntersuchungen auf der Ebene einer einzelnen Muskelzelle durchführen. Hierbei werden dann die Kraft und die Kontraktionsgeschwindigkeit der Faser unter bestimmten Bedingungen erfasst. Die Forscher erwarten, dass größtenteils eine verringerte Konzentration von Kontraktionsproteinen (vor allem Aktin) für den intrinsischen Kraftverlust nach dem Aufenthalt in der Schwerelosigkeit verantwortlich ist. Die Aktin-Konzentration wird ebenso wie die Untersuchung der sogenannten Costamer-Proteine (vor allem FAK) und der zellulären Signalwege (vor allem Akt/mTOR) mit biochemischen Methoden bestimmt. Von den letzteren beiden Untersuchungen erwarten die Forscher starke Hinweise auf die ursächlichen Mechanismen des Muskelschwundes, welche die Grundvoraussetzung für die Verbesserung von Trainingsmethoden bilden. Schließlich kommen auch hochmoderne Verfahren (Proteomik, Metabolomik) zum Einsatz.

Experimentbeschreibung:

Alle Untersuchungen der Astronauten finden vor und unmittelbar nach dem Flug zur ISS sowie nochmals 14 Tage nach der Rückkehr statt. Von besonderem Interesse sind auch die Untersuchungen, die an Bord der ISS geplant sind: die Muskelfunktionsuntersuchung mit Muscle Atrophy and Resistance Exercise System (MARES) sowie die Ultraschall-Messung und die Elektrostimulation mit PERcutaneous Muscle Stimulator (PEMS).

Status:

Das Experiment Sarcolab hat 2011 begonnen und der erste Datensatz wurde in 2012 abgeschlossen. Für die kommenden Jahre sind weitere Untersuchungen geplant. Allerdings sind derzeit noch keine Messungen auf der ISS mit dem MARES möglich.

Ergebnisse:

Die Daten des ersten Astronauten wurden bereits teilweise ausgewertet. Allerdings ist es noch zu früh für eine abschließende Beurteilung.

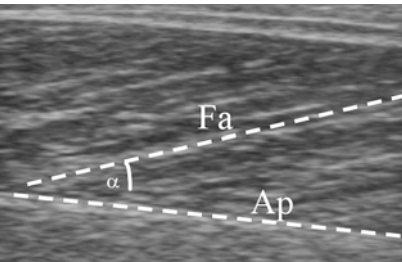
Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Muskelverlust und Muskelschwäche sind mit hohem Lebensalter ebenso wie mit Bewegungsmangel und einer Vielzahl von Krankheiten verknüpft. In der Raumfahrt ebenso wie in der Medizin besteht erheblicher Bedarf an Trainings- und Rehabilitationsmethoden. Sowohl Training als auch Rehabilitation müssen dabei genau auf das zugrundeliegende Problem ausgerichtet sein. Untersuchungen der Raumfahrt-bedingten Muskelschwäche versprechen deshalb einen bedeutsamen Erkenntnisgewinn, der auf direktem und indirektem Wege der Medizin und der Trainingswissenschaft zu Gute kommt.

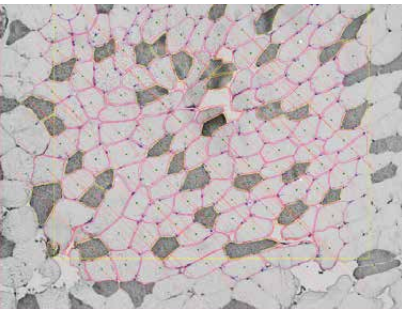
ISS-Zeitraum	seit Herbst 2011
Unterbringung	Destiny- und Columbus-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Jörn Rittweger
Einrichtung	DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln
Bereich	Humanphysiologie
Partner	ESA; NASA



Mit dem Muscle Atrophy and Resistance Exercise System (MARES) lässt sich dem Muskelabbau in Schwerelosigkeit entgegenwirken.



Menschlicher Muskel in einer Ultraschallaufnahme: Der Fiederungswinkel ergibt sich aus der Richtung der Faszikel (Fa) und der Aponeurose



Feinschnitt-Untersuchung einer menschlichen Muskel-Gewebeprobe. Die dunkel gefärbten Fasern sind vom langsamen und die hellen vom schnellen Typ. Die Auswertung (= farbige Linien) erfolgte mit der im DLR entwickelten Software „Histometer“.



Einsatz des VisioScan-Gerätes am Boden

SkinCare: Hautalterung im Zeitraffer

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Der Verlust von Knochen- und Muskelmasse ist eine bekannte Auswirkung von Langzeitaufenthalt im All auf Astronauten. Es hat sich aber gezeigt, dass die Bedingungen eines solchen Aufenthalts wie Schwerelosigkeit, erhöhte Strahlung und künstliche Luftzirkulation sich auch auf die menschliche Haut auswirken. Sie wird trockener, dünner und somit verletzungsanfälliger. Wie auch bei Knochen und Muskeln scheint ein beschleunigter Alterungsprozess stattzufinden. Das SkinCare-Experiment sollte diese Hautveränderungen untersuchen und prüfen, wie man den negativen Veränderungen der Haut bei Astronauten entgegenwirken kann.

Experimentbeschreibung:

Die Untersuchung wurde an zwei Stellen an den beiden Unterarmen des Astronauten durchgeführt. Eine davon wurde mit einem Hautschutzprodukt eingecremt, während die zweite unbehandelt blieb. Folgende Aspekte wurden vor dem Start ins All zweimal untersucht: Feuchtigkeit der Oberhaut, Wasserdurchlässigkeit der Haut, Hautstruktur und Hautelastizität. An Bord der Raumstation wurden sechs Messungen der Feuchtigkeit der Oberhaut, Wasserdurchlässigkeit der Haut und Hautstruktur während der Mission durchgeführt. Nach der Rückkehr zur Erde wurden alle im All untersuchten Parameter noch zweimal gemessen.

Status:

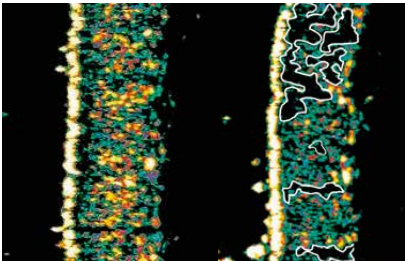
Das SkinCare-Experiment wurde im Rahmen der europäischen Astrolab-Mission vom 6. Juli bis zum 19. Dezember 2006 durchgeführt. Die Tests vor und nach der Mission fanden im europäischen Astronautenzentrum (EAC) in Köln-Porz statt. SkinCare war das erste rein kommerziell betriebene Experiment aus Europa auf der ISS, das erfolgreich abgeschlossen wurde.

Ergebnisse:

Es hat sich gezeigt, dass die Veränderungen der Haut während des Aufenthalts auf der ISS sehr denen ähneln, die sich durch den natürlichen Alterungsprozess auf der Erde über Jahrzehnte entwickeln: Die Hautfalterung war vergrößert, die Elastizität hatte abgenommen, Hornschicht und Cutis zeigten ebenfalls Alterungserscheinungen. Zum Glück scheinen diese Veränderungen reversibel: Nach einem Jahr hatten sich die Verhältnisse wieder normalisiert. Behandlung mit einer bestimmten Hautschutzcreme konnte zudem die weltraumbedingten Veränderungen weitgehend unterbinden. Die mit der Creme behandelte Hautpartie veränderte sich weniger stark als unbehandelte Haut.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Die Entwicklung von Hautschutzprodukten zur Minderung der negativen Folgen für Astronauten auf Langzeitmissionen wird fortgesetzt. Dies wird besonders für zukünftige Missionen jenseits des Erdorbits von Bedeutung sein. Des Weiteren hat sich die ISS als Testumgebung für kommerzielle Hautschutzprodukte gegen Alterungserscheinungen der Haut bewährt. Weitere und noch umfassendere Untersuchungen sind für die Zukunft geplant (Skin-B).



Ultraschallmessung der Haut vor beziehungsweise nach dem Flug



ESA-Astronaut Thomas Reiter führte während der Astrolab Mission das SkinCare-Experiment durch.

Start 4. Juli 2006 / Space Shuttle Discovery (STS-121)	
ISS-Zeitraum	Juli 2006 bis Dezember 2006
Unterbringung	Columbus-Modul
Experimentator	Dr. M. Massow; Prof. Dr. Ulrike Heinrich
Einrichtung	ISS Lab Ruhr GmbH; DermaTronnier GmbH & Co. KG, Institut für experimentelle Dermatologie
Bereich	Humanphysiologie
Partner	ESA
Deutsche Industrie	DermaTronnier GmbH & Co. KG, Institut für experimentelle Dermatologie



Hardware des Skin-B Experiment in der Flightpouch



Der italienische ESA-Astronaut Luca Parmitano führte während seiner „Volare“-Mission das Skin-B-Experiment auf der ISS durch. Der deutsche Astronaut Alexander Gerst wird diese Forschung nun fortsetzen.



Skin-B: Hautveränderungen im Weltraum als Modell für die Hautalterung auf der Erde

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Unsere Haut hat viele Aufgaben: Sie reguliert unter anderem den Wasser- und Temperaturhaushalt unseres Körpers, verhindert das Eindringen von Krankheitserregern, schützt vor UV-Strahlung und dient als Sinnesorgan und Kommunikationsträger. Doch wie reagiert sie auf die rauen Bedingungen des Weltraums und wie können Veränderungen der Haut frühzeitig Hinweise auf das Vorliegen anderer, systemischer Krankheiten liefern? Nach Ergebnissen von NASA-Studien liegen Hautprobleme wie Austrocknung, Schuppung oder Juckreiz nach Kopfschmerzen und Gleichgewichtsstörungen bereits an dritter Stelle bei den gesundheitlichen Problemen der Astronauten. Auch über verzögerte Wundheilung und verstärkte allergische Reaktionen gegen verschiedene Materialien wurde berichtet. Allerdings fehlen bislang systematische Untersuchungen dieser Veränderungen. Das soll das Experiment „Skin-B“ nun ändern. In Nachfolge des Pilotexperiments „SkinCare“ (2006) wird der Einfluss der Weltraumbedingungen auf die Hautphysiologie genauer untersucht, die gemessenen Veränderungen überprüft und durch weitere Messmethoden ergänzt. Die Haut steht dabei stellvertretend auch für alle mit Epithel- und Bindegewebe ausgekleideten Organe.

Experimentbeschreibung:

Zu verschiedenen Zeitpunkten vor und nach dem Flug sowie sechs bis achtmal während des Aufenthalts auf der ISS soll die Haut auf der Innenseite des Unterarms der Astronauten mit verschiedenen Methoden untersucht werden. Hierbei kommen auf der ISS drei handliche, nicht-invasive Messgeräte zum Einsatz, die kommerziell erhältlich sind und für den Weltraumeinsatz umgerüstet und qualifiziert wurden. Mit dem Corneometer wird der Hydratationszustand der Haut erfasst, das Tewameter misst den transepidermalen Wasserverlust und eine Kamera (Visioscan) sorgt für die bildliche Darstellung der Hautoberfläche. Zusätzlich werden vor und nach dem Flug die kapillare Durchblutung (Mikrozirkulation), Ultrastruktur und die Elastizität (Cutometer) der Haut gemessen.

Status:

Das Experiment Skin-B begann mit ersten Vorfluguntersuchungen und der anschließenden Experimentausführung auf der ISS im Frühjahr 2013. Der Abschluss wird für 2015 erwartet. Insgesamt sollen bis zu sechs Astronauten am Experiment teilnehmen.

Ergebnisse:

Für das ISS-Experiment Skin-B liegen noch keine Ergebnisse vor. Allerdings gibt es bereits interessante Daten derselben Arbeitsgruppe aus dem Pilotexperiment SkinCare während der sogenannten Astrolab-Mission zur ISS im Jahr 2006. Hier konnte gezeigt werden, dass es während des sechsmonatigen Aufenthalts auf der ISS zu ähnlichen Veränderungen der Haut kommt, wie sie sich beim Menschen auf der Erde beim Alterungsprozess über Jahrzehnte entwickeln: Die Hautfalterung war vergrößert, die Elastizität hatte abgenommen, Hornschicht und Cutis zeigten ebenfalls Alterungser-

scheinungen. Zum Glück scheinen diese Veränderungen reversibel: Nach einem Jahr hatten sich die Verhältnisse wieder normalisiert. Im Experiment Skin-B werden diese Ergebnisse überprüft und statistisch abgesichert.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Das Wissen über die weltraumbedingten Veränderungen der Haut und die Entwicklung entsprechender Gegenmaßnahmen sollen zunächst das Wohlbefinden der Astronauten erhöhen, aber auch Phänomene wie verzögerte Wundheilung und verstärkte Allergien besser erklären und dabei helfen, sie in den Griff zu bekommen. Die Experimentergebnisse lassen auch Rückschlüsse auf die Veränderung von mit Endothel ausgekleideten Blutgefäßen und somit über die physische Belastung der inneren sowie der äußeren Organe erwarten. Darüber hinaus sind sie aber auch für den Menschen auf der Erde gerade in einer immer älter werdenden Gesellschaft wichtig. Sollten sich die in der Pilotstudie während der Astrolab-Mission erhaltenen Ergebnisse bestätigen, könnte an Bord der ISS der Alterungsprozess der Haut gewissermaßen im Zeitraffer studiert werden – ein auch für die Pharma- und Kosmetikindustrie interessanter Ansatz.

Start 28. März 2013 / Sojus TMA-08M	
ISS-Zeitraum	seit Frühjahr 2013
Unterbringung	Columbus-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Ulrike Heinrich; Dr. Nicole Gerlach
Einrichtung	DermaTronnier GmbH & Co. KG, Institut für experimentelle Dermatologie, Universität Witten-Herdecke
Bereich	Humanphysiologie
Partner	ESA; NASA
Deutsche Industrie	Kaiser-Threde GmbH, München; Courage & Khazaka electronic GmbH, Köln; DermaTronnier GmbH & Co. KG, Institut für experimentelle Dermatologie, Universität Witten-Herdecke; JenLab GmbH (industrielle Nutzung, GoSpace)



Immuno: Weshalb ist das Immunsystem unter Weltraumbedingungen beeinträchtigt?

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Neben Schwerelosigkeit und Strahlung könnten vielfältige Stressfaktoren wie Isolation, Arbeitsbelastung und Störungen des Schlafrhythmus zu den Auslösern der lange bekannten Schwächung des Immunsystems bei Astronauten gehören. Mit vergleichbaren Problemen unseres Abwehrsystems, teilweise ausgelöst durch dieselben Stressfaktoren, haben Schwerkranke auf der Erde zu kämpfen. In beiden Fällen sollte einerseits eine ausreichende Abwehrkraft zum Schutz vor Krankheitskeimen vorhanden sein, andererseits darf das Immunsystem auch nicht überbeansprucht werden. Mit umfangreichen biochemischen Analysen, ergänzt durch psychologische Tests, untersuchen Wissenschaftler am Klinikum der Ludwig-Maximilians-Universität München im Projekt Immuno die Veränderungen des Immunsystems der ISS-Langzeit-Crews. Aus Vergleichen mit Isolations- und Betruhestudien erwarten sie Aufschlüsse über die Rolle der einzelnen Faktoren, die das Immunsystem schwächen sowie über den Mechanismus der Immunabwehr. Diese Kenntnisse sind die Voraussetzung für die Entwicklung neuer vorbeugender sowie therapeutischer Maßnahmen für den Einsatz beim Astronauten sowie beim Schwerkranken in der Intensivmedizin.

Experimentbeschreibung:

Vor, während und nach den Weltraummissionen werden bei den Astronauten Blut-, Speichel- und Urinproben genommen und anschließend auf der Erde im Labor untersucht. Das ISS-Experiment ist zu Vergleichszwecken in ein umfangreiches terrestrisches Forschungsprogramm eingebettet:

- Parabelflüge
- Studien in der Antarktis auf der Concordia sowie auf der Neumayer III-Station, Mars500 Langzeit-Isolationsexperiment
- Bettruhe- und klinische Studien

Der niederländische ESA-Astronaut Andre Kuipers entnimmt sich am 26. April 2012 im europäischen Columbus-Modul eine Blutprobe für das Immuno-Experiment. Die Blutproben werden anschließend in einem der Gefrierschränke der ISS – dem Minus Eighty Laboratory Freezer for ISS 1 (MELFI-1) – aufbewahrt, um später mit Sojus TMA-22 für die Untersuchung zur Erde zurückzukehren.

Status:

Die Messungen auf der ISS begannen bereits im April 2006. Nach einer längeren Unterbrechung wurden sie Ende 2013 mit zwölf Astronauten abgeschlossen. Zwei Nachfolge-Experimente in Kooperation mit amerikanischen und russischen Wissenschaftlern sind bereits in Vorbereitung.

Ergebnisse:

Erste Ergebnisse von acht Astronauten und Kosmonauten zeigen, dass sogenannte „Stress-response“-Systeme im Körper während des Langzeit-Raumfluges aktiviert werden und diese biologischen Veränderungen mit psychischem Stress und einer nicht adäquaten Immunfunktion einhergehen.

Diese Ergebnisse zeigen, dass das Immunsystem der Astronauten im Weltall aus dem Gleichgewicht gerät. Diese sogenannte Immun-Dysbalance ist bei den meisten Astronauten aber im Ausmaß unterschiedlich ausgeprägt. Die nun möglichen abschließenden Analysen dieser Studie und die Gegenüberstellung ihrer Daten zu laufenden klinischen und raumfahrtbedingten, erdgebundenen Studien werden bei der Interpretation der Ergebnisse herangezogen.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Fortschritte im Verständnis des Immunsystems sind für Patienten vor allem auf der Intensivstation eminent wichtig. Im Rahmen dieser Projekte auf der ISS und auf der Erde versuchen die Wissenschaftler auch mittels nicht-invasiver Atemgasanalyse, Rückschlüsse auf den Status des Immunsystems zu ziehen. Erste Tests auf Parabelflügen verliefen erfolgversprechend. Die nicht-invasive Atemgasanalyse zur Erfassung des Immunsystems-Status könnte zukünftig Blutanalysen ergänzen oder sogar überflüssig machen.

ISS-Zeitraum	April 2006 bis November 2013
Unterbringung	Columbus-Modul
Experimentator	PD Dr. Alexander Choukèr
Einrichtung	Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München
Bereich	Humanphysiologie
Partner	ESA; NASA; IBMP Moskau



Thomas Reiter sammelt während der Astrolab-Mission Proben



Atemanalyse im Einsatz auf der Intensivstation der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München



Gravitationsbiologie – Schwerkraft und ihre Auswirkungen

Die Schwerkraft bestimmt entscheidend das Leben auf der Erde. Alle Vorgänge laufen auf unserem Heimatplaneten unter dem Einfluss von Gravitation ab. Deswegen lässt sich deren Bedeutung für viele Funktionen des Lebens nur in Schwerelosigkeit erforschen. Aber erst die Raumfahrt macht es möglich, den Faktor Schwerkraft zu verändern oder ganz auszuschalten. Dabei beobachten die Wissenschaftler, wie Zellen und Organismen reagieren und wie biologische Vorgänge unter diesen Bedingungen ablaufen.

Bei normalen Schwerkraftbedingungen auf der Erde wachsen Pflanzenwurzeln immer in Richtung Erdmittelpunkt, Sprosse dagegen zum Licht. Wie gelingt ihnen das? Wie orientieren oder entwickeln sich Lebewesen bei fehlender Schwerkraft? Aus den Weltraumexperimenten gewinnen die Forscher Erkenntnisse über die Mechanismen, mit denen Organismen – seien es Einzeller oder Menschen – die Schwerkraft wahrnehmen und auf sie reagieren. Schließlich sind Erdanziehung und Leben in der Evolution seit rund dreieinhalb Milliarden Jahren untrennbar miteinander verbunden. Die Ergebnisse aus dieser Forschung sind nicht nur für die botanische oder zoologische Grundlagenforschung interessant, sondern bilden auch die Basis, biotechnologische Prozesse und raumfahrtmedizinische Probleme zu begreifen. Zudem ist das Verständnis des Pflanzenwachstums in Schwerelosigkeit Grundvoraussetzung zur Entwicklung bioregenerativer Lebenserhaltungssysteme, die als Ergänzung oder Ersatz der derzeit genutzten physiko-chemischen Systeme bei exploratorischen Langzeitmissionen unabdingbar notwendig sind. Insgesamt sechs Experimente deutscher Wissenschaftler wurden bislang zu diesen grundlegenden gravitationsbiologischen Fragen auf der ISS durchgeführt, je drei zu Fragen der Schwerkraftwahrnehmung und -verarbeitung bei Pflanzen beziehungsweise zur Entwicklung von Insekten und Kaulquappen.

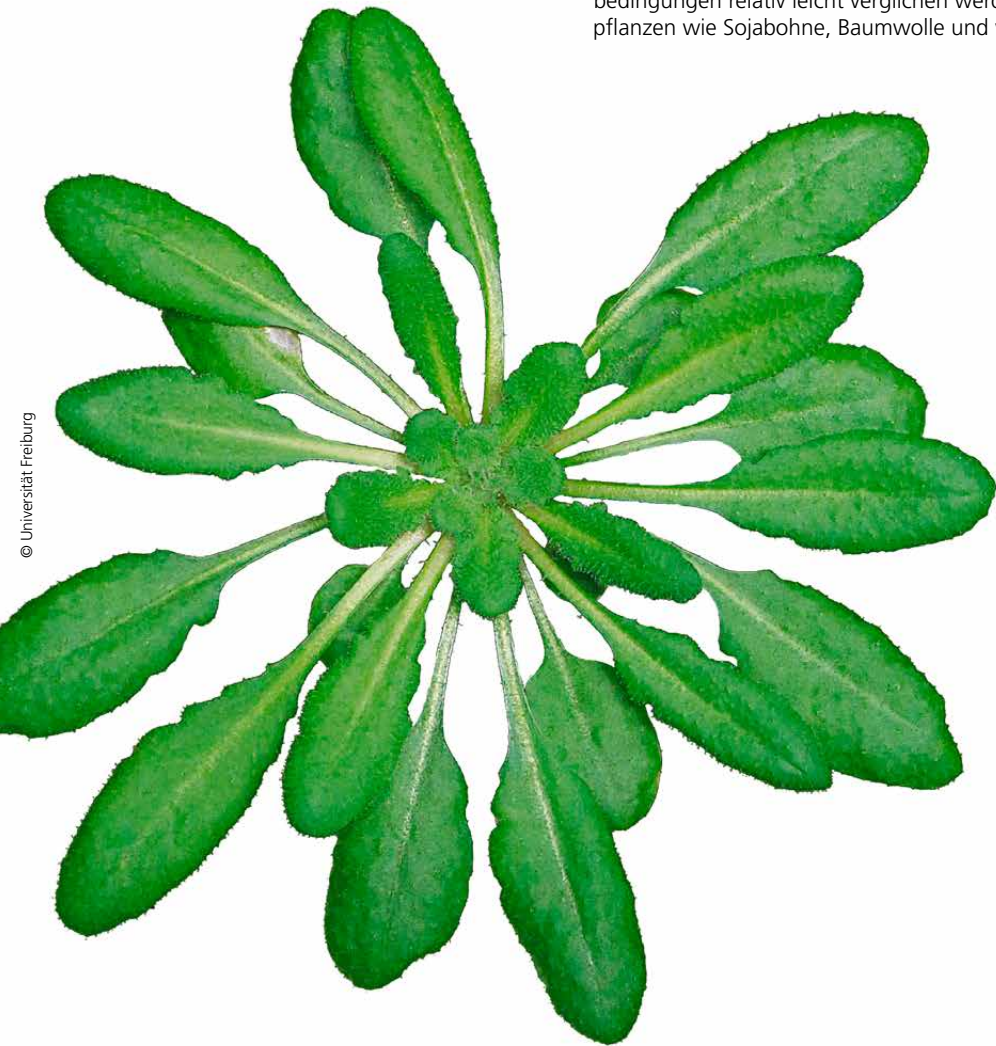
Vier weitere Experimente befassen sich mit Fragen zur Wirkung veränderter Schwerkraft auf Zellen des Immunsystems. Sie verfolgen damit einen molekularen, bio-chemischen Ansatz, um den Gründen für die Schwächung des Immunsystems bei Astronauten auf die Spur zu kommen und haben daher einen engen Bezug zur Raumfahrtmedizin. Dies gilt auch für ein Experiment zur Muskelphysiologie an Mäusen, das kommende Untersuchungen an Astronauten vorbereitet und ergänzt.

AT-Space: Einfluss der Schwerkraft auf Pflanzengene

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Vielleicht noch mehr als für andere Organismen ist es für Pflanzen wichtig, die Schwerkraft wahrzunehmen und darauf zu reagieren: Wurzeln müssen zur Verankerung und zur Nährsalz- und Wasseraufnahme in den Boden wachsen (positiver Gravitropismus), der Spross nach oben (negativer Gravitropismus), um die Blätter für die Photosynthese zum Licht zu bringen. Das Experiment AT-Space der Universität Freiburg sollte helfen, die verschiedenen Schritte bei der Wahrnehmung und Verarbeitung von Schwerkraft bei Pflanzen auf molekularer Ebene besser zu verstehen. Gravitationsbiologen wollen dabei vor allem wissen, ob die Schwerkraft die Ausprägung bestimmter Gene im Organismus anstößt, ob dies in verschiedenen Organen wie Wurzeln und Sprossen unterschiedlich ist und ob die Mechanismen in Pflanzen auf der Erde und unter Schwerelosigkeit im All identisch sind.

Untersuchungsobjekt war die Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*) – die Modellpflanze der Genetiker: Aufgrund ihres kurzen Lebenszyklus, ihrer geringen Größe und des relativ kleinen Genoms eignet sie sich ideal für Forschung in Schwerelosigkeit. So kann ihr gesamtes Genom auf einem einzigen Mikrochip analysiert und damit die Genexpression beispielsweise nach Wachstum unter den verschiedenen Schwerkraftbedingungen relativ leicht verglichen werden. Zudem ähnelt ihr Genom dem von Nutzpflanzen wie Sojabohne, Baumwolle und verschiedener Gemüsesorten und Ölpflanzen.



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

Experimentbeschreibung:

In dem ISS-Experiment wurde das Wachstumsverhalten der Wurzeln in Schwerelosigkeit sowie bei normaler Erdschwerkraft (auf einer 1g-Referenz-Zentrifuge) fotografisch dokumentiert. Nach dem Flug wurden die Pflanzen am Boden mit modernen molekular- und zellbiologischen Methoden untersucht, um den zellulären Mechanismen auf die Spur zu kommen.

Status:

Das Experiment wurde im Oktober 2007 im KUBIK-Inkubator – einer Experimentanlage der ESA im russischen Teil der ISS – durchgeführt. Die Proben wurden anschließend zur genaueren Auswertung in das Labor der Wissenschaftler gebracht.

Ergebnisse:

Die Analysen zeigen, dass die Expression vieler Gene in Schwerelosigkeit verstärkt, anderer aber auch gehemmt ist. Die Wissenschaftler konnten viele dieser Gene identifizieren und bestimmten Aufgabenbereichen zuordnen, um so zu einem umfassenden Bild der Schwerkrafteffekte auf genetischer Ebene zu gelangen. Offensichtlich sind vor allem Gene aus den Bereichen, die im Zusammenhang mit Stressantworten der Pflanze zu sehen sind (unter anderem Wassermangel, Hormonveränderungen, Salzstress) in Schwerelosigkeit verändert – ein Anzeichen, dass der Wegfall der Schwerkraft von den Pflanzen als Stress verstanden wird.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Dieses Experiment ist der Grundlagenforschung zuzuordnen. Allerdings ist ein genaues Verständnis der Wahrnehmung und Verarbeitung von Schwerkraft in Pflanzen auch von Bedeutung für die Anwendung. Dies gilt zum einen für die Landwirtschaft, insbesondere im Hinblick auf das Verständnis der Mechanismen, die nach einem Sturm zum Wiederaufrichten von Gräsern und Getreiden führen (Minimierung von Ernteverlusten), zum anderen für den Einsatz von Pflanzen in bioregenerativen Lebenserhaltungssystemen.



Im KUBIK-Inkubator im russischen Teil der Raumstation wurde das AT-Space-Experiment durchgeführt.

ISS-Zeitraum	Oktober 2007
Unterbringung	KUBIK-Inkubator im russischen Teil der ISS
Experimentator	Prof. Dr. Klaus Palme
Einrichtung	Universität Freiburg
Bereich	Gravitationsbiologie
Partner	ESA/NASA



In BIOLAB-Experimentcontainern wird das Wurzelwachstum der Ackerschmalwand unter verschiedenen Stufen der Schwerkraft sowie in Schwerelosigkeit untersucht. Das Bild zeigt einen Probeversuch im DLR-Nutzerzentrum für Weltraumexperimente (MUSC).

WAICO: Einfluss der Schwerkraft auf das Wachstum der Arabidopsis-Wurzeln

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Pflanzen nutzen die Schwerkraft der Erde zur Orientierung im Raum. So wird bei der keimenden Pflanze der photosynthetisch aktive Spross stets entgegen der Erdschwerkraft in Richtung Licht gelenkt, um mittels der Photosynthese energiereiche Kohlehydrate herzustellen. Die Wurzeln wachsen in den Boden zum Erdmittelpunkt hin, um den Pflanzenkörper zu verankern und mit Wasser und Nährstoffen zu versorgen. Doch wie läuft dieser – Gravitropismus genannte – Ausrichtungsvorgang unter der Erde ab? Die Wurzelhaube ist dafür mit Zellen ausgestattet, die Gravitationssensoren enthalten, sogenannte Statolithen. Neben dem Gravitropismus spielen aber auch noch andere Phänomene bei der Ausrichtung der Wurzelspitze eine Rolle. Eines hiervon ist das Hin- und Herschwingen der Spitze, wodurch die Wurzel spiralförmig wächst. Zudem reagiert die Wurzelspitze auch auf Berührungen. Das Waving and coiling of Arabidopsis roots at different g-levels (WAICO)-Experiment sollte die Einflüsse dieser Komponenten für das Wurzelwachstum bestimmen und die zugrundeliegenden Mechanismen aufklären. Versuchsobjekte hierbei waren der Wildtyp und verschiedene Mutanten der Ackerschmalwand (*Arabidopsis*).

Experimentbeschreibung:

In dem ISS-Experiment wurde das Wachstumsverhalten der Wurzeln in Schwerelosigkeit sowie bei normaler Erdschwerkraft (auf einer 1g-Referenz-Zentrifuge) fotografisch dokumentiert. Nach dem Flug wurden die Pflanzen am Boden mit modernen molekular- und zellbiologischen Methoden untersucht, um den Wachstumsmechanismen auf die Spur zu kommen.

Status:

Im Februar 2008 wurde das europäische Columbus-Labor mit dem Space Shuttle Atlantis (STS-122) zur ISS gebracht. Neben anderen Experimentanlagen stand damit auch das BIOLAB zur Verfügung – eine Anlage für gravitationsbiologische Experimente bestehend aus Inkubator, Zentrifugen und Analyse-Einrichtungen. Unmittelbar nach der Inbetriebnahme von BIOLAB durch den deutschen ESA-Astronauten Hans Schlegel führte der Franzose Léopold Eyhardt WAICO, das erste biologische Experiment in Columbus, durch. Der erste Lauf fand zwischen Februar und April 2008 statt. Nach der Auswertung ergab sich die Möglichkeit, im April/Mai 2010 einen weiteren Versuch zu unternehmen, um die Ergebnisse abzusichern und weitere molekularbiologische Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Klaus Palme in Freiburg anzuschließen.

Ergebnisse:

Die Experimente sind beendet und erlauben eine Reihe interessanter Schlussfolgerungen. So entwickelten die Wurzeln – anders als erwartet – in der Schwerelosigkeit eine deutlich geringere schraubenförmige Anordnung der äußeren Wurzelzellen. Dennoch macht die Wurzel häufiger „Kringel“ (coils), wodurch sie sich während ihres Wach-

tums wie ein hydraulischer Bohrer ins Erdreich schraubt und sich so selbst stabilisiert. Zudem kam es in Spross und Blättern bei Mutanten zu eindeutig schwerelosigkeitsbedingten morphologischen Veränderungen. Molekularbiologische Analysen weisen darauf hin, dass eine Störung im Transport des Pflanzenhormons Auxin an diesen Phänomenen beteiligt sein könnte.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Wie erwartet gelang es den Wissenschaftlern mit dem WAICO-Experiment, das generelle Verständnis des Pflanzenwachstums zu verbessern. Die Ergebnisse sind auch für eine effektivere Gestaltung der Landwirtschaft auf der Erde und für den Anbau von Pflanzen auf künftigen, längeren Weltraummissionen etwa zu Mond oder Mars von Interesse.

Start 7. Februar 2008 / Space Shuttle Atlantis (STS-122)	
ISS-Zeitraum	WAICO-1: Februar bis April 2008 WAICO-2: April bis Mai 2010
Unterbringung	BIOLAB im Columbus-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Günther Scherer
Einrichtung	Universität Hannover
Bereich	Gravitationsbiologie
Partner	ESA



Auf dem Weg zur Erde: Die Sojus-Kapsel der französischen Andromède-Mission brachte am 31. Oktober 2001 neben Victor Afanassiev, Konstantin Kozeev und Claudie Haigneré, der ersten Europäerin auf der ISS, das Tadpoles-Experiment zurück zur Erde.

Tadpoles und Xenopus: Entwicklung von Kaulquappen des Krallenfroschs in Schwerelosigkeit

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Ein zeitweiliger Aufenthalt in einer reizfreien Umgebung kann sich bei Mensch und Tier nachteilig auf die Entwicklung von Sinnesleistungen wie Sehen, Hören, Fühlen oder Riechen auswirken. Vor mehr als 40 Jahren hatten die Nobelpreisträger David Hunter Hubel und Torsten Nils Wiesel über Beeinträchtigungen des Sehens berichtet, wenn junge Katzen für eine gewisse Zeit ihre Umgebung nicht mit den Augen erfassen konnten. Diese und nachfolgende Untersuchungen an anderen Sinnessystemen führten zu der Erkenntnis, dass es eine kritische Zeitspanne in der Entwicklung von Mensch und Tier gibt, bei denen sich ein Reizentzug besonders nachteilig auswirkt. Für Sehen, Hören, Fühlen oder Riechen ist dieses Phänomen schon untersucht und nachgewiesen worden. Doch stellt sich diese altersabhängige Empfindlichkeit auch gegenüber der Schwerkraftwirkung generell und im speziellen bei der Entwicklung des Gleichgewichtssinns ein? Diese Frage lässt sich nur beantworten, wenn erstens unterschiedlich alte Kaulquappen der Schwerelosigkeit ausgesetzt werden und zweitens die Dauer der Schwerelosigkeit bei den verschiedenen Experimenten immer gleich lang ist. Die Experimente Tadpoles und Xenopus sollten daher den Einfluss der Schwerkraft auf die Entwicklung des Gleichgewichtssinns bei Kaulquappen genauer untersuchen.

Experimentbeschreibung:

Tadpoles und Xenopus sollten frühere Experimente mit dem Krallenfrosch im Rahmen der Deutschen Weltraummission D2 (1993) und der Shuttle-to-Mir-Mission SMM06 (1997) fortführen. Ulmer Wissenschaftler setzten bei den ISS-Experimenten Kaulquappen der Schwerelosigkeit aus, bei denen die Entwicklung des sogenannten vestibulo-okularen Reflexes (VOR) – einer durch eine Kippung des Tieres ausgelöste Augenbewegung – schon weiter vorangeschritten war. Demgegenüber waren frühere Krallenfrosch-Experimente in Schwerelosigkeit auf Embryonen und sehr junge Kaulquappen begrenzt gewesen, bei denen die Entwicklung des Gleichgewichtssinns während des Raumflugs begann.

Status:

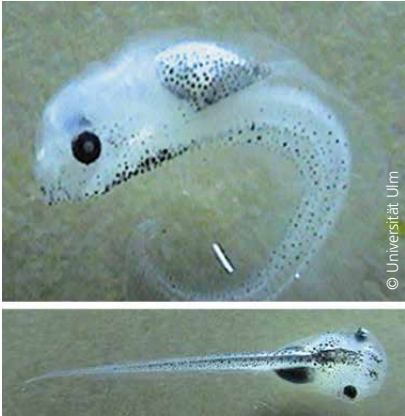
Das Experiment Tadpoles wurde während der französischen Sojus-Mission Andromède zur ISS (2001) durchgeführt. Das Experiment Xenopus folgte sieben Jahre später im Oktober 2008 in der ESA-Anlage KUBIK im russischen Teil der ISS.

Ergebnisse:

Die Schwerelosigkeit wirkt sich deutlich auf die Entwicklung des VORs und der Mechanismen des Schwimmens aus. Das Ausmaß der VOR-Änderungen war vom Alter der Kaulquappen während ihres Weltraumflugs abhängig. Zusätzlich zeigte sich aber auch eine überraschende Beziehung zwischen der Art der VOR-Veränderung und dem Auftreten einer sogenannten Schwanzlordose, einer Aufwärtzkrümmung des Schwanzes. Die Lordose kann häufig nach einem Aufenthalt in der Schwerelosigkeit oder dem Ausschalten bestimmter Gene beobachtet werden, nie aber unter normalen Entwicklungsbedingungen. Diese Schwanzlordose trat aber nur dann auf, wenn die Embryonen zum Zeitpunkt des Experimentbeginns in Schwerelosigkeit eine deutlich erkennbare Schwanzknospe entwickelt hatten oder die Kaulquappen noch keine Vorderbeinknospe erkennen ließen – sich zu Beginn des Versuchs also zwischen diesen beiden Stadien befanden. Jüngere Embryonen und ältere Kaulquappen wuchsen dagegen stets normal heran. Insgesamt bestätigten die Weltraumexperimente die Annahme, dass es nicht nur für die Entstehung des Gleichgewichtssystems, sondern auch für die Schwanzentwicklung eine kritische Zeitspanne gibt. Nach der Rückkehr zur Erde wuchsen die Organismen meist zu normalen, lebensfähigen Tieren heran – selbst wenn in bestimmten Entwicklungsschritten in Schwerelosigkeit Abweichungen auftraten. Selbst in der Schwerelosigkeit konnte schon eine Normalisierung stattfinden – ein Indiz für die enorme Anpassungsfähigkeit in der Entwicklung.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Der Krallenfrosch steht bei diesen Experimenten gewissermaßen stellvertretend für den Menschen. Dessen Sensoren des Gleichgewichtssinns ähneln vom Aufbau her nicht nur denen des Froschs, sondern lösen auch gleichartige Reaktionen der Augen aus, wenn der Mensch gekippt oder gedreht wird. Die Forschung am Krallenfrosch hilft daher auch, unser Wissen über das Gleichgewichtssystem zu verbessern und entsprechende Erkrankungen beim Menschen frühzeitig zu erkennen und ihnen vorzubeugen.



Lordotische und normale Kaulquappe

Start Tadpoles: 21. Oktober 2001 / Sojus TM-33; Xenopus: 12. Oktober 2008 / Sojus TMA-12	
ISS-Zeitraum	Tadpoles: Oktober 2001 Xenopus: Oktober 2008
Unterbringung	Tadpoles: in Experimentcontainern Xenopus: KUBIK-Inkubator im russischen ISS-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Eberhard Horn
Einrichtung	Universität Ulm
Bereich	Gravitationsbiologie
Partner	ESA

CRiSP: Wie entwickeln sich Grillen im Weltraum?

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Das Experiment Crickets in Space (CRiSP) untersuchte den Einfluss der Schwerkraft auf die Embryonalentwicklung von Grillen. Insekten sind besonders interessante Studienobjekte, weil sie die Schwerkraft prinzipiell ähnlich wie wir Menschen und andere an Land lebende Wirbeltiere wahrnehmen. Die Schwerkraft wird hier durch das Zusammenspiel zweier Prinzipien erfasst: von den eigentlichen Schweresinnesorganen sowie durch die Messung von Lageveränderungen des Körpers mittels Gelenkrezeptoren in den Beinen. Bei den Grillen sind sogenannte Kolbenhaare hierfür zuständig, die sich an Körperanhängseln des Hinterleibs befinden.

Experimentbeschreibung:

CRiSP baut auf Ergebnissen der Spacelab-Mission Neurolab aus dem Jahr 1998 auf. Während bei Neurolab die Befruchtung der Eier vor der Mission noch auf der Erde stattgefunden hatte, erfolgte sie beim ISS-Experiment während des Aufenthalts in Schwerelosigkeit. Dadurch konnten sehr frühe Stadien bei der Entwicklung des Schweresinnes erfasst werden.

Status:

Das Grillen-Experiment wurde während der italienischen ISS-Taximission Eneide im April 2005 durchgeführt und ist abgeschlossen.

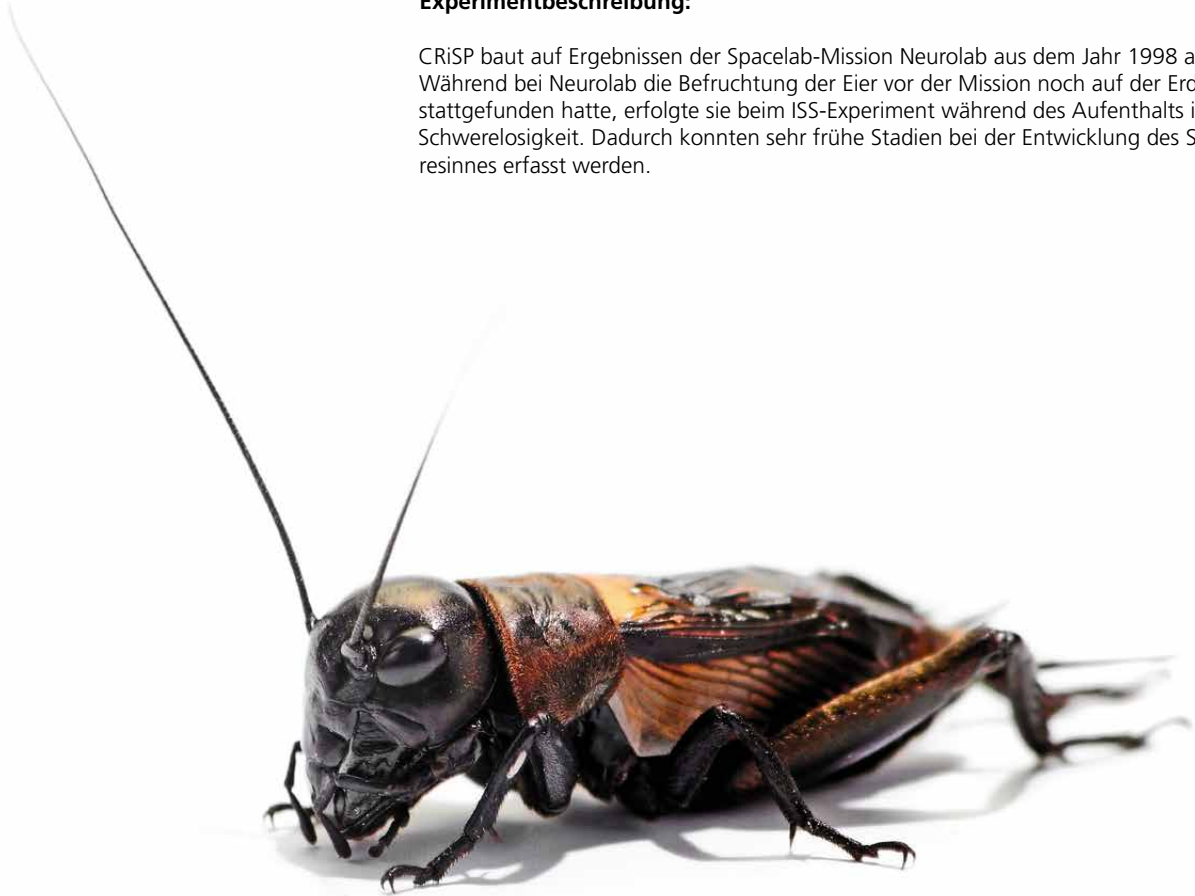
Ergebnisse:

Die Ergebnisse zeigen, dass die Entwicklung des Schwere-Sinnessystems in den Antennen der Grillen weitgehend unabhängig von den Schwerkraftbedingungen abläuft, das heißt anatomisch zeigen sich keine Veränderungen. Bestimmte Neurone im Gehirn hingegen wandelten ihre Funktion. Da das Verhalten der Tiere jedoch weitgehend normal war, sprechen diese Befunde für eine schnelle Anpassung an modifizierte Schwerkraftbedingungen. Sehr wahrscheinlich wird das normale Verhalten durch ein neu gelerntes, verändertes Zusammenspiel aller bei der Schwere-Wahrnehmung beteiligten Sinnessysteme, das heißt dem Kolbenhaarsystem und dem Schweresinnesorgan im Kopf der Tiere, ermöglicht. Die Tiere scheinen ihre neuronalen Strukturen in Abhängigkeit ihrer Verwendung umzubauen, um die Funktionen des Nervensystems zu erhalten, anzupassen und gegebenenfalls zu erweitern. Diese sogenannte neuronale Plastizität war bei den Insekten besonders ausgeprägt. Zudem entwickelten sich die Grillenlarven in Schwerelosigkeit schneller als auf der Erde.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Bei diesem Experiment handelt es sich um Grundlagenforschung zur Embryonalentwicklung und insbesondere zur neuronalen Plastizität, einem sehr aktuellen Thema in der Neurobiologie.

Start 15. April 2005 / Sojus TMA-6	
ISS-Zeitraum	April 2005
Unterbringung	KUBIK-Inkubator im russischen ISS-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Eberhard Horn
Einrichtung	Universität Ulm
Bereich	Gravitationsbiologie
Partner	ESA



MDS-Muscle: Mäuse helfen bei der Entwicklung von Maßnahmen gegen Muskelabbau

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Schwerelosigkeit, aber auch Bettlägerigkeit und eine bewegungsarme Lebensweise führen beim Menschen zum Abbau des Muskel- und Knochensystems (Muskelatrophie, Osteoporose). Trotz der Entwicklung verschiedener Trainingsmethoden ist es bislang nicht hinreichend gelungen, diese Veränderungen vor allem bei Langzeitmissionen im Weltraum vollständig zu unterbinden. Insofern ist es unbedingt notwendig, die molekularen Mechanismen des Abbaus besser zu verstehen, um so neue Ansatzpunkte für die Entwicklung wirksamerer Gegenmaßnahmen für Astronauten, aber auch für alte und kranke Menschen auf der Erde zu finden. Vergleichende Versuche an Mäusen und Ratten sind in diesem Zusammenhang aus zwei Gründen sehr attraktiv: Zum einen laufen die Veränderungen an diesen Organismen wegen ihrer kürzeren Lebenszeit sehr viel schneller ab, zum anderen können umfangreiche anatomische, biochemische und molekularbiologische Verfahren eingesetzt werden.

Experimentbeschreibung:

Experimente an Mäusen und Ratten in Schwerelosigkeit waren in der Vergangenheit auf relativ kurze Zeiträume (fünf bis 20 Tage) begrenzt. Beim Mice Drawer System (MDS)-Experiment verbrachten die Mäuse 91 Tage an Bord der ISS.

Status:

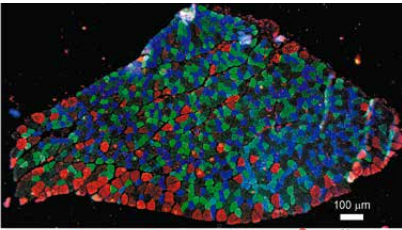
Die MDS-Experimentanlage wurde im Auftrag der italienischen Raumfahrtagentur ASI von Alcatel/Alenia-Space in Zusammenarbeit mit Prof. Cancedda (Universität Genua) für sechs Mäuse entwickelt und gebaut. Ein internationales Wissenschaftlerteam mit Arbeitsgruppen aus Italien, Deutschland und Japan hatte sich zusammengefunden, um die Effekte der Langzeit-Schwerelosigkeit auf Skelettmuskeln von Mäusen mit den verschiedensten modernen Methoden zu untersuchen. MDS wurde mit den Space Shuttle Discovery (STS-128) zur ISS und mit Atlantis (STS-129) wieder zur Erde zurück gebracht. Parallel zum Weltraumexperiment wurden in einer MDS-Anlage am Boden sowie in einem normalen Laborkäfig an der Universität Genua entsprechende Kontrollexperimente auf der Erde durchgeführt. Nach einem detailliert ausgearbeiteten Programm wurden die biologischen Gewebeproben anschließend zur weiteren Analyse an die beteiligten Wissenschaftler verteilt.

Ergebnisse:

Die in Schwerelosigkeit gehaltenen Mäuse zeigten eine eindeutige Muskelatrophie. Diese war allerdings nur wenig stärker ausgeprägt als bei Mäusen, die in früheren Missionen für etwa 20 Tage im Weltraum geflogen waren. Die Forscher vermuten, dass sich nach einer gewissen Zeit in Schwerelosigkeit ein neues Gleichgewicht ausbildet. Die Atrophie war in verschiedenen Muskeln unterschiedlich ausgeprägt: Wie erwartet war der Schollenmuskel der Wade (Musculus soleus) stärker betroffen als der sogenannte Lange Zehenstrecker (EDL = Extensor digitorum longus), da ersterer ganz wesentlich im Sinne eines „Anti-Schwerkraft-Muskels“ für die körperliche Haltungskontrolle bei der Fortbewegung auf der Erde verantwortlich ist. Die Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Dieter Blottner an der Charité Berlin befasste sich vor allem mit speziellen mikroskopischen Auswerteverfahren, um die strukturellen und molekularen Zellveränderungen im Skelettmuskel in Schwerelosigkeit näher zu analysieren. Die Wissenschaftler wendeten hierfür bestimmte Methoden zur Antikörperfärbung (Immunhistochemie) mit anschließender mikroskopischer Analyse mit einem speziellen Verfahren (konfokales Laser Scanning). Zusätzlich wurden molekularbiologische Mikrochipverfahren eingesetzt, um erstmalig funktionelle Signalwegketten im Skelettmuskel in Schwerelosigkeit zu untersuchen. Folgende Veränderungen konnten im Soleus nachgewiesen werden: Veränderungen im Fasertypenmuster (Typ 2 > Typ 1), die mit einer intrazellulären Verlagerung des Enzyms NOS-1 (Nitric Oxide Synthase-1) einhergehen, Zunahme von Ionenkanälen im Sarcolemm (Zellmembran der Muskelzellen), Abnahme der Calcium-aktivierten Kaliumkanäle, Abnahme der Hormone Interleukin-6 und IGF-1 (Insulin-like growth factor), um nur einige zu nennen. Im Zehenstreckermuskel (EDL) traten diese Veränderungen nicht auf oder gingen manchmal sogar in die entgegengesetzte Richtung. In diesem Muskel scheinen bestimmte kompensatorische oder schützende Stoffwechselwege und Signalkaskaden in Schwerelosigkeit aktiviert zu werden.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

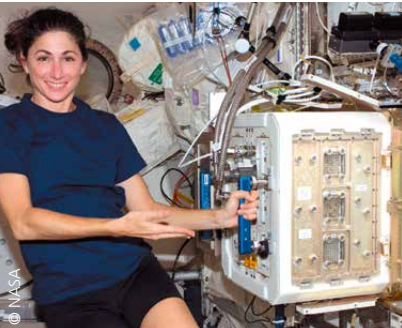
Das MDS-Muscle Experiment auf der ISS hat neue Erkenntnisse über den Mechanismus des Muskelabbaus in Schwerelosigkeit auf anatomischer, biochemischer und molekularer Ebene erbracht. Möglicherweise bieten die Eiweißstoffe NOS-1, IGF-1 und IL-6 neue molekulare Ansatzpunkte für die Entwicklung innovativer Gegenmaßnahmen gegen Muskelabbau im Weltraum und auf der Erde. Deren Potenzial muss nun in weiteren Studien auch am Boden erforscht werden.



Unterschiedliche Muskelfasertypen im Zehenstrecker-Muskel der Maus



Käfige fertig für den Weltraumflug: Sechs Mäuse haben in der MDS-Muscle-Anlage Platz.



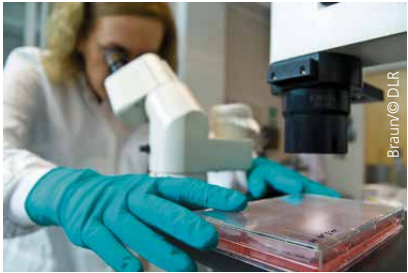
NASA-Astronautin Nicole Stott bei der Installation der MDS-Anlage auf der ISS

Start 29. August 2009 / Space Shuttle Discovery (STS-128)	
ISS-Zeitraum	August bis November 2009
Unterbringung	EXPRESS-Rack im Destiny-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Dieter Blottner
Einrichtung	Charité Berlin
Bereich	Gravitationsbiologie
Partner	ASI (Prime), NASA, JAXA





Zellkulturen auf engstem Raum: Die CellBox-Experimentkammer ist etwa smartphonegroß. Das Foto zeigt die Kammer mit Pumpe und Tanks für die Nähr- und Fixierlösung der Zellen.



Die Wissenschaftler vermehren die menschlichen Immun- und Schilddrüsenkrebszellen im Labor für ihren Einsatz im Weltraum. Nur die besten Kulturen werden in die Experimentkammern eingesetzt und dürfen auf die Internationale Raumstation, wo sie in Schwerelosigkeit untersucht werden.

CellBox-1: Neue Ansätze zur Krebstherapie und zur Gewebezüchtung?

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Das Immunsystem von Astronauten wird durch den Weltraumaufenthalt geschwächt. Doch verstehen wir bisher weder die genauen Ursachen noch die Mechanismen. Dies liegt sicherlich auch daran, dass für ein gesundes Immunsystem bei Wirbeltieren – also auch beim Menschen – ein äußerst komplexes Zusammenspiel von verschiedenen Organen, Zelltypen und Molekülen notwendig ist. Neben der Haut, die sich gewissermaßen als erste Barriere eindringenden Krankheitserregern entgegenstellt, gibt es zwei weitere Beschützer: Zum einen verfügt unser Körper über das angeborene, unspezifische Immunsystem, das schon sehr früh in der Evolution entstand und seitdem weitgehend unverändert blieb. Zum anderen entwickelten die Wirbeltiere zusätzlich eine komplexe, adaptive Immunabwehr, die uns noch intelligenter und effektiver vor Krankheitserregern schützt. Sie erkennt die „Angreifer“ und ist selbstständig in der Lage, gezielt zelluläre Abwehrmechanismen und molekulare Antikörper zu entwickeln. Um die Ursachen für das geschwächte Immunsystem von Astronauten zu finden, verfolgt das DLR Raumfahrtmanagement derzeit zwei Ansätze: Zum einen untersuchen Wissenschaftler die Veränderungen von Komponenten des Immunsystems im Blut von Astronauten. Zum anderen werden die Effekte von Schwerelosigkeit auf zellulärer Ebene bei verschiedenen Organismen und Zellkulturen analysiert. Hier setzt das CellBox-1-Experiment an, das sich mit dem Einfluss von Schwerelosigkeit auf menschliche Schilddrüsenkrebszellen beschäftigt. Diese Zellen wachsen in Schwerelosigkeit zu großen kugelförmigen Haufen aus tausenden von Tumorzellen – den sogenannten dreidimensionalen multizellulären Tumorsphäroiden – heran, die dem ursprünglichen Tumor ähneln. Versteht man die Mechanismen dieser Sphäroidbildung, könnte man dieses Wissen nutzen, um vielzellige Tumorsphäroide zu züchten. Ließen sich diese Tumor-Zellhaufen künstlich auf der Erde herstellen, dann könnten Pharmaunternehmen Antitumormedikamente gegen viele Krebsarten testen ohne auf Tierversuche zurückzugreifen – eine Revolution in der Krebsforschung.

Experimentbeschreibung:

Die Zellen wurden in sechs kleinen Experimentkammern – sogenannten Biorack Typ1-Containern von Zigarettenschachtel-Größe – mit der Mission SpaceX-3 zur ISS gebracht. Die Hardware befand sich zusammen mit Nachschub, aber auch anderen wissenschaftlichen Geräten und Proben in der Dragon-CRS3-Kapsel, die an der Spitze einer Falcon-9-Rakete am 18. April 2014 zur ISS gestartet ist. Nach dem Andocken wurden die Container von den Astronauten in der Nanoracks CellBox im US-amerikanischen Destiny-Modul installiert. Nach zwei, drei und acht Tagen in Schwerelosigkeit wurden die Zellkulturen fixiert und anschließend nach 30 Tagen auf der ISS wiederum mit der Dragon-Kapsel zur Erde zurückgebracht. Anschließend untersuchen die Wissenschaftler in den Heimatlaboren die in Schwerelosigkeit gezüchteten Tumorzellhaufen. Für Transport und Durchführung der Experimente wurde erstmals ein kommerzieller Dienstleister beauftragt: die Firma Nanoracks, 2008 gegründet, um die Nutzung der

ISS zu kommerzialisieren und in den USA für weitere Nutzer zu öffnen. Das DLR testet mit der CellBox-Mission – zusätzlich zur ISS-Nutzung über die ESA und über bilaterale Kooperationen – neue Wege, um deutschen Wissenschaftlern vergleichsweise schnell und kostengünstig Experimentiermöglichkeiten im Weltraum anzubieten.

Status:

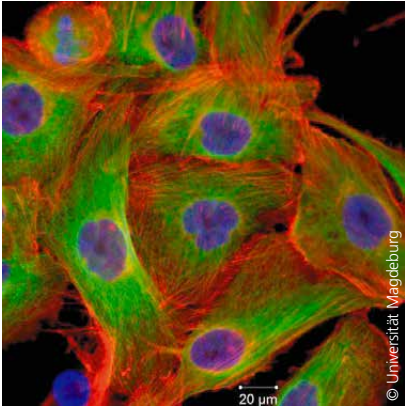
Die Vorbereitungen für das Experiment sind abgeschlossen. Der Start der Mission SpaceX-3 erfolgte am 18. April 2014.

Ergebnisse:

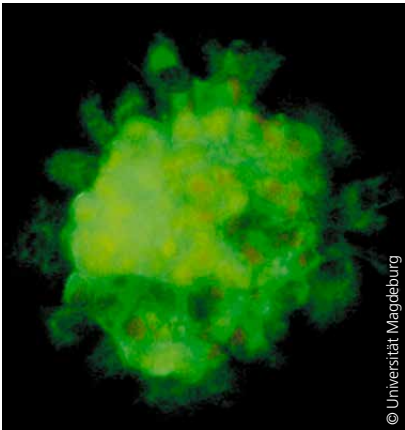
Ergebnisse aus dem ISS-Experiment liegen noch nicht vor. Allerdings weiß man aus früheren Weltraumexperimenten wie beispielsweise aus dem deutsch-chinesischen SIMBOX/Shenzhou Projekt aus dem Jahr 2011, dass bei den Schilddrüsentumorzellen die Expression verschiedener Gene und Proteine aus unterschiedlichen physiologischen Prozessen in Schwerelosigkeit verändert ist. So sind die Steuerung von Krebszellproliferation und Metastasierung genauso wie Zelltod (Apoptose), Zytoskelett, Adhäsion/ Extrazelluläre Matrix, Proliferation, Stressantwort, Migration, Angiogenese und Signaltransduktion von den Weltraumbedingungen beeinflusst. Die Zunahme der Genexpression bestimmter Wachstumsfaktoren wie Epidermal Growth Factor (EGF) und Connective Tissue Growth Factor (CTGF) stimmte mit der Entstehung von gewebeähnlichen Strukturen überein und könnte daher für die Steuerung der Sphäroidbildung entscheidend sein. Diese vielversprechenden Ergebnisse sollen nun im CellBox-Experiment untermauert und erweitert werden.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Die Neigung der Zellen, in Schwerelosigkeit als vielzellige Sphäroide zu wachsen, ist auch im Zusammenhang mit der Herstellung von dreidimensionalem Gewebe (Tissue Engineering) interessant. In Vorversuchen gelang es bereits, in Schwerelosigkeit Gefäßähnliche Strukturen zu züchten – ein wichtiges Ziel dieser Forschung in der Zukunft. Daher ist mittelfristig geplant, Pharmafirmen anzubieten, neue Medikamente mit Hilfe dieser dreidimensionalen Strukturen zu testen. Wenn es gelingt, in weiteren Weltraumexperimenten und begleitenden Bodenstudien die zum plötzlichen Zelltod führenden Signalwege in den Tumorzellen zu entschlüsseln, würden sich auch neue Chancen für die Entwicklung innovativer Krebsmedikamente auftun.

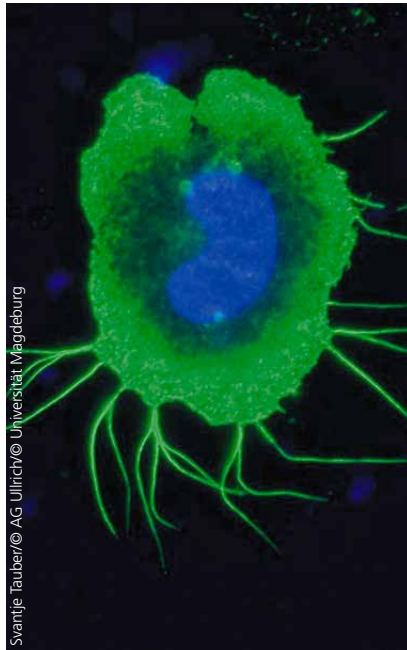


Thyroid-Krebszelllinie FTC-133 nach vier Stunden simulierter Schwerelosigkeit. Zellkerne sind blau, Komponenten des Zytoskeletts grün und rot dargestellt.



Multizelluläres Sphäroid aus menschlichen Schilddrüsenkrebszellen

Start 18. April 2014 / Dragon CRS3 (SpaceX)	
ISS-Zeitraum	April/Mai 2014
Unterbringung	Nanoracks im Destiny-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Daniela Grimm
Einrichtung	Universität Magdeburg
Bereich	Gravitationsbiologie
Partner	Nanoracks (USA)



Makrophagen in Schwerelosigkeit

CellBox-2: Wie erkennen Makrophagen „feindliche Zellen“ in Schwerelosigkeit?

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Das Immunsystem von Astronauten wird durch den Weltraumaufenthalt geschwächt. Doch verstehen wir bisher weder die genauen Ursachen noch die Mechanismen. Dies liegt sicherlich auch daran, dass für ein gesundes Immunsystem bei Wirbeltieren – also auch beim Menschen – ein äußerst komplexes Zusammenspiel von verschiedenen Organen, Zelltypen und Molekülen notwendig ist. Neben der Haut, die sich gewissermaßen als erste Barriere dem Eindringen von Krankheitserregern entgegenstellt, gibt es zwei weitere Beschützer: Zum einen verfügt unser Körper über das angeborene, unspezifische Immunsystem, das schon sehr früh in der Evolution entstand und seitdem weitgehend unverändert blieb. Zum anderen entwickelten die Wirbeltiere zusätzlich eine komplexe, adaptive Immunabwehr, die uns noch intelligenter und effektiver vor Krankheitserregern schützt. Sie erkennt die „Angreifer“ und ist selbstständig in der Lage, gezielt zelluläre Abwehrmechanismen und molekulare Antikörper zu entwickeln. Um die Ursachen für das geschwächte Immunsystem von Astronauten zu finden, verfolgt das DLR Raumfahrtmanagement derzeit zwei Ansätze: Zum einen untersuchen Wissenschaftler die Veränderungen von Komponenten des Immunsystems im Blut von Astronauten. Zum anderen werden die Effekte von Schwerelosigkeit auf zellulärer Ebene bei verschiedenen Organismen und Zellkulturen analysiert. Hier setzt das CellBox-2-Experiment an: „Fresszellen“, die sogenannten Makrophagen, des angeborenen Immunsystems wandern durch den Körper und „fressen“ (phagozytieren) eingedrungene Mikroorganismen und andere körperfremde Substanzen. Im Experiment werden insbesondere bestimmte Oberflächenmoleküle, die für die Erkennung von Fremdkörpern und die Kommunikation zwischen den Zellen zuständig sind, in Schwerelosigkeit und unter irdischen Bedingungen auf einer 1g-Referenzzentrifuge untersucht. Außerdem sollen das Zellskelett und bestimmte Sekretionsprodukte – zum Beispiel Cytokine – untersucht werden. Cytokine sind besonders interessant, weil diese Proteine das Wachstum und die Spezialisierung (Differenzierung) der Zellen steuern.

Experimentbeschreibung:

Die Zellen wurden in sechs kleinen Experimentkammern – sogenannte Biorack Typ1-Container von Zigarettenschachtel-Größe – mit der Mission SpaceX-3 zur ISS gebracht. Die Hardware befand sich zusammen mit Nachschub, aber auch anderen wissenschaftlichen Geräten und Proben in der Dragon-CRS3-Kapsel, die an der Spitze einer Falcon-9-Rakete am 18. April 2014 zur ISS gestartet ist. Nach ihrer Ankunft wurden jeweils drei Container von den Astronauten unter 1g-Bedingungen auf der Nanoracks-Zentrifuge in der CellBox im US-amerikanischen Destiny-Modul installiert. Die anderen drei verblieben in Schwerelosigkeit. Nach zwei und fünf Tagen wurden die Zellkulturen fixiert und anschließend nach 30 Tagen auf der ISS wiederum mit der Dragon-Kapsel zur Erde zurückgebracht. Anschließend untersuchen die Wissenschaftler in den Hei-

matlaboren die während der Weltraummission in Schwerelosigkeit und auf der Referenzzentrifuge gezüchteten Zellen. Für Transport und Durchführung der Experimente wurde erstmals ein kommerzieller Dienstleister beauftragt: die Firma Nanoracks, 2008 gegründet, um die Nutzung der ISS zu kommerzialisieren und in den USA für weitere Nutzer zu öffnen. Das DLR testet mit der CellBox-Mission – zusätzlich zur ISS-Nutzung über die ESA und über bilaterale Kooperationen – neue Wege, um deutschen Wissenschaftlern vergleichsweise schnell und kostengünstig Experimentiermöglichkeiten im Weltraum anzubieten.

Status:

Die Vorbereitungen für das Experiment sind abgeschlossen. Der Start der Mission SpaceX-3 erfolgte am 18. April 2014.

Ergebnisse:

Ergebnisse aus dem ISS-Experiment liegen noch nicht vor. Resultate aus Vorversuchen auf Parabelflügen und Höhenforschungsraketen deuten aber darauf hin, dass die Zellen des menschlichen Immunsystems bereits innerhalb von Sekunden auf den Wegfall der Schwerkraft reagieren. Sowohl das Zellskelett als auch wichtige molekulare Funktionen für die Zell-Zell-Kommunikation und die Zellwanderung werden gestört. Ob diese Störungen noch nach Tagen festzustellen oder die Zellen in der Lage sind, sich den veränderten Umweltbedingungen anzupassen, wollen Wissenschaftler mit dem CellBox-Experiment herausfinden.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Die erwarteten Ergebnisse können entscheidende Hinweise zum Einfluss von Welt- raumbedingungen auf unsere angeborene Immunität liefern und damit helfen, gene- relle Ursachen der Immunschwäche aufzudecken.



Am 18. April 2014 startete die Hardware des CellBox-Experiments an Bord des Dragon CRS3-Raumtransporters mit einer Falcon 9-Rakete zur ISS.

Start 18. April 2014 / Dragon CRS3 (SpaceX)	
ISS-Zeitraum	April/Mai 2014
Unterbringung	Nanoracks im Destiny-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Oliver Ullrich
Einrichtung	Universität Magdeburg/Universität Zürich
Bereich	Gravitationsbiologie
Partner	Nanoracks (USA)



Triplelux-A: Weltraum beeinflusst „Fressprozess“ der Makrophagen

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Das Immunsystem von Astronauten wird durch den Weltraumaufenthalt geschwächt. Doch verstehen wir bisher weder die genauen Ursachen noch die Mechanismen. Dies liegt sicherlich auch daran, dass das Immunsystem bei Wirbeltieren – also auch beim Menschen – ein äußerst komplexes Netzwerk aus verschiedenen Organen, Zelltypen und Molekülen ist. Neben der Haut, die sich gewissermaßen als erste Barriere eindringenden Krankheitserregern entgegenstellt, gibt es hier zwei weitere Beschützer: Zum einen verfügt unser Körper über das angeborene, unspezifische Immunsystem, das schon sehr früh in der Evolution entstand und seitdem weitgehend unverändert blieb. Zum anderen entwickelten die Wirbeltiere zusätzlich eine komplexe, adaptive Immunabwehr, die uns noch intelligenter und effektiver vor Krankheitserregern schützt. Sie erkennt die „Angreifer“ und ist selbstständig in der Lage, gezielt zelluläre Abwehrmechanismen und molekulare Antikörper zu entwickeln.

Um die Ursachen für das geschwächte Immunsystem von Astronauten zu finden, werden im deutschen biowissenschaftlichen Raumfahrtprogramm derzeit zwei Ansätze verfolgt: Zum einen untersuchen Wissenschaftler die Veränderungen von Komponenten des Immunsystems im Blut von Astronauten. Zum anderen werden die Effekte von Schwerelosigkeit und Weltraumstrahlung auf zellulärer Ebene bei verschiedenen Organismen und Zellkulturen analysiert.

Hier setzen die beiden Experimente Triplelux-A und -B an. „Fresszellen“, die sogenannten Makrophagen des angeborenen Immunsystems, wandern durch den Körper und „fressen“ (phagozytieren) eingedrungene Mikroorganismen und andere körperfremde Substanzen. Bei Triplelux-A, das nach dem Abschluss von Triplelux-B im Dezember 2014/Frühjahr 2015 im BIOLAB des europäischen Columbus-Moduls durchgeführt werden soll, wird der Einfluss von Schwerelosigkeit auf die Phagozytose und die Freisetzung Mikroorganismen-abtötender freier Sauerstoffradikale in Makrophagen aus Säugetieren untersucht.

ESA-Astronaut Frank De Winne arbeitet am BIOLAB im europäischen Columbus-Modul. Die Triplelux-A-Experimentcontainer werden zum Jahresende 2014 in die BIOLAB-Anlage eingesetzt.

Experimentbeschreibung:

Für das ISS-Experiment wurde ein hochempfindliches Messsystem entwickelt, bei dem die von den Zellen bei der Phagozytose produzierten speziellen Sauerstoffmoleküle ROS (Reactive oxygen species = reaktiver Sauerstoff) den Chemilumineszenz-Farbstoff Luminol oxidieren und dadurch Licht produzieren. Dieses Licht wird mit einem Photomultiplier – einer speziellen Elektronenröhre, die schwache Lichtsignale bis hin zu einzelnen Photonen durch Erzeugung und Verstärkung eines elektrischen Signals aufspürt – erfasst und dadurch auf die Phagozytose-Aktivität geschlossen. Das Experiment findet im BIOLAB von Columbus in Schwerelosigkeit sowie zum Vergleich auf einer Zentrifuge bei unterschiedlichen Schwerkraftbedingungen (bis zu 1g) statt.

Status:

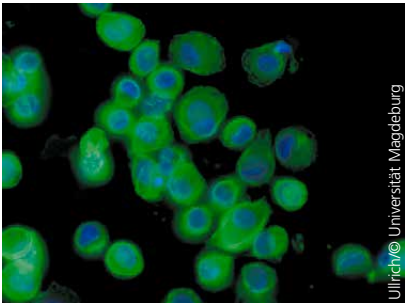
Das ESA-BIOLAB wurde 2008 mit Columbus zur ISS gebracht. Am Jahresende 2014 werden die Zellen für das Triplelux-A Experiment im gefrorenen Zustand zur Raumstation transportiert, dort vor dem Experiment aufgetaut und dann zur Messung im BIOLAB eingesetzt.

Ergebnisse:

Ergebnisse aus dem ISS-Experiment liegen noch nicht vor. Allerdings deuten Resultate aus Versuchen auf Parabelflügen, Zentrifugen und bodengestützten Simulationen darauf hin, dass veränderte Schwerkraftbedingungen in der Tat die Phagozytose-Aktivität und die Freisetzung von Sauerstoffradikalen in Makrophagen beeinflussen. Dies könnte bedeuten, dass hier zumindest eine Ursache für die beeinträchtigte Immunfunktion beim Menschen in Schwerelosigkeit erkannt werden kann.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Die erwarteten Ergebnisse können entscheidende Hinweise zum Einfluss von Weltraumbedingungen auf die angeborene Immunität liefern. Sie helfen damit, generelle Ursachen der Immunschwäche aufzudecken. Zudem eignet sich das für das Experiment entwickelte Testsystem auch für Anwendungen auf der Erde – so beispielsweise für Chemikalientests und Überwachungsaufgaben in der Umweltanalytik. Die Wissenschaftler hoffen, dass dieses Zell-basierte Triplelux-Testsystem in Zukunft Tierversuche ersetzen könnte.



Makrophagen, angefärbt mit den Fluoreszenzfarbstoffen Aktin und DAPI

ISS-Zeitraum	ab Ende 2014/Anfang 2015
Unterbringung	BIOLAB im Columbus-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Oliver Ullrich, Dr. C. S. Thiel
Einrichtung	Universität Magdeburg/Universität Zürich
Bereich	Gravitationsbiologie
Partner	ESA



Triplelux-B: Muschelzellen im Dienst der Raumfahrtmedizin

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Das Immunsystem von Astronauten wird durch den Weltraumaufenthalt geschwächt. Doch verstehen wir bisher weder die genauen Ursachen noch die Mechanismen. Dies liegt sicherlich auch daran, dass das Immunsystem bei Wirbeltieren – also auch beim Menschen – ein äußerst komplexes Netzwerk aus verschiedenen Organen, Zelltypen und Molekülen ist. Neben der Haut, die sich gewissermaßen als erste Barriere eindringenden Krankheitserregern entgegenstellt, gibt es hier zwei weitere Beschützer: Zum einen verfügt der Körper über das angeborene, unspezifische Immunsystem, das schon sehr früh in der Evolution entstand und seitdem weitgehend unverändert blieb. Zum anderen entwickelten die Wirbeltiere zusätzlich eine komplexe, adaptive Immunabwehr, die noch intelligenter und effektiver vor Krankheitserregern schützt. Sie erkennt die „Angreifer“ und ist selbstständig in der Lage, gezielt zelluläre Abwehrmechanismen und molekulare Antikörper zu entwickeln.

Um die Ursachen für das geschwächte Immunsystem von Astronauten zu finden, werden im deutschen biowissenschaftlichen Raumfahrtprogramm derzeit zwei Ansätze verfolgt: Zum einen untersuchen Wissenschaftler die Veränderungen von Komponenten des Immunsystems im Blut von Astronauten. Zum anderen werden die Effekte von Schwerelosigkeit und Weltraumstrahlung auf zellulärer Ebene bei verschiedenen Organismen analysiert.

Hier setzen beispielsweise die beiden Experimente Triplelux-A und -B an. „Fresszellen“, die sogenannten Makrophagen des angeborenen Immunsystems, wandern bei höher entwickelten Lebewesen wie uns Menschen durch den Körper und „fressen“ (phagozytieren) eingedrungene Mikroorganismen und andere körperfremde Substanzen. Bei Triplelux-B, das als erstes der beiden Experimente im BIOLAB des Columbus-Forschungslabors durchgeführt wird, steht der Einfluss von Schwerelosigkeit und Weltraumstrahlung auf die Phagozytose der Hämatocyten von Muschelzellen im Mittelpunkt der Forschung. Diese Zellen übernehmen im angeborenen Immunsystem bei entwicklungsgeschichtlich einfachen Tieren die Aufgaben der Makrophagen: Sie durchqueren den Körper und „fressen“ eingedrungene Mikroorganismen. Bei diesem Prozess nehmen die Hämatocyten den Fremdkörper auf und lösen ihn auf, wobei ROS (Reactive oxygen species = reaktiver Sauerstoff) entsteht.

Experimentbeschreibung:

Für das ISS-Experiment wurde ein hochempfindliches Messsystem entwickelt, bei dem die von den Zellen bei der Phagozytose produzierten speziellen ROS-Sauerstoffmoleküle den Chemilumineszenz-Farbstoff Luminol oxidieren und dadurch Licht

produzieren. Dieses Licht wird mit einem Photomultiplier – einer speziellen Elektronenröhre, die schwache Lichtsignale bis hin zu einzelnen Photonen durch Erzeugung und Verstärkung eines elektrischen Signals aufspürt – erfasst und dadurch auf die Phagozytose-Aktivität geschlossen. Das Experiment findet im BIOLAB des europäischen Columbus-Moduls in Schwerelosigkeit sowie zum Vergleich auf einer Zentrifuge bei unterschiedlichen Schwerkraftbedingungen (bis zu 1g) statt.

Status:

Das ESA-BIOLAB wurde 2008 mit dem Columbus-Labor zur ISS gebracht. Während der Blue Dot-Mission des deutschen ESA-Astronauten Alexander Gerst werden die Zellen im Sommer 2014 im gefrorenen Zustand zur Raumstation transportiert, dort vor dem Experiment aufgetaut und dann zur Messung im BIOLAB eingesetzt.

Ergebnisse:

Ergebnisse aus dem ISS-Experiment liegen noch nicht vor. Allerdings deuten Resultate aus Vorversuchen auf Parabelflügen darauf hin, dass veränderte Schwerkraftbedingungen in der Tat die Phagozytose-Aktivität der Hämatocyten reduzieren. Dies könnte – auf den Menschen übertragen – bedeuten, dass eine Abnahme der Phagozytose-Aktivität von Makrophagen, die ja bei uns die Rolle der Hämatocyten übernommen haben, zumindest eine Ursache für das geschwächte Immunsystem beim Menschen ist.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

In der Umweltprüfung haben sich die Testkomponenten des Triplelux-B-Prüfsystems zur Erfassung der immuntoxischen Wirkung von Umweltproben bereits bewährt. Die bisher geprüften Umweltproben stammen aus dem Bereich der Abwasser-Emission in Oberflächengewässern und aus Expositionen im Küstenbereich. Hinsichtlich der Früherkennung von Biotoxinen wurden mit dem Testsystem gemeinsam mit den Kooperationspartnern des EU-Projekts ALGAETOX Strategien und Datensammlungen zur Biotoxin-Erfassung in Meeresmuscheln erarbeitet. Das Prüfsystem kann zusammen mit einem Robotersystem online als „real time“-Prüfsystem zur frühzeitigen Erkennung einer immuntoxischen Wirkung in Umweltproben eingesetzt werden. Die gefrierkonservierten Hämatocyten erlauben immuntoxische Prüfungen ohne Tierversuch. Auf der Grundlage der bisherigen Ergebnisse zur Kryokonservierung ist geplant, gemeinsam mit dem National Research Council (NRC) Institute for Biotechnology Research in Montreal sowie in Zusammenarbeit mit der BBE Moldaenke GmbH und dem Fraunhofer-Institut (IBMT) in Potsdam-Golm einen online Biosensor mit Immunzellen zu entwickeln.



Welchen Einfluss üben Schwerelosigkeit und Weltraumstrahlung auf die Phagozytose der Hämatocyten von Muschelzellen aus? Diese Frage sollen Hämatocyten der Miesmuschel (*Mytilus edulis*) auf der ISS beantworten.



Der deutsche Astronaut Alexander Gerst trainiert im europäischen Astronautenzentrum den Umgang mit dem Triplelux-B-Container, den er in das BIOLAB im Columbus-Forschungslabor einsetzen soll.

ISS-Zeitraum	ab Sommer 2014
Unterbringung	BIOLAB im Columbus-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Peter-Diedrich Hansen
Einrichtung	TU Berlin
Bereich	Gravitations-/Strahlenbiologie
Partner	ESA





Strahlen- und Astrobiologie – Dem Ursprung des Lebens auf der Spur

Wie ist das Leben entstanden? Woher kommen wir? Wie hat sich die Evolution abgespielt? In der Astrobiologie erforschen Wissenschaftler fundamentale Fragen des Menschen nach dem Ursprung, der Verteilung und der Entwicklung von Leben sowie nach Lebensmöglichkeiten außerhalb der Erde. Die komplexen Fragen erfordern ein interdisziplinäres Vorgehen, das Aspekte von Kosmologie, Astronomie, Planetenforschung, Geologie, Chemie und Biologie zusammenführt. Die Frage, was Leben überhaupt ist, wird dabei immer wieder neu beleuchtet. Auch die Frage, ob irdische Lebewesen auf dem Mars überleben können, wird hier diskutiert und erforscht, indem zum Beispiel bislang unbekannte Organismen, die an lebensfeindlichen Orten der Erde gefunden wurden, auf ihre Überlebensstrategien hin untersucht werden. Die Ergebnisse der Weltraum- und Laborexperimente tragen zu einem besseren Verständnis der Widerstands- und Anpassungsfähigkeit von irdischen Organismen bei. Sie bilden eine Grundlage zur Verbesserung geeigneter „planetary protection“-Maßnahmen zur Sterilisation von Raumfahrzeugen, die zukünftig auf der Mars-Oberfläche landen sollen, um dort nach Spuren von Leben zu suchen.

Die Strahlenbiologie schafft die experimentellen und theoretischen Voraussetzungen für einen wirksamen Strahlenschutz in der Luft- und Raumfahrt – ermöglicht also eine Risikoabschätzung von Strahlenschäden und gewährleistet die Sicherheit und Arbeitsfähigkeit der Astronauten bei lang andauernden Aufenthalten im Weltraum. Dabei geht es zum einen um die dosimetrische Erfassung der Stärke und Zusammensetzung der Weltraumstrahlung, zum anderen um ihre biologische Wirksamkeit. Dabei vermessen die Wissenschaftler die Strahlenverteilung in und außerhalb der Raumstation sowie im menschlichen Körper und analysieren strahlenbedingte Erbgut-Schäden in Säugerzellen. Diese Erkenntnisse werden zunehmend auch zur Lösung terrestrischer Probleme, insbesondere beim Umweltschutz und in der Gesundheitsvorsorge, eingesetzt. Die Untersuchung der Effekte einzelner Schwerionen in biologischen Systemen ist auch für die Krebstherapie relevant, da die Mechanismen der Strahlenwirkung noch nicht vollständig verstanden sind. Die Nutzung der ISS begann für deutsche Wissenschaftler im Jahr 2001 mit DOSMAP, einem Experiment zur Strahlungsmessung in Kooperation mit NASA. Bislang wurden insgesamt 15 strahlen- und astrobiologische Projekte auf der ISS durchgeführt.



DOSMAP: Erstes deutsches biowissenschaftliches Experiment auf der ISS

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Die Erfassung der Strahlenbelastung vor allem bei bemannten Missionen ist seit den Anfängen der Raumfahrt ein unverzichtbares Element jedes Experimentalprogramms. Mit dem Dosimetric Mapping (DOSMAP)-Experiment begann im Frühjahr 2001 in Kooperation mit der NASA für die deutsche Wissenschaft die biowissenschaftliche Forschung auf der ISS. In gewisser Weise wiederholte sich hier Geschichte: Auch das allererste deutsche biowissenschaftliche Weltraumexperiment überhaupt beschäftigte sich im Jahr 1972 mit Strahlungsmessung – BIOSTACK auf Apollo 16.

Seit damals wurden für die Raumfahrt viele passive und aktive Strahlungsmessgeräte – die sogenannten Dosimeter – entwickelt und verfeinert. Passive Dosimeter liefern einen über die Zeit summierten Wert der Strahlung. Aktive Dosimeter messen aktuelle Expositionsdaten. Die langjährige Erfahrung des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin hat bei diesen Entwicklungen eine entscheidende Rolle gespielt.

Experimentbeschreibung:

Zur Erfassung der Strahlenbelastung innerhalb der ISS wurden Messungen mit vier verschiedenen Arten von Dosimetern vorgenommen, die an mehreren Stellen der ISS mit unterschiedlicher Abschirmung angebracht waren. Hierdurch sollte ein möglichst umfassendes Bild über die Strahlenbelastung gewonnen werden.

Status:

Das vom DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin und seinen nationalen und internationalen Kooperationspartnern neu entwickelte Dosimeter-Set für das Experiment DOSMAP wurde mit zwei Shuttle-Flügen im März und April 2001 zur ISS geschickt; die Messungen auf der ISS fanden im Zeitraum März bis August 2001 statt und sind abgeschlossen. In diesem Zeitraum ereignete sich auch eine Sonneneruption am 15. April 2001, deren Effekt auf die Strahlenbelastung der ISS erfasst werden konnte.

Ergebnisse:

Die inzwischen vorliegenden und bereits publizierten Ergebnisse offenbaren große Unterschiede in der Strahlenbelastung an verschiedenen Stellen des US-amerikanischen Destiny-Moduls und des Unity-Knoten (Node 1) der ISS, was durch die unterschiedliche Abschirmung erklärt werden kann. Zudem nimmt die Strahlenbelastung bei einer Veränderung der Umlaufbahn der Raumstation von 386 auf 404 Kilometer um rund 30 Prozent zu. Insgesamt ist die Strahlenbelastung wegen der besseren Abschirmung aber deutlich geringer als bei den Ende der 1990er-Jahre durchgeführten Shuttle-Missionen oder auf der russischen MIR-Station. Wegen der Komplexität des Strahlenfeldes und seiner zeitlichen Änderungen sind allerdings weitere kontinuierliche Messungen notwendig, die nach Ende des DOSMAP-Experiments mit anderen Messgeräten in Angriff genommen wurden.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Die DOSMAP-Ergebnisse sind für die Planung künftiger bemannter Weltraummissionen zum Beispiel im Hinblick auf die Auswahl geeigneter Materialien und elektronischer Bausteine, zur Konstruktion von Schutzbereichen und zur genauen Abschätzung der Strahlenbelastung der Astronauten von essenzieller Bedeutung. Auf der Erde fließen die Erkenntnisse zum Beispiel in die Strahlenschutzverordnung und Vorsorgegesetze sowie in Bauartprüfungen von Geräten und Vorrichtungen, die radioaktive Stoffe enthalten, ein.

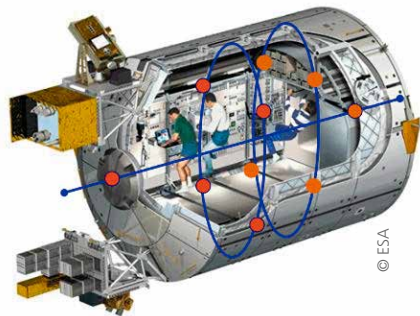


Astronaut James Voss mit dem DOSMAP-Fluggerät im Destiny-Modul

Start 8. März 2001 / Space Shuttle Discovery (STS-102) 19. April 2001 / Space Shuttle Endeavour (STS-100)	
ISS-Zeitraum	März bis August 2001
Unterbringung	Destiny-Modul und Unity-Knoten (Node 1)
Experimentator	Dr. Günther Reitz
Einrichtung	DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln
Bereich	Strahlenbiologie
Partner	NASA; nationale und internationale Forschungsinstitute



Durchgang eines Strahlenpartikels durch eine Plastikkernspurdetektorfolie von DOSMAP



Verteilung der Strahlungsdetektoren im europäischen Columbus-Modul der ISS



DOSIS und DOSIS 3D: Strahlungsmessung in der ISS

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Seit den Anfängen der Raumfahrt ist die Erfassung der Strahlenbelastung vor allem bei bemannten Missionen unverzichtbarer Bestandteil jedes Experimentalprogramms. In den letzten Jahrzehnten wurden für die Raumfahrt viele passive und aktive Strahlungsmessgeräte (Dosimeter) entwickelt und verfeinert. Passive Dosimeter liefern einen über die Zeit summierten Wert der Strahlung, aktive messen aktuelle Expositionsraten. Die langjährige Erfahrung des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin hat bei diesen Entwicklungen eine entscheidende Rolle gespielt.

Experimentbeschreibung:

Mit den Experimenten DOSIS und DOSIS 3D wird die Messung der Strahlenbelastung innerhalb der ISS – speziell im europäischen Columbus-Labor – fortgesetzt. Dabei kommen bei den Experimenten je zwei aktive und elf passive Detektorpakete zum Einsatz. Zusammen mit den erhobenen Dosimeter-Daten der Kooperationspartner NASA, JAXA und dem IBMP soll im Rahmen von DOSIS 3D eine dreidimensionale Karte der Strahlenbelastung in der ISS erzeugt werden.

Status:

Das vom DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin und seinen nationalen und internationalen Kooperationspartnern neu entwickelte Dosimeter-Set für das Experiment DOSIS wurde im Juli 2009 zur ISS geschickt. Die Messungen fanden im Zeitraum Juli 2009 bis Juni 2011 statt und sind abgeschlossen. Das Nachfolge-Experiment DOSIS 3D begann im März 2012.

Ergebnisse:

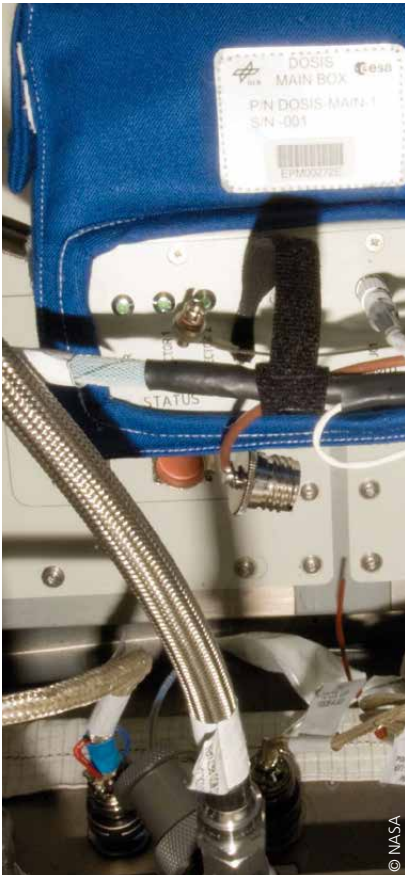
Mit DOSIS wurde eine durchschnittliche Strahlenbelastung von rund 650 μ Sievert pro Tag gemessen (zum Vergleich: in zehn Kilometer Höhe bis zu 150 μ Sievert pro Tag, am Erdboden etwa sieben μ Sievert pro Tag). Insgesamt ist die Strahlenexposition im Columbus-Labor wegen der besseren Abschirmung aber deutlich geringer als bei den Ende der 1990-er-Jahre durchgeführten Shuttle-Missionen oder auf der russischen MIR-Station. Wegen der Komplexität des Strahlenfeldes und seiner zeitlichen Änderungen – vor allem bedingt durch den Sonnenzyklus – sind allerdings weitere kontinuierliche Messungen notwendig.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Die Ergebnisse sind für die Planung künftiger bemannter Weltraummissionen unerlässlich – zum Beispiel im Hinblick auf die Auswahl geeigneter Materialien und elektronischer Bausteine, zur Konstruktion von Schutzbereichen und zur genauen Abschätzung der Strahlenbelastung der Astronauten.

Start
24. Juli 2009 / Progress 34P

ISS-Zeitraum	DOSIS: Juli 2009 bis Juni 2011 DOSIS 3D: seit März 2012
Unterbringung	Columbus-Modul
Experimentator	Dr. Günther Reitz; Dr. Thomas Berger
Einrichtung	DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln
Bereich	Strahlenbiologie
Partner	ESA; NASA; JAXA; IBMP Moskau; nationale und internationale Forschungsinstitute



Aktiver Strahlungsdetektor im europäischen Columbus-Modul



Passiver Strahlungsdetektor im europäischen Columbus-Modul



Matroshka: Ein Phantom erfasst die Strahlenbelastung auf der ISS

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Bei der Analyse der Strahlenbelastung während Weltraummissionen ist nicht nur die Quantität der verschiedenen Strahlungsarten, sondern vor allem ihre biologische Wirksamkeit von Bedeutung. Wie weit dringen beispielsweise die Strahlen in einen menschlichen Körper überhaupt ein? Wieviel und welche Art der Strahlung kommt in den verschiedenen Organen des menschlichen Körpers an? Inwieweit werden innere Organe in ihrer Funktion beeinträchtigt? Um diesen Fragen nachzugehen, befand sich von Februar 2004 bis August 2005 ein Phantom an der Außenwand der ISS, das anschließend nach seinem Außeneinsatz bis Mitte 2011 der Besatzung in der Station Gesellschaft leistete. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um einen Weltraum-Spuk, sondern um ein Experiment zur Messung der Strahlenbelastung innerhalb und außerhalb der ISS. Matroshka heißt die Spezialpuppe – entwickelt und gebaut vom DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin.

Experimentbeschreibung:

Die „Phantompuppe“ selbst – mit Kopf und Oberkörper – bildet einen menschlichen Torso nach. Sie besitzt ein Skelett und besteht aus gewebeähnlichen Materialien. Innerhalb der Puppe befinden sich an über 800 Positionen – unter anderem auch an Positionen der menschlichen Organe – aktive und passive Strahlungsdetektoren. Um die Schutzwirkung des Raumanzugs zu simulieren, umgab Matroshka während ihres Aufenthalts außerhalb der ISS ein Behälter aus Kohlefasermaterial.

Status:

Das vom DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin und seinen nationalen und internationalen Kooperationspartnern im ESA-Auftrag entwickelte Phantom Matroshka wurde im Februar 2004 zur ISS gebracht und dort mit einem EVA zunächst an der Außenseite der ISS montiert. Bis Oktober 2005 fanden hier die Messungen statt. Anschließend wurde Matroshka in die ISS geholt, um hier die Datenerfassung fortzusetzen. Im Jahr 2006 wurde sie für Messungen im russischen Swesda-Modul genutzt, danach von Oktober 2007 bis November 2008 im PIRS-Modul und schließlich von Mai 2010 bis März 2011 im japanischen Modul KIBO. Derzeit laufen Gespräche mit den russischen Partnern, um die Messungen wieder aufzunehmen.

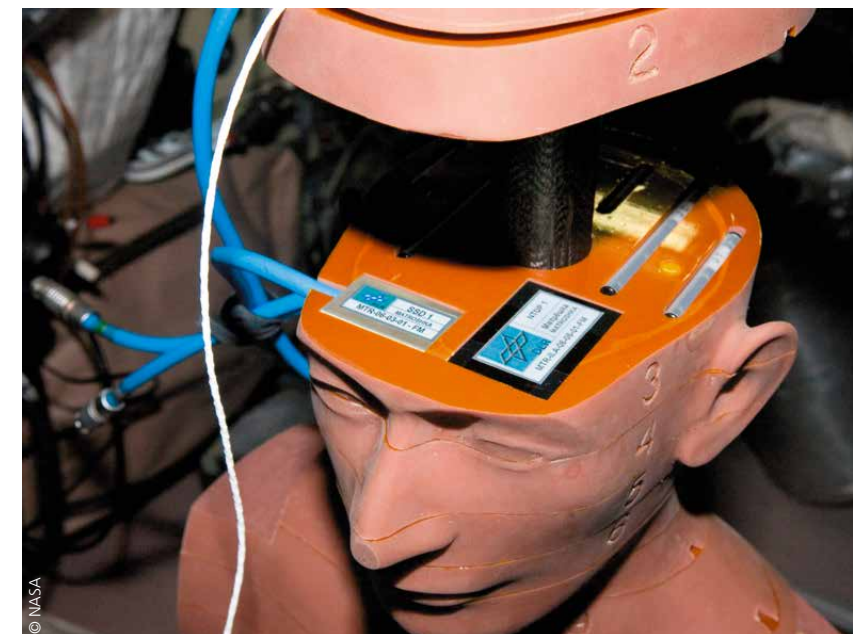
Ergebnisse:

Die von Matroshka gesammelten Daten haben zu einem genauen Bild der Tiefendosisverteilung der Strahlung im menschlichen Körper geführt. Dank der Messungen lässt sich mit höchstmöglicher Präzision abschätzen, wie viel Strahlung an den verschiedenen Organen des menschlichen Körpers ankommt. Dabei zeigte sich, dass die Haut bis zu viermal so stark belastet wird wie die inneren Organe. Bei den tiefliegenden Organen sind die Unterschiede in der Exposition relativ gering.

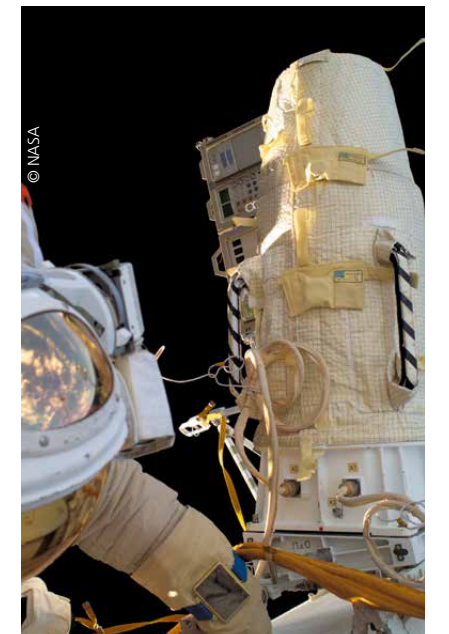
Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Durch die von Matroshka gesammelten Daten der Strahlungsart und -intensität inner- und außerhalb der ISS lassen sich die Risiken kosmischer Strahlung für den menschlichen Körper einschätzen und Maßnahmen entwickeln, die zu einem geeigneten Schutz führen sollen.

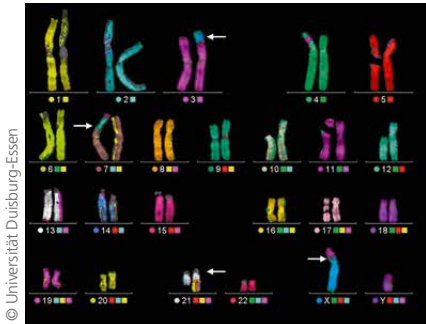
Start	29. Januar 2004 / Progress 13P
ISS-Zeitraum	Februar 2004 bis Juni 2011
Unterbringung	Swesda- und PIRS-Modul sowie KIBO-Modul
Experimentator	Dr. Günther Reitz
Einrichtung	DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln
Bereich	Strahlenbiologie
Partner	ESA; NASA; Russland; JAXA; nationale und internationale Forschungseinrichtungen



Einem Phantom in den Kopf geschaut: Im Inneren von Matroshka sind insgesamt über 800 Sensoren installiert, um die Strahlendosis in jedem Teil des Körpers genau zu messen.



Phantom Matroshka an der Außenwand der ISS



Die Aufnahme zeigt eine komplexe Veränderung der Chromosomen von Langzeitastronauten. Besonders betroffen sind in diesem Beispiel die Chromosomen 3, 7, 12, 15 und das X-Chromosom.

Chromosomes: Strahlenbelastung kann Erbgut bei Astronauten beeinträchtigen

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Die Strahlung im Weltraum ist für Astronauten ein großer Risikofaktor für ihre Gesundheit. Sensoren – sogenannte Dosimeter – messen diese Weltraumstrahlung und liefern so wichtige Aufschlüsse über ihre Stärke und Zusammensetzung. Doch wie wirkt sich diese Strahlung auf das Erbgut von Organismen und damit letztendlich von Astronauten aus? Langzeitaufenthalte des Menschen im Weltraum können aufgrund der Strahlung zu erhöhten Mutationsraten von Chromosomen, sogenannten Chromosomen-Aberrationen, führen. Der Zusammenhang von Chromosomenveränderungen und einem erhöhten Krebsrisiko zeigt, wie wichtig diese Forschung ist.

Prof. Günther Obe und Dr. Christian Johannes (Universität Duisburg-Essen) haben mit Hilfe neuer zytogenetischer Methoden im Chromosomes-Experiment mehr über die Mutationen auslösende (mutagene) Strahlenbelastung von ISS-Astronauten herausgefunden.

Experimentbeschreibung:

Für das Experiment wurden die Chromosomen von peripheren Lymphozyten im Blut der Astronauten auf Veränderungen untersucht. Dazu wurde den Astronauten zehn bis 15 Milliliter Blut einige Tage vor und kurz nach dem Flug entnommen. Lymphozyten aus dem Blut stehen gewissermaßen stellvertretend für alle Körperzellen. Sie zirkulieren mit dem Blut im ganzen Körper und besitzen zudem ein langes „Gedächtnis“, indem sie nach Stimulation zur erneuten Zellteilung in der Zellkultur auch Veränderungen zeigen, die vor längerer Zeit entstanden sind. In Vorversuchen konnte nachgewiesen werden, dass die Mutationsrate mit der Aufenthaltsdauer und der Strahlendosis steigt. Damit können Chromosomenveränderungen gewissermaßen als „biologisches Dosimeter“ herangezogen werden.

Um eine hohe Qualität der Ergebnisse zu erzielen, mussten die Proben innerhalb von 72 Stunden im Labor sein. Dort angekommen wurden die Lymphozyten aus den Blutproben aufbereitet (Mitose, Inkubation, Färbung) und mit Hilfe verschiedener mikroskopischer Analysemethoden auf verschiedene Veränderungen hin untersucht. Es folgte ein quantitativer Vergleich.

Status:

Chromosomes wurde in zwei Teilexperimenten von November 2002 bis Juli 2006 und von November 2005 bis April 2008 durchgeführt. Dabei setzten die Wissenschaftler im zweiten Teil erweiterte zytogenetische Methoden ein, um nun noch genauere Erkenntnisse über die mutagene Strahlenbelastung von ISS-Astronauten zu gewinnen.

Insgesamt wurden 13 Astronauten der ISS-Langzeitcrews untersucht. Zum Vergleich wurden Analysen an 16 Astronauten herangezogen, die sich während Shuttle-Missionen oder bei den sogenannten Taxiflügen mit Sojus-Kapseln zur ISS nur für acht bis 13 Tage im Weltraum aufgehalten hatten.

Ergebnisse:

Die Ergebnisse von ISS-Langzeit-Besatzungsmitgliedern zeigen eine leichte, signifikante Erhöhung (plus 0,33 Prozent) der Mutationsrate, während für die Kurzzeitcrews keine Veränderungen festgestellt wurden. Dabei traten bei den Langzeitastronauten sowohl Austausch- als auch komplexere Aberrationen auf.

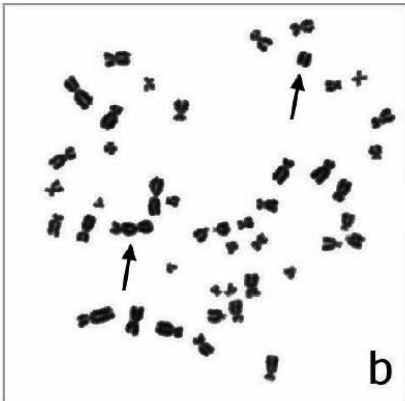
Die meisten Lymphozyten haben im Körper nur eine relativ kurze Lebensdauer und werden beständig durch im Knochenmark neu gebildete Zellen ersetzt. Darum konnten bei Kontrolluntersuchungen wenige Monate nach dem Ende der Langzeitmissionen keine Veränderungen an Chromosomen dieser Zellen mehr festgestellt werden.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass das Strahlenfeld des erdnahen Weltraums die Astronauten zwar belastet, aufgrund der schon eingesetzten Strahlenschutzmaßnahmen führen die Missionen jedoch nicht zu einer unverantwortbaren Gefährdung der Gesundheit.

Vor allem die starke Wirkung der sogenannten schweren Ionen in der Weltraumstrahlung verlangt eine verbesserte Abschirmung der Raumfahrzeuge, besonders für künftige exploratorische Langzeitmissionen zu Mond und Mars.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Mit der beim ISS-Experiment Chromosomes genutzten Methodik werden auf der Erde bereits mutagene Belastungen durch Umweltgifte beim Menschen erfasst. Insbesondere bei unkontrollierten Strahlenexpositionen (Strahlenunfälle) werden Chromosomen-schäden untersucht und gezählt, um die Dosis abzuschätzen. Hierbei wird den Ärzten eine recht genaue Information gegeben, sodass potenziell beeinträchtigte Personen entsprechend behandelt werden können.



Chromosomen in der Metaphase

Bodenexperiment: Blutproben wurden vor und nach dem Flug entnommen.

Experiment-Zeitraum	Chromosome-1: November 2002 bis Juli 2006; Chromosome-2: November 2005 bis April 2008
Unterbringung	Kennedy Space Center auf Merritt Island/Florida; Institut für Biomedizinische Probleme (IBMP) in Moskau
Experimentator	Prof. Dr. Günther Obe; Dr. Christian Johannes
Einrichtung	Universität Duisburg-Essen
Bereich	Strahlenbiologie
Partner	ESA; NASA

Expose-E: ADAPT und PROTECT: Organismen als Überlebenskünstler

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

In der ESA-Anlage Expose, angebracht an der Außenhülle des europäischen Columbus-Moduls, wurden verschiedene Organismen den harten Weltraumbedingungen ausgesetzt, um Antworten auf wichtige astrobiologische Fragen zu finden: Können Bakterien oder Pflanzensamen unter diesen extremen Bedingungen überleben? Wenn ja, wie lange? Könnte das Leben auf anderen Himmelskörpern entstanden und dann zur Erde transportiert worden sein (Panspermie-Hypothese)? Können Landekapseln irdisches Leben auf fremde Planeten bringen? Um diese Fragen zu beantworten, wurden im Rahmen des Projekts Expose-E insgesamt acht wissenschaftliche Experimente auf der Internationalen Raumstation durchgeführt – vier davon unter Federführung deutscher Wissenschaftler vor allem aus dem DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin.

Im Experiment ADAPT (Horneck, DLR Köln) sollte die Anpassungsfähigkeit von Mikroorganismen gegenüber verschiedenen Strahlungsarten und Strahlungsdosen, wie sie zum Beispiel auf der Erde oder auf dem Mars vorkommen, untersucht werden. Die Marsatmosphäre unterscheidet sich deutlich von der, die unsere Erde schützt: Die Zusammensetzung der Marsatmosphäre und der dort herrschende, niedrige Druck verhindern nicht, dass energiereiche, biologisch wirkungsvolle ultraviolette B- und C-Strahlung die Oberfläche des Mars erreicht. Diese Bedingungen könnten aufgrund des Selektionsdrucks die Resistenz einiger Organismen gegenüber UV-Strahlung erhöhen.

Die Wissenschaftler haben speziell die Anpassungs- und Überlebensstrategien von drei, aus verschiedenen Habitaten stammenden, sehr resistenten Mikroorganismen untersucht: erstens von dem Cyanobakterium *Anabaena cylindrica* (eine Blaualge), zweitens von dem salzliebenden Archaeon (Urbakterium) *Halococcus dombrowskii* und drittens von *Bacillus subtilis*, einem weitverbreiteten Bodenbakterium, das dafür bekannt ist, in seiner Überdauerungsform als Spore sowohl Austrocknung als auch hohe Dosen solarer UV-Strahlung überleben zu können.

Das Projekt PROTECT (Rettberg, DLR Köln) untersucht den Einfluss von Weltraumbedingungen auf das Überleben von bakteriellen Endosporen, die sehr resistent gegenüber einer Vielzahl von Umwelt-Extremen sowie einer Reihe von Sterilisationsverfahren sind. Laborstudien mit Sporen von Mikroorganismen, isoliert von Raumfahrzeugen

beziehungsweise aus Raumfahrzeug-Montage-Anlagen (spacecraft assembly facilities SAF), wie zum Beispiel von *Bacillus pumilus*, zeigten eine erhöhte Resistenz gegen UV-Strahlung im Vergleich zu Sporen von verwandten Labor-Stämmen. Dies führte zu der Hypothese, dass die besonderen Bedingungen der ultrareinen SAF und der dort für die Raumfahrzeuge angewandten Reinigungs- und Dekontaminierungsmaßnahmen es ermöglichen, dass eine Auswahl der resistentesten Mikroorganismen überleben. PROTECT sollte eine Stammsammlung dieser „unverwüstlichen“ Mikroorganismen, die von Raumfahrzeugen und/oder aus SAF isoliert wurden, aufbauen. Deren Resistenzverhalten wurde dann gegenüber ausgewählten, aus anthropogener Sicht extremen Umweltbedingungen – wie zum Beispiel die des Weltraums – bestimmt: im Kontext der „Planetary Protection“-Maßnahmen eine sehr wichtige Forschungsrichtung. Zusätzlich zu den astrobiologischen Experimenten ADAPT und PROTECT wurden in den beiden Experimenten DOSIS (Reitz, DLR Köln) und R3D-E2 (Häder, Universität Erlangen) die extraterrestrische sowie die UV-Strahlung gemessen, denen die Organismen bei ihrem Aufenthalt im Weltraum ausgesetzt sind. Dies ist für eine Charakterisierung der Umgebungsbedingungen unerlässlich.

Experimentbeschreibung:

Sowohl für ADAPT als auch für PROTECT wurden die Proben auf der Erde in die dafür vorgesehenen Behälter eingesetzt. Expose-E wurde mit allen Probenbehältern bestückt. Ein Teil der Kammern wurde mit Stickstoffgas gefüllt, ein anderer mit Mars-ähnlichem Gas aus überwiegend Kohlendioxid bei Mars-ähnlichem Druck. Danach wurde die gesamte Expose-E-Einheit geschlossen.

Zusammen mit anderen Experimenten wurde Expose-E auf der European Technology Exposure Facility (EuTEF) mit dem Shuttle-Flug STS-122 auf den Weg zur ISS gebracht und dort an der Columbus-Außenseite für rund anderthalb Jahre den Weltraumbedingungen ausgesetzt. Die auf der Erde mit Stickstoffgas gefüllten Probenbereiche von Expose-E wurden gegenüber dem Weltraumvakuum geöffnet und somit evakuiert. Die mit Mars-Gas bei niedrigem Druck gefüllten Bereiche blieben geschlossen. Durch diese Versuchsanordnung und die Auswahl der optischen Fenster und Filter wurden die Proben verschiedenen Bedingungen ausgesetzt: erstens nur dem Weltraumvakuum im Dunkeln, zweitens dem Weltraumvakuum in Kombination mit solarer extraterrestrischer UV-Strahlung verschiedener Intensitäten („Space-Bedingungen“), drittens einer simulierten Mars-Atmosphäre durch das CO₂-haltige Mars-Gas und viertens der simulierten Marsatmosphäre in Kombination mit der UV-Strahlung („Mars-Bedingungen“).



Die Expose-E-Proben sind für den Transport zur ISS vakuumdicht verpackt.

Die Astronauten John Olivas und Nicole Stott bei der Arbeit außen am Columbus-Modul: Sie entfernen die Expose-EuTEF-Anlage mit den Expose-E-Proben, um sie zur Erde zurückzubringen.





Zurück auf der Erde: Die Probenträger werden in Stickstoff-Atmosphäre im DLR in Köln ausgebaut.

Status:

Die Anlage Expose-E wurde am 7. Februar 2008 mit der Columbus-Mission STS-122 zur ISS gebracht und bei einem anschließenden Außenbordeinsatz auf der Außenseite des europäischen Labors installiert. Dort blieb sie bis zum Herbst 2009 und wurde dann mit einem weiteren Shuttle-Flug (STS-128) am 12. September 2009 wieder zur Erde zurückgebracht. Die Proben wurden ausgebaut und zur Analyse in die entsprechenden Forschungsinstitute gesandt.

Ergebnisse:

ADAPT: Die Weltraumexposition mit extraterrestrischer UV-Strahlung in Kombination mit Weltraumvakuum führte zu einer starken Inaktivierung der Sporen. Überlebende Zellen konnten nur in der untersten Schicht der Stapel gefunden werden. In der obersten Schicht direkt unter den Neutralfiltern, die die extraterrestrische UV-Strahlung auf ein Tausendstel verringerte, überlebten lediglich zehn Prozent der Mikroorganismen. Die Marsatmosphäre (bei geringem Druck) und die Marsstrahlung wirkte sich weniger schädlich aus: Es überlebten wesentlich mehr Organismen unter den Bedingungen des Roten Planeten als unter vollständiger Exposition. Die Mars-Überlebensrate sank im Vergleich zu den Organismen, die nicht vollständig den harten Weltraumbedingungen ausgesetzt wurden, nur zu einem geringen Prozentsatz.

PROTECT: Nach ihrer Rückkehr wurden die exponierten Sporen von PROTECT nach folgendem Analyse-Programm untersucht: erstens Vitalität und Überleben, zweitens Bestimmung der induzierten Mutationen, drittens Untersuchung der DNA-Schäden, viertens Genexpressionsanalysen und fünftens eine Charakterisierung des Erbguts und der Proteine. Die Konfrontation von Sporen – in Einfach- sowie Multischichten – mit UV-Strahlung hat einen dramatischen Effekt auf deren Überleben: Sporen, die solarer UV-Strahlung (> 110 Nanometer) ausgesetzt waren, wurden um bis zu fünf Größenordnungen stärker inaktiviert als Sporen, die von UV-Strahlung abgeschirmt waren. In einem parallelen Ansatz wurden Sporen der UV-Strahlung (> 220 Nanometer) ähnlich des Mars-Strahlenspektrums ausgesetzt. Diese Sporen wurden etwas weniger inaktiviert (zwei bis drei Größenordnungen), während teilweise beziehungsweise vollständige Abschirmung von der Mars-UV-Strahlung und der Exposition von Marsumgebungsbedingungen wie zum Beispiel Atmosphäre und Druck, das Sporenüberleben nur geringfügig beeinflusst hat. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse von ADAPT und PROTECT die enorme Überlebensfähigkeit von Mikroorganismen und Sporen – vor allem, wenn sie vor Weltraumvakuum und extrem kurzweiliger Strahlung geschützt sind.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Experimente wie ADAPT helfen uns dabei, Anpassungsstrategien und zugrundeliegenden Stoffwechselwege, die in der Evolution eine Rolle spielen, besser zu verstehen. Damit erweitern diese Experimente unser Wissen über die Entstehung und Verbreitung des Lebens im Allgemeinen und das Überleben in extremen Umweltbedingungen im Besonderen.

Ein Beispiel aus den letzten Jahren für die Anwendungsmöglichkeiten, die sich aus Experimenten und dem Wissen um Leben in extremen Umweltsituationen ergeben, ist die Entwicklung der Polymerase-Ketten-Reaktion (PCR), die durch eine hitzestabile Polymerase möglich wurde. Diese Enzyme helfen bei der Vermehrung der Erbinforma-

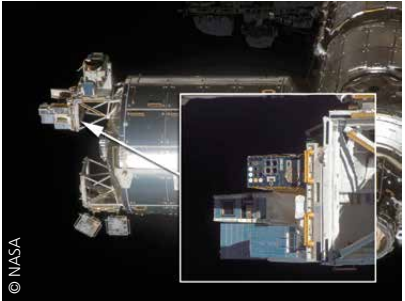
tion und schaffen die Voraussetzung für die Zellteilung. Sie stammen von Organismen, die hohe Temperaturen bevorzugen (Thermophilie), und bleiben auch bei zunächst als tödlich angenommenen, hohen Temperaturen funktionsfähig. Sie haben so die Forschung revolutioniert.

Die Ergebnisse von PROTECT helfen dabei, „Planetary Protection-“ sowie Sterilisationsmaßnahmen von Reinräumen besser entwickeln und beurteilen zu können. Sie bereichern darüber hinaus unser Verständnis zur Entstehung und Verbreitung des Lebens. Erkenntnisse zu den Überlebensstrategien von Mikroorganismen in streng kontrollierten und gereinigten Räumen spielen auch bei der Entwicklung von Desinfektionsmethoden, zum Beispiel für Kliniken, eine Rolle.

Start 7. Februar 2008 / Space Shuttle Atlantis (STS-122)	
ISS-Zeitraum	Februar 2008 bis September 2009
Unterbringung	EuTEF am Columbus-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Gerda Horneck; Dr. Petra Rettberg; Dr. Günther Reitz; Prof. Dr. Donat-Peter Häder
Einrichtung	DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln; Universität Erlangen
Bereich	Strahlenbiologie
Partner	ESA; NASA; nationale und internationale Forschungsinstitute



Vorsichtig werden die Proben nach ihrer Rückkehr zur Erde im DLR in Köln aus den Kammern genommen.



Die Experimentanlage Expose-EuTEF (European Technology Exposure Facility) an der Außenseite des europäischen Columbus-Labors



Die Astronauten John Olivas und Nicole Stott demontieren am 1. September 2009 in einem sechseinhalbstündigen Außenbordeinsatz die Expose-EuTEF (European Technology Exposure Facility) mit den Expose-E-Proben, um sie zur Erde zurückzubringen.

Expose-R: SPORES und R3D-E: Organismen als Überlebenskünstler

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Können Bakterien oder Pflanzensamen unter Weltraumbedingungen überleben und wenn ja, wie lange? Könnte das Leben auf anderen Himmelskörpern entstanden und dann zur Erde transportiert worden sein (Panspermie-Hypothese)? Dies sind einige Fragen, denen die astrobiologische Forschung nachgeht. Im Rahmen des Projekts Expose-R wurden auf dem russischen Modul der Internationalen Raumstation ISS insgesamt acht wissenschaftliche Experimente durchgeführt, um diese Fragen zu beantworten. Sechs davon kommen vom internationalen Response of Organisms to Space Environment (ROSE)-Konsortium, das vom DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin koordiniert wird.

Im Experiment SPORES, das von Frau Prof. Dr. Gerda Horneck geleitet wurde, ging es vor allem um die Überlebensfähigkeit von Organismen wie Bakteriensporen (*Bacillus subtilis*) sowie Pilz- und Farnsporen. Diese Organismen wurden den Weltraumbedingungen (Vakuum, extremen Temperaturen und ultravioletter (UV)-Strahlung) entweder einzeln oder in verschiedenen Kombinationen – ungeschützt oder durch Meteoritenmaterial geschützt – ausgesetzt. Die Ergebnisse sollten Aufschluss darüber geben, ob Meteoritenmaterial Sporen ausreichend Schutz bieten könnte, um einen langfristigen Aufenthalt im Weltraum zu überleben.

In dem ROSE 3 begleitenden Experiment R3D-E der Universität Erlangen wurden die UV-Strahlung sowie die ionisierende Strahlung gemessen, denen die Organismen bei ihrem Aufenthalt im Weltraum ausgesetzt waren. Passive Detektoren des ROSE-3-Experiments DOSIS wurden unter den Probenträgern in Expose-R eingebaut, um die aufsummierte Dosis der ionisierenden Strahlung zu messen.

Experimentbeschreibung:

Die verschiedenen Organismen wurden auf der Erde vor dem Start entweder isoliert, in beziehungsweise unter Meteoritenmaterial eingebettet, simuliertem Marsboden in Einzelschicht oder in mehreren Lagen übereinander in die Anlage Expose-R eingebracht.

Durch den Einsatz von verschiedenen Filtern konnte die Stärke und der Wellenlängenbereich der Strahlung, die auf das biologische Material einwirkte, variiert werden. Die Proben wurden sowohl in Vakuum als auch in Argongas-Atmosphäre bei Normaldruck, mit einer UV-exponierten Lage und der entsprechenden darunterliegenden Dunkellage in die Probenbehälter gefüllt.

Status:

Die Anlage Expose-R wurde am 26. November 2008 mit Progress 31P zur ISS gebracht und dort mit einem Außenbordeinsatz am 10. März 2009 auf der URM-D Plattform an der Außenseite des russischen ISS-Moduls erfolgreich installiert. Damit begannen die Experimente, die bis zum Januar 2011 liefen. Am 21. Januar 2011 wurde die gesamte Expose-R Einheit in die ISS geholt, die Probeneinsätze – die sogenannten Trays – ausgebaut und dann mit dem Shuttle STS-133 am 9. März 2011 wieder zur Erde zurückgebracht. Die Proben und Dosimeter wurden ebenfalls herausgenommen und zur Untersuchung an die Experimentatoren zurückgegeben.

Ergebnisse:

Bei der Auswertung ergab sich für die Sporen von *Bacillus subtilis*, die vor der extraterrestrischen Strahlung geschützt waren, eine Überlebensrate von circa 50 Prozent. Die Sporen, die jedoch der UV-Strahlung ausgesetzt waren, zeigten als Einzelschicht kein und in mehreren Schichten ein nur sehr geringes Überleben. Bei den Pilzsporen überstanden circa 30 Prozent der Dunkelproben die Zeit im Weltraum. Generell hatten die Mikroorganismen, die mit Meteoritenmaterial überdeckt waren, ein um ein bis zwei Größenordnungen höheres Überlebenspotenzial als solche, die den Weltraumbedingungen ungeschützt ausgesetzt waren.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

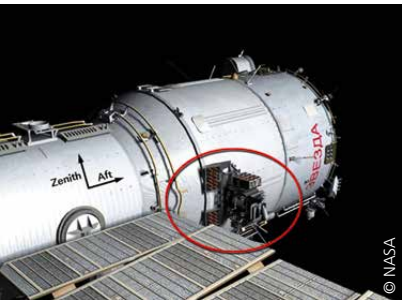
Nach fast zwei Jahren im Weltraum wurde die Überlebensfähigkeit und Schädigung der unterschiedlichen Sporen mit Hilfe spezieller biologischer und biochemischer Tests untersucht. Die Ergebnisse tragen zum grundsätzlichen Verständnis der Chancen und Grenzen eines interplanetaren Transfers von Sporen, zum Beispiel eingebettet in Meteoritenmaterial, bei. Generell stehen die Fragen nach Ursprung, der Evolution und der Verteilung von Leben im Universum im Mittelpunkt dieser Forschung.



In der Expose-R-Anlage werden Organismen den harten Bedingungen des Weltraums ausgesetzt.



Expose-R im russischen Modul der ISS



Die Anlage Expose-R blieb von November 2008 bis März 2011 in der URM-D-Plattform des russischen Swesda-Moduls.

Start 26. November 2008 / Progress 31P	
ISS-Zeitraum	November 2008 bis März 2011
Unterbringung	URM-D am Swesda-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Gerda Horneck; Prof. Dr. Donat-Peter Häder
Einrichtung	DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln; Universität Erlangen
Bereich	Astrobiologie
Partner	ESA; IBMP Moskau; nationale und internationale Forschungsinstitute



BIOMEX: Das Biologische Marsexperiment

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Ist der Mars ein bewohnbarer Ort für Mikroorganismen? Könnten wir Leben auf dem Roten Planeten mit Hilfe bestimmter Technik in Mars-ähnlicher Umwelt nachweisen? Wie stabil sind biologische Moleküle unter Mars- und Weltraumbedingungen? Können Organismen Weltraumbedingungen auch überleben und wäre damit ein Transport von Leben zwischen Planeten wie der Erde und dem Mars möglich (Panspermie-Hypothese)? Alle diese Fragen spielen beim Projekt BIOMEX (Biologie und Mars Experiment) eine wichtige Rolle und sind Kernfragen der astrobiologischen Forschung ganz allgemein. BIOMEX ist eines der insgesamt vier wissenschaftlichen Experimente BIOMEX, BOSS, PSS und IBMP, die im Rahmen des Projektes Expose-R2 an der Außenhülle des russischen Swesda-Moduls auf der Internationalen Raumstation ISS durchgeführt werden.

Bei BIOMEX gibt es zwölf verschiedene Experiment-Pakete, welche von 25 nationalen und internationalen Instituten bearbeitet und vom DLR-Institut für Planetenforschung koordiniert werden. Organismen wie Bakterien, Urbakterien (Archaeen), Algen, Pilze, Flechten und Moose werden dabei den Weltraumbedingungen ausgesetzt, wobei ein Teil der Proben in mineralische Böden eingebettet wird, wie sie auf dem Mars zu finden sind. Das Hauptaugenmerk liegt auf die Stabilität der Zellstrukturen, der Proteine und der DNA als auch auf möglichen Veränderungen bestimmter Pigmente. Die Überlebensfähigkeit der Organismen steht im Fokus der Untersuchungen. Die Ergebnisse sollen Aufschluss darüber geben, ob biologisches Material oder Bestandteile der Mikroorganismen stabil genug sind, um die weltraumähnlichen Umweltbedingungen auf anderen Planeten wie dem Mars langfristig zu überbestehen und somit auch durch ausgewählte Instrumente immer noch erkennbar sind. Die BIOMEX-Resultate fließen in eine Datenbank ein, die als Grundlage für die Suche nach Leben in unserem Sonnensystem dienen soll. Zukünftige Missionen, wie die von der ESA geplante ExoMars-Mission, würden maßgeblich von diesen Daten profitieren.

Experimentbeschreibung:

Die verschiedenen Organismen und biologischen Bestandteile wie Zellmembranen und Pigmente werden auf der Erde vor dem Start entweder isoliert oder in simulierten Mond- beziehungsweise Marsböden in Einzelschicht oder in mehreren Lagen übereinander eingebettet. Diese Probenkammern werden dann in die Anlage Expose-R2 eingesetzt. Verschiedene Filter verändern die Stärke und den Wellenlängenbereich der Strahlung, die auf das biologische Material einwirken, um Sonneneinstrahlung wie auf dem Mars oder im Weltraum zu erzeugen. Die Proben werden sowohl in Vakuum als auch in Argongas-Atmosphäre bei Normaldruck in die Probenbehälter gefüllt. Manche Probenkammern werden der UV-Strahlung ausgesetzt andere in der Dunkellage von ihr abgeschottet.

Status:

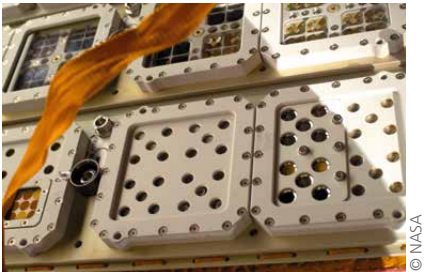
BIOMEX beginnt im Sommer 2014 und ist Teil des Experimentpakets Expose-R2. Die Proben werden im Juli 2014 mit Progress zur ISS transportiert und anschließend bei einem für August/September geplanten Außenboreinsatz (Extravehicular Activity EVA) in die Expose-Anlage auf der URM-D-Plattform an der Außenseite des russischen Swesda-Moduls eingebaut. Dort werden sie dann den Weltraumbedingungen ausgesetzt und nach circa 18 Monaten wieder zur Erde zurückgebracht.

Ergebnisse:

BIOMEX-Ergebnisse liegen noch nicht vor. Resultate aus Vorläuferexperimenten in den Simulationskammern des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin als auch des DLR-Instituts für Planetenforschung lassen jedoch erwarten, dass alle ausgewählten Organismengruppen einschließlich der Moose nach ihrem Weltraumaufenthalt zu einem gewissen Grad lebensfähig sind und eventuell auch wachsen können. Zudem scheinen die sogenannten Bio-Signaturen – biologische Fingerabdrücke wie die Gase Sauerstoff, Ozon, Wasser, Kohlenstoffmonoxid und Methan, welche die Organismen hinterlassen und die auf biologische Aktivität zum Beispiel auf fremden Planeten hinweisen könnten – charakteristische Muster aufzuweisen. Sie können als Bezugspunkt auch unter Weltraum- und Marsbedingungen erhalten, um auf anderen Planeten wie dem Mars erkennbar beziehungsweise nachweisbar zu sein.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Die Ergebnisse helfen uns dabei, mögliches Leben auf dem Mars besser zu erkennen und einen interplanetaren Transfer von Organismen – möglicherweise eingebettet in Marsmineral – besser zu verstehen. Generell stehen die Fragen nach dem Ursprung, der Evolution und der Verteilung von Leben im Universum im Mittelpunkt dieser Forschung. Einige BIOMEX-Untersuchungsmethoden sind für andere wissenschaftliche Disziplinen wie die Archäologie und die Medizin interessant. So konnten bisherige Analysemethoden, die den Wassergehalt von Mikroorganismen und verwendete Marsminerale bestimmen, Wissenschaftlern der TH Wildau bei Datierungsmethoden von archäologischen Funden wie alten Holzköchern und Bögen helfen. Auch die Ernährungsforschung kann von den BIOMEX-Ergebnissen profitieren: Die Veränderung der Bakterienzusammensetzung vor und nach Weltraumsimulationsexperimenten mit einem genormten probiotischen Biofilm, wie er in Joghurts und Drinks zu finden ist, lässt auch Rückschlüsse auf mögliche Einflüsse auf das Immunsystem der Astronauten bei Einnahme solcher Drinks zu.



BIOMEX wird in der Expose-R2-Anlage an der Außenseite des russischen Swesda-Moduls angebracht.

Start

24. Juli 2014 / Progress 56P (geplant)

ISS-Zeitraum	ab Sommer 2014
Unterbringung	URM-D am Swesda-Modul
Experimentator	Dr. Jean-Pierre de Vera
Einrichtung	DLR-Institut für Planetenforschung, Adlershof
Bereich	Astrobiologie
Partner	ESA; Roskosmos; nationale und internationale Forschungsinstitute



Expose-R2-Einheit am Boden bei wissenschaftlichen Tests



BOSS: Biofilme als Überlebenskünstler

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Biofilme gehören zu den ältesten sichtbaren Anzeichen von Leben auf der Erde und könnten vielleicht auch als die ersten Formen von Leben auf anderen Planeten und Monden unseres Sonnensystems entdeckt werden. Ein Biofilm ist eine strukturierte Gemeinschaft von Mikroorganismen auf einer Oberfläche, die in einer selbst entwickelten Matrix aus sogenannten extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) eingekapselt leben. Diese EPS-Matrix hält die Mikroorganismen in ihrer dreidimensionalen Anordnung zusammen und lässt den Biofilm auf Oberflächen anhaften. Die Eigenschaften der in einem Biofilm lebenden Mikroorganismen unterscheiden sich in der Regel grundlegend von individuell lebenden Mikroorganismen derselben Art. Die dichte Umgebung des Films erlaubt es ihnen, untereinander zu kooperieren, in vielfältiger Weise zu interagieren und schützt diese winzigen Lebewesen vor äußeren Einflüssen. So sind die Biofilm-Bewohner gegenüber verschiedenen chemischen und physikalischen Einwirkungen sehr resistent.

Experimentbeschreibung:

In dem Weltraumexperiment Biofilm Organisms Surfing Space (BOSS) der ESA-Experimentiereinheit Expose-R2 will das vom DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin koordinierte internationale Wissenschaftlerteam auf der ISS sowie in den Planeten- und Weltraumsimulationsanlagen des DLR die Hypothese testen, ob als Biofilm organisierte Mikroorganismen besser und länger als einzelne Vertreter unter den rauen Umgebungsbedingungen, wie sie im Weltraum und auf dem Mars vorkommen, überleben. Biofilme könnten aber noch einen weiteren Vorteil haben: Staubpartikel, so vermuten die Wissenschaftler, bilden ein Schutzschild im Biofilm, das die Organismen gegenüber der extraterrestrischen ultravioletten (UV)-Strahlung abschirmt. Die Forscher untersuchen in dem BOSS-Experiment Austrocknung, extraterrestrische UV-Strahlung, simulierte Marsatmosphäre und ein Mars-ähnliches UV-Klima. Verschiedene Biofilme und einzeln kultivierte (planktonische) Zellen von *Deinococcus geothermalis*, *Halomonas muralis* und *Halococcus morrhuae*, *Bacillus horneckiae*, *Chroococcidiopsis* CCMEE 029, *Streptomyces* und *Polaromonas*-Stämme aus vulkanischen Gesteinen waren an den missionsvorbereitenden Testläufen beteiligt. In den bereits durchgeführten Experiment Verification Test (EVT) und Science Verification Test (SVT) wurden diese Parameter sowohl einzeln als auch in Kombination in den Bodensimulationsanlagen getestet. Dabei können in den Bodenanlagen immer nur einige Aspekte der realen Weltraumbedingungen nachgestellt werden.

Status:

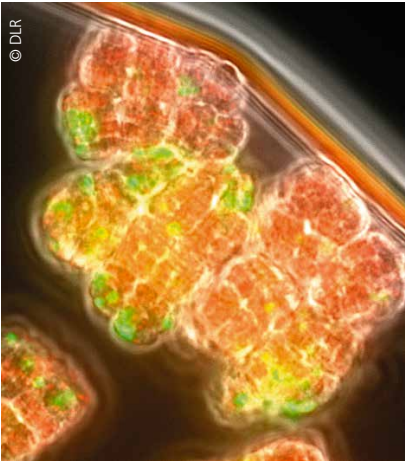
Starttermin für das Weltraumexperiment BOSS als Teil des Experimentpakets Expose-R2 ist im Juli 2014. Die unterschiedlichen biologischen Proben werden mit dem Progress-Raumtransporter M-24M (Mission 56P) zur ISS transportiert und anschließend bei einem Außenbordeinsatz auf der URM-D-Plattform an der Außenseite des russischen Moduls installiert. Nach circa 18 Monaten Aufenthalt im Weltraum sollen die Proben zur Analyse wieder zur Erde zurückgebracht werden.

Ergebnisse:

Ergebnisse liegen noch nicht vor. Die Resultate aus den Vorversuchen (EVT und SVT) lassen jedoch bei Organismen, die in einem Biofilm eingebettet sind, bessere Überlebensmöglichkeiten und eine höhere Vitalität erwarten.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Nach 15 bis 18 Monaten im Weltraum werden spezielle biologische und biochemische Tests zeigen, wie gut die Mikroorganismen die rauen Weltraumbedingungen überlebt haben und welche Schäden sie davontragen werden. Wie schützt der Biofilm die Lebewesen? Erhöht er ihre Überlebenschancen? Welche Grenze hat die Überlebensfähigkeit? Die Ergebnisse sollen helfen, diese grundsätzlichen Fragen zu beantworten. Generell stehen der Ursprung, die Evolution und die Ausbreitung von Leben im Universum im Mittelpunkt dieser Forschung.



Halococcus morrhuae Zellcluster aus den EVT-Vorversuchen

Start 24. Juli 2014 / Progress 56P (geplant)	
ISS-Zeitraum	ab Sommer 2014
Unterbringung	URM-D am Swesda-Modul
Experimentator	Dr. Petra Rettberg
Einrichtung	DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln
Bereich	Astrobiologie
Partner	ESA; Roskosmos; nationale und internationale Forschungsinstitute

AgXX: Neuer Kontaktkatalysator rückt Biofilmen zu Leibe

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Biofilme aus Bakterien, Hefen und Pilzen sind für Crews und Hardware im Weltall eine große Gefahr. Zum einen können sie die Gesundheit der Astronauten beeinträchtigen, zum anderen durch ihre korrodierende Wirkung auf verschiedenste Materialien die Hardware beschädigen. Auf der Erde verursachen sie Probleme in allen Bereichen, die mit Wasserqualität, wässrigen Lösungen und Hygiene in Zusammenhang stehen (zum Beispiel in Krankenhäusern, Altersheimen, Kindergärten, in der Lebensmitteltechnologie, in der Produktion, in der Klimatechnik und auch im Haushalt). Eine Vielzahl verschiedener Mikroorganismen konnte in der Vergangenheit in Raumfahrzeugen und in den Raumstationen MIR und ISS nachgewiesen werden. Im Hinblick auf zukünftige exploratorische Langzeitmissionen sollte diese Belastung eingeschränkt oder am besten ganz vermieden werden.

Eine mögliche Lösung liefert uns die Geschichte: Die keimtötende Wirkung geringer Mengen von Silber war schon im Altertum bekannt. So wurden Trinkwasservorräte auf Schiffen oder in Zisternen durch die Zugabe von Silbermünzen haltbarer gemacht. Zum gleichen Zweck wurden Silbergefäße als Vorratsbehälter oder als Trinkgefäße genutzt.

Mit dem besseren Verständnis für die besondere Wirkungsweise von Silber versuchte man in der Neuzeit das Edelmetall für verschiedenste Anwendungen zu nutzen, stieß dabei jedoch auf die Grenzen der Silbertechnologie. Doch immer wenn der Mensch auf Probleme stößt, wird er kreativ und erfinderisch. So hat die Firma Largentec GmbH in den letzten Jahren mit AgXX einen völlig neuen antimikrobiellen Kontaktkatalysator entwickelt – eine speziell strukturierte und beschichtete Edelmetalloberfläche, die durch bestimmte Nachbehandlung veredelt und konditioniert wird. Die antimikrobielle Wirkung findet hauptsächlich an oder in unmittelbarer Nähe der AgXX-Oberfläche durch eine Änderung des Ladungspotenzials biologischer Membranen (Depolarisierung) statt. Im Anschluss zerfällt die Zelle durch Schädigung oder Auflösung der äußeren Zellmembran (Zellyse).

Das AgXX-Experiment soll das im Jahr 2005 begonnene russische Experiment BIORISK fortsetzen und erweitern. So wird unter Weltraumbedingungen getestet, wie wirksam der neuartige Kontaktkatalysator im Vergleich zu Silber Biofilme vermeidet oder zerstört. Nach dem ISS-Aufenthalt werden auf der Erde entsprechende Analysen durchgeführt, mit denen die auf den Versuchsplatten gewachsenen Mikroorganismen bestimmt sowie die Veränderungen der bakteriellen Genexpressionsmuster nach Kontakt mit AgXX nachgewiesen werden. Dabei soll zusätzlich auch der Wirkmechanismus von AgXX untersucht werden.

Experimentbeschreibung:

Für das Experiment wurden drei identische Platten mit verschiedenen Probenträgern bestückt (unter anderem V2A-Stahl, Polydimethylsiloxan), mit unterschiedlichen Beschichtungen (unter anderem Silber, AgXX) versehen zur ISS gebracht und dort der mikrobiellen Belastung im russischen Swesda-Modul ausgesetzt.

Status:

Die Probenplatten wurden am 23. Oktober 2012 zur ISS geschickt und im April und im Oktober 2013 für die Analyse zur Erde zurückgebracht. Dank der positiven Zwischen-

ergebnisse wurde in Fortsetzung der Kooperation ein weiterer Probenträger im Februar 2014 zur ISS transportiert, der bis Oktober 2015 den Umgebungsbedingungen auf der ISS ausgesetzt und anschließend analysiert wird.

Ergebnisse:

Die Probenplatten, die für sechs Monate beziehungsweise ein Jahr den Bedingungen auf der ISS ausgesetzt waren, sind bereits mikrobiologisch untersucht worden. Die Ergebnisse sind vielversprechend: Nach sechs Monaten auf der ISS waren die V2A-Stahl Probenträger mit AgXX-Beschichtung frei von mikrobieller Kontamination, wohingegen die V2A-Stahl Probenträger mit Silberbeschichtung und alle untersuchten Probenträger auf Polydimethylsiloxan-Basis wesentlich stärker mikrobiell bewachsen waren. Nach zwölf Monaten auf der ISS waren nur ein Drittel der V2A-Stahl Probenträger mit AgXX-Beschichtung schwach mikrobiell belastet. Bei den anderen Probenträgern waren es hingegen 50 bis 100 Prozent. Die Mikroorganismen auf den V2A-Stahl Probenträgern mit AgXX-Beschichtung waren – im Gegensatz zu den von den anderen Probenträgern isolierten Mikroorganismen – nicht in der Lage, sich weiter zu vermehren. Sie waren somit weder für die Astronauten noch für die Materialien auf der ISS gefährlich. Die Untersuchungen zur Stressantwort von Bakterien auf den Kontakt mit AgXX haben an der Universität Freiburg bereits begonnen.

Perspektiven für Forschung und Anwendung:

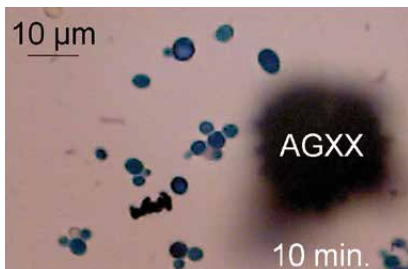
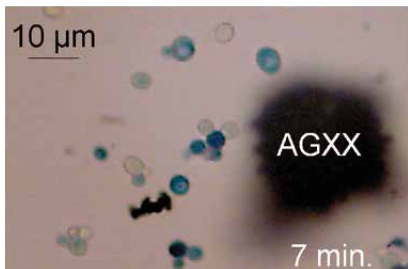
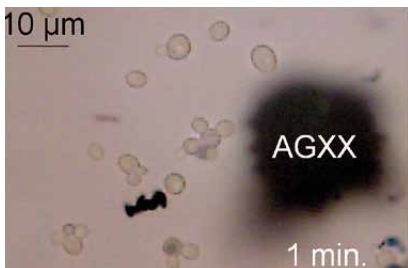
Die Ergebnisse sollten neue Möglichkeiten bieten, das Biofilmwachstum zu reduzieren beziehungsweise ganz zu verhindern. Gelingt es, den AgXX-Mechanismus zu verstehen, dann kann die Wirkung dieses Kontaktkatalysators gegebenenfalls angepasst und weiter verbessert werden. Wenn AgXX unter Weltraumbedingungen funktioniert, ergeben sich weite Einsatzmöglichkeiten in der Raumfahrt und auf der Erde. Von weiteren geplanten Genexpressionsanalysen erwarten die Wissenschaftler neue Erkenntnisse zur Stressantwort von Bakterien, die zu fortschrittlichen Strategien zur Verhinderung des Biofilmwachstums führen sollen.

Die vorläufigen, sehr positiven Ergebnisse auf der ISS bescheren der Largentec GmbH einen wichtigen Marketing-Effekt, der die Aufmerksamkeit noch einmal verstärkt auf die besonderen Entkeimungs- beziehungsweise Sterilisationsmöglichkeiten durch AgXX lenken wird. Die wissenschaftliche Begleitung der Tests auf der ISS hilft dabei, die AgXX-Wirkung besser zu verstehen. So können neue Anwendungsfelder wie zum Beispiel in der Medizintechnik leichter erschlossen werden. Die hohen Eintrittsbarrieren in Wissenschaft, Technik und Medizin, die erst einmal für jede neue Technologie bestehen, lassen sich mit den Versuchsreihen auf der ISS in jedem Fall weiter reduzieren.

Start 23. Oktober 2012 / Sojus TMA-06M	
ISS-Zeitraum	seit Oktober 2012
Unterbringung	Swesda-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Elisabeth Grohmann; Prof. Dr. Uwe Landau; Prof. Dr. Natalia Novikova
Einrichtung	Universität Freiburg; Largentec GmbH; IBMP Moskau
Bereich	Mikrobiologie
Partner	IBMP Moskau



Die mikrobielle Verunreinigung durch Pilze, Keime und Sporen sind für die Gesundheit der Astronauten und für die Hardware eine große Gefahr.



Zeitlicher Verlauf der Abtötung von Hefezellen durch AgXX (Auflösung: 1 µm): Die Blaufärbung tritt erst ein bis zehn Minuten nach dem Zelltod auf. Da nach 15 Minuten alle Zellen blau gefärbt sind, waren nach circa fünf Minuten alle Hefezellen im Umkreis des AgXX-Partikels vollständig abgetötet.

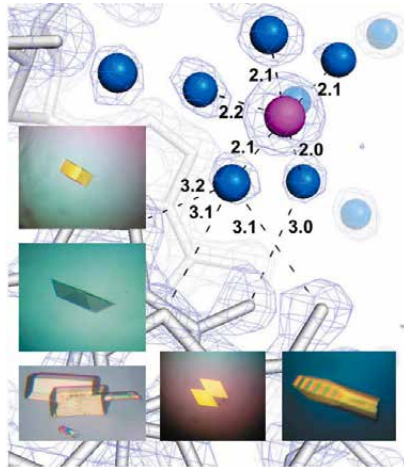


Molekül-Kristallisation – Nobelpreisverdächtige Forschung im Weltraum

Am 7. Oktober 2009 vergab das Nobelpreis-Komitee den Nobelpreis für Chemie an die Israelin Ada Yonath sowie zwei amerikanische Kollegen für ihre bahnbrechenden Arbeiten zur Struktur und Funktion von Ribosomen. Yonath, die von 1979 bis 2004 in Deutschland gearbeitet und dabei zuletzt eine Forschungsgruppe des Max-Planck-Instituts am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg geleitet hat, war zwischen 1988 und 1995 an zwölf Weltraummissionen beteiligt und nutzte die Schwerelosigkeit zur Verbesserung der Kristallisation von Ribosomen. Kooperationspartner vom DESY und von der FU Berlin haben – zusammen mit anderen Wissenschaftlern – diese Thematik weiter entwickelt und in den letzten Jahren die ISS für ihre Experimente genutzt.

Grundlage für die Analyse von Kristallstrukturen ist die möglichst perfekte Kristallisation der zu untersuchenden Substanzen. Genaue Kenntnis der Struktur ist Voraussetzung, ihre Eigenschaften und Funktionen zu verstehen, um beispielsweise pharmazeutische Anwendungen eines bestimmten Proteins zu verbessern. Aufgrund des Fehlens von Ablagerungen (Sedimentation) und des gravitationsbedingten Flüssigkeitstransports (Konvektion) führen Kristallisationsexperimente in Schwerelosigkeit oft zu regelmäßigeren Strukturen im Kristall. Fortschritte in der Strukturaufklärung gerade bei großen Molekülen werden so möglich. Diesen Vorteil wollten sich auch deutsche Wissenschaftler zunutze machen und haben bislang insgesamt dreizehn deutsche Projekte zur Proteinkristallisation auf der ISS durchgeführt.

Drei besonders erfolgreiche Beispiele sind nachfolgend beschrieben. So gelang für bestimmte Oberflächenstrukturen von Urbakterien (Archaea), die eine enorme Widerstandsfähigkeit gegen extreme Bedingungen besitzen, in Schwerelosigkeit zum ersten Mal überhaupt eine Kristallisation. Für Mistellektine, eingesetzt zur Stärkung des Immunsystems und bei der alternativen Krebstherapie, sowie für bestimmte Ribonukleinsäuren, die ebenfalls von pharmakologischem Interesse sind, erzielten die Wissenschaftler entscheidende Fortschritte in der Strukturaufklärung.



Kollage von ISS-Kristallen und Struktur der Nucleinsäuren

Kristallisation biologischer Makromoleküle: Verbesserte Strukturaufklärung von Proteinen und Nukleinsäuren

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Ziel der verschiedenen Experimente auf der ISS war es, die Schwerelosigkeit zur Verbesserung der Kristallisation von organischen Makromolekülen zu nutzen. Bei der sich anschließenden Röntgenstrukturanalyse erhoffen sich die Wissenschaftler Fortschritte in der Aufklärung bestimmter Wirkungsmechanismen und Wechselwirkungen von Molekülen. Die verbesserte Kenntnis der Struktur sollte genutzt werden, um beispielsweise im Medikamentendesign neue Wege zu beschreiten.

Experimentbeschreibung:

Verschiedene Herstellungsmethoden wurden getestet. Die meisten Kristallisationsexperimente fanden in der von Airbus Defence & Space (formals EADS Astrium) in Friedrichshafen im Auftrag der ESA entwickelten und gebauten Advanced Protein Crystallization Facility (APCF) statt, einige weitere in der von einer spanischen Arbeitsgruppe entwickelten sogenannten Granada Crystallization Facility (GCF).

Status:

Die Experimente wurden im Zeitraum Mai 2001 bis Oktober 2009 – meistens über die ESA, teilweise auch in Kooperation mit amerikanischen, russischen oder japanischen Partnern – auf der ISS durchgeführt. Alle Proben wurden zur Auswertung in die Labors der Wissenschaftler transportiert und dort mittels Röntgenstrukturanalyse analysiert.

Ergebnisse sowie Perspektiven für Forschung und Anwendung:

Tatsächlich konnte man die Strukturaufklärung verschiedener Moleküle verbessern. Drei Beispiele sollen dies näher veranschaulichen.

S-Layer von Archaeobakterien:

In einigen Fällen, wie bei bestimmten Oberflächenproteinen von Urbakterien (Archaeobakterien), gelang in Schwerelosigkeit zum ersten Mal überhaupt eine Kristallisation. Diese sogenannten S-Layer Proteine waren wahrscheinlich die ersten Zellwandstrukturen,

die sich im Laufe der Evolution vor rund drei Milliarden Jahren bildeten. Aufgrund der S-Layer sind diese Urbakterien gegenüber hohen Temperaturen, extremen pH-Werten und hohen Salzkonzentrationen enorm widerstandsfähig. Nur so konnten sie sich den extremen Bedingungen, die auf der frühen Erde herrschten, anpassen. Bereits während des Space Shuttle-Fluges STS-95 im Oktober 1998 gelang es den Arbeitsgruppen von Prof. Dr. Tony Debaerdemaeker (Universität Ulm) und Prof. Dr. Helmut König (Universität Mainz) zusammen mit belgischen Kollegen zum ersten Mal, Kristalle des S-Layer-Glycoproteins – isoliert aus dem Archaeobakterium *Methanothermobacter fervidus* – zu züchten. Nach der Rückkehr zur Erde wurden diese Kristalle zur Röntgenstrukturanalyse genutzt und lieferten eine hohe Auflösung, bei der viele Einzelheiten der Struktur eindeutig erkennbar waren. Bei folgenden Versuchsserien auf der ISS zwischen Juni und Oktober 2002 konnten aus einem anderen Organismus, dem *Bacillus sphaericus*, sogar S-Layer Proteinkristalle gezüchtet werden, die eine noch bessere Strukturanalyse erlaubten. Die Wissenschaftler sind damit in der Strukturaufklärung der S-Layer ein gutes Stück vorangekommen. Hieraus erhoffen sie sich, die Überlebensstrategien dieser Organismen sowie der zugrundeliegenden molekularen Mechanismen besser zu verstehen, um so den Weg in die Anwendung zu ebnen. Tatsächlich wurden die Erkenntnisse zur Struktur der S-Layer bereits bei der Entwicklung von Ultrafiltrationsmembranen und anderen technischen Elementen der molekularen Nanotechnologie angewendet.

Mistellektin-1:

Schon seit Jahrhunderten wird die Mistel (*Viscum album*) als Heilpflanze eingesetzt. Heute weiß man, dass die Hauptkomponente in den Mistelextrakten, die zur Stärkung des Immunsystems und zur Krebstherapie verwendet werden, das sogenannte Mistellektin-1 ist. Seine Wirkungsweise ist jedoch noch weitgehend unklar. Hier sollte die Aufklärung der dreidimensionalen Struktur weiterhelfen. Bei Experimenten auf der ISS in den Jahren 2001, 2002 und 2006 gelang es Prof. Dr. Christian Betzel (Universität Hamburg), Kristalle zu züchten, die eine verbesserte Strukturanalyse ermöglichten. Erstmals konnten die chemischen Abläufe im aktiven Zentrum dieses Proteins erklärt werden. Das Ribosomblockierende Mistellektin-1 (ML-1) besteht aus den beiden verschiedenen Eiweißketten A und B. Die Wissenschaftler gehen heute davon aus, dass die Untereinheit B bestimmte Zuckermoleküle in der Membran der anzugreifenden Zelle erkennt und der Untereinheit A das Eindringen in die Zelle ermöglicht. Diese hemmt dann die Ribosomen der Zelle und führt dadurch zum Zelltod beispielsweise von Krebszellen. Die ISS-Experimente wiesen zudem eindeutig darauf hin, dass sich bestimmte Zuckerketten aus Galactose und Lactose an den hochmolekularen Proteinkomplex binden. Sie lieferten damit gleichzeitig die Erklärung, weshalb sich unter normalen Laborbedingungen nur mäßig gute Kristalle züchten lassen, die eine genaue Struktur-Funktions-Analyse einschränken. Mit den Weltraumexperimenten und den begleitenden Untersuchungen wurden nun die Grundlagen gelegt, um die pharmazeutischen Anwendungen dieses Proteins zu verbessern.

Die meisten Kristallisationsexperimente fanden in der Advanced Protein Crystallization Facility (APCF) im Express Rack der ISS statt.

Ribonukleinsäuren (RNAs):

Ribonukleinsäuren – kurz RNA – sind das Bindeglied zwischen der genetischen Information der DNA und den danach gebildeten Proteinen. Die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Volker Erdmann (FU Berlin) befasst sich seit vielen Jahren mit der Kristallisation und Strukturaufklärung von RNA und deren Proteinkomplexen. Ausgangspunkt seiner Studien bildet die ribosomale RNA, ein wichtiger Bestandteil dieser Makromoleküle, an denen die Proteinsynthese stattfindet. Die Kristalle vom Space Shuttle-Flug STS-95 sowie aus den viermonatigen Experimenten auf der ISS im Jahr 2001 erlaubten eine detaillierte Strukturanalyse der 5S rRNA Domäne B. Erstmals wurde gezeigt, wie Lichtwellen vom 5s RNA/ L18-Proteinkomplex abgelenkt wurden und es wurde ein Bild dieser Beugung erstellt. In weiteren Versuchen auf der ISS in den Jahren 2002 sowie 2008 und 2009 wurden in Zusammenarbeit mit der Pharmafirma NOXXON AG zum ersten Mal spiegelbildliche RNA-Moleküle kristallisiert. Der Vorteil spiegelbildlicher Nukleinsäuren gegenüber „natürlichen“ RNA-Molekülen liegt in ihrer großen Beständigkeit im menschlichen Blut. Dadurch erscheinen sie besonders geeignet, Tumoren oder Virus-Erkrankungen wie AIDS wirksam zu bekämpfen. Darüber hinaus lassen sie sich aufgrund ihrer hohen Stabilität auch chemisch in großer Menge und hoher Reinheit synthetisieren. Um die Funktion dieser Moleküle zu verstehen, müssen deren Strukturen bekannt sein. Die ISS-Experimente lieferten gut geordnete Kristalle, die eine detaillierte Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Nukleinsäuren und Wasser erlaubten. Die exakte Anordnung der Wassermoleküle innerhalb der RNA-Helix und in deren Umgebung ist für den Erhalt der räumlichen RNA-Struktur wichtig. Das aus diesen Experimenten gewonnene Modell der 5S rRNA hilft uns dabei, das Zusammenspiel von Antibiotika mit ribosomalen RNAs besser zu verstehen und unterstützt so die Entwicklung effektiverer Wirkstoffe. Letztendlich erwarten die Wissenschaftler anhand dieser Experimente und der RNA-Strukturanalyse, mehr über die Funktion der Ribosomen zu erfahren, um die molekulare Medizin zu revolutionieren. Damit schließt sich gewissermaßen der Kreis, hat doch Prof. Dr. Volker Erdmann vor mehr als 20 Jahren gemeinsam mit Prof. Dr. Ada Yonath und Prof. Dr. Heinz-Günter Wittmann die Grundlagen für die Erforschung der Ribosomen-Struktur gelegt.

ISS-Zeitraum	Mai 2001 bis Oktober 2009
Unterbringung	russischer Teil der ISS und EXPRESS-Rack1 im Destiny-Modul
Experimentator	Prof. Dr. Baumstark; Prof. Dr. Christian Betzel; Prof. Dr. Tony Debaerdemaeker; Prof. Dr. Volker Erdmann; Prof. Dr. Helmut König; Prof. Dr. Wagner; Prof. Dr. Sevil Weinkauff
Einrichtung	Universitäten Freiburg; Hamburg; Ulm; FU Berlin; Mainz; Gießen; TU München
Bereich	Biotechnologie, Proteinkristallisation
Partner	ESA; JAXA; Roskosmos



Kosmonaut Vladimir Dezhurov ist mit der Granada Crystallization Facility (GCF) den Geheimnissen kristalliner Makromoleküle auf der Spur.



Bildung – Vom Weltraum lernen, für Wissenschaft begeistern

Nachwuchsarbeit ist sehr wichtig. Nur wenn Wissenschaft im All gerade die jungen Bewohner unseres Planeten begeistert, hat die Weltraumforschung eine Zukunft. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) engagiert sich darum besonders intensiv und in vielfältiger Weise für die Nachwuchsförderung. Das beginnt mit unseren Schülerlaboren, den DLR_School_Labs, die inzwischen mehr als 100.000 Kinder und Jugendliche mit der „Faszination Forschung“ bekannt gemacht haben, sowie die Vergabe von Schülerpraktika und vielen anderen Schulaktionen, reicht über Angebote für Studierende bis zu einem hochwertigen Qualifizierungsprogramm für unsere promovierenden Mitarbeiter. Ein ganz besonderes i-Tüpfelchen in der Bildungsarbeit ist, die „Wissenschaftler von Morgen“ schon heute auf der Internationalen Raumstation ISS forschen zu lassen. Deutsche Astronauten wie Thomas Reiter während seiner Astrolab- oder Alexander Gerst während seiner Blue Dot-Mission forschen gerne auf der Raumstation an Projekten, die „gemeinsam“ mit jungen, kreativen Köpfen auf der Erde erarbeitet wurden. Sie machen so Schülerträume wahr und geben gleichzeitig der Weltraumforschung eine Zukunft.



Beschützer der Erde: Bundesweiter Schülerwettbewerb zum Schutz unserer Erde

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Damit unsere Erde eine Zukunft hat, braucht es vor allem junge, engagierte Menschen, die sich bewusst sind, wie verletzlich und einzigartig unser Planet ist. Deswegen gilt das Missionsmotto „shaping the future – Zukunft gestalten“ der Blue Dot-Mission des deutschen ESA-Astronauten Alexander Gerst besonders für die Bildungsarbeit. Er wird sich darum während seiner Mission auf der Raumstation auch um die jungen Bewohner unseres Planeten kümmern und ihr Bewusstsein für die Probleme unserer Erde schärfen. Hierfür wird er zahlreiche Bildungsaufgaben übernehmen. Ganz im Sinne der Blue Dot-Idee haben viele dieser Aufgaben mit unserer Erde zu tun – zeigen wie schön und einzigartig, aber auch wie zerbrechlich und schutzbedürftig sie ist. Alexander Gerst hat von der Raumstation einen ganz besonderen Blick auf unseren Heimatplaneten. Diese Perspektive möchte er gerne an Schüler weitergeben.

Experimentbeschreibung:

Wie können wir unsere Erde effektiv und nachhaltig schützen? Kreative Ideen sind erforderlich, um diese Frage zu beantworten und so den bundesweiten Wettbewerb „Beschützer der Erde“ zu gewinnen, den das DLR Raumfahrtmanagement im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie ins Leben gerufen hat. Grundschülerinnen und -schüler sollen so schon früh ein Bewusstsein für Klima- und Umweltthemen entwickeln, Handlungsmöglichkeiten zum alltäglichen Umweltschutz lernen und ermuntert werden, selbst einen Beitrag zur Bewahrung unserer Erde zu leisten. Dabei sollen die Unterrichtsfächer Sach- beziehungsweise Heimatkunde, Erdkunde und/oder Biologie einbezogen werden. Gesucht werden kreative Ideen zur Bewahrung der Erde. Die Kinder sollen selbstständig Informationen recherchieren, Probleme verstehen, erklären und Lösungsvorschläge entwickeln. Während seiner Mission wird Alexander Gerst die teilnehmenden Klassen von der ISS mit Videobotschaften bei ihrer kreativen Ideensuche begleiten. In diesen Videos wird er den Schülern fünf Themengebiete zur Bewahrung unserer Erde näherbringen: Ozeane, Land, Flüsse/Seen, Berge und Wälder. An dem Ideenwettbewerb können – im Klassenverband, über die Schule organisiert – Mädchen und Jungen teilnehmen, die im Schuljahr 2014/2015 die vierte Klasse besuchen.

Gewaltiger Ausbruch: Der Sarychew-Vulkan in der russischen Kuril-Inselkette (nordöstlich von Japan) wurde von der Raumstation aus in einer frühen Phase des Ausbruchs am 12. Juni 2009 fotografiert. Da sich der Vulkan in der Nähe von internationalen Flugrouten zwischen Ostasien und Nordamerika befindet, wurde der Flugverkehr teilweise behindert. Sarychew ist einer der aktivsten Vulkane in der Kuril-Inselkette.

Status:

Schüler können Ihre Bewerbungen bei Alexander Gerst einreichen. Umsetzung und Ergebnisse der Projekte sollen von den Schülerinnen und Schülern dokumentiert werden. So können zum Beispiel Projektmappen mit Texten, Bildern und Fotos gestaltet, Filme gedreht, eine Präsentation erstellt oder ein Audiobeitrag aufgenommen werden. Die Projektarbeiten starten bundesweit am 15. Oktober 2014. Wettbewerbsbeiträge können bis zum 15. Dezember direkt an Alexander Gerst gesendet werden. Eine unabhängige Jury mit Experten aus Bildung, Wissenschaft und Politik bewertet die eingereichten Beiträge nach folgenden Kriterien: Qualität der Inhalte, Selbstständigkeit der Schülerinnen und Schüler, Kreativität und Innovation, Qualität der Darstellung sowie Sichtbarkeit und Wahrnehmung des Projektes in der Öffentlichkeit. Die jeweils Erstplatzierten aller fünf Themengebiete werden den Astronauten im Frühjahr 2015 in Berlin treffen.

Ergebnisse:

Offen.

Perspektiven:

Durch das Experiment Beschützer der Erde soll Schülerinnen und Schülern bewusst gemacht werden, wie wertvoll aber auch wie zerbrechlich unsere Erde ist. Je mehr junge Menschen sich dieser Tatsache bewusst werden, desto besser wird es in der Zukunft gelingen, die Erde zu schützen. Denn sie ist der einzige Ort in unserem Sonnensystem, auf dem wir leben können. Unsere gesamte Geschichte, angefangen von Einzellern und Dinosauriern bis hin zu den Menschen, hat sich auf diesem einen, winzigen blauen Punkt im unendlichen Universum abgespielt. Unsere Ressourcen wie Öl, Energie, Wasser und Luft sind begrenzt. Wir leben aber so, als wäre alles in unendlichen Mengen vorhanden. Wenn Alexander Gerst unseren Planeten verlässt, so sieht er die Erde von der Raumstation aus mit anderen Augen. Er sieht, dass wir nur ganz begrenzte Ressourcen haben. Wenn wir diesen schätzenswerten Ort verlieren, endet unsere Geschichte. Diesen Perspektivenwechsel möchte Alexander Gerst auch den Jungen und Mädchen ermöglichen und sie auf diesem Weg für den Schutz der Umwelt im Alltag sensibilisieren.

ISS-Zeitraum	ab Sommer 2014 beginnend mit der Blue Dot-Mission
Unterbringung	Cupula-Modul
Experimentator	Dr. Franziska Zeitler; Dipl.-Ing. Claudia Philot; Frauke Lindert; Claudia Yvonne Nini; Hans Knaust
Einrichtung	DLR Raumfahrtmanagement
Bereich	Bildung
Partner	ESA

Smog über China: Peking im Nordosten des Landes liegt unter einer dichten Dunstglocke, die sogar Astronauten der ISS beobachtet und fotografieren haben. Schuld am dichten Smog sind Industrie-Anlagen und der Autoverkehr der Metropole. Peking muss immer wieder den Luftnotstand ausrufen. Ein Hauptgrund: Die Zahl der Autos in Peking hat sich laut der staatlichen Nachrichtenagentur Xinhua in den vergangenen Jahren von 3,13 Millionen (Anfang 2008) auf aktuell 5,18 Millionen fast verdoppelt. Laut Berechnungen des Umweltbundesamtes gehen 40 Prozent der gesamten NO₂-Emissionen auf das Konto des Straßenverkehrs.



Die US-amerikanische Astronautin Karen Nyberg zeigt uns, wie bedroht die Erde sein kann. Anfang August 2013 fotografierte sie von der Raumstation aus die Feuer, die die australische Provinz rund um Darwin und die Insel Melville (rechts unten) Monate lang bedrohten. Der deutsche Astronaut Alexander Gerst wird während seiner Mission für die Projekte Earth Guardian und Columbus Eye die Erde filmen und solche Naturphänomene für alle Welt dokumentieren.

Eis auf dem Rückzug: Der südliche Patagonische Eisschild ist riesig. Es umfasst eine Fläche von 13.000 Quadratkilometern und ist damit das größte Eisfeld in der südlichen Hemisphäre. Doch auch dieses Eisfeld ist auf dem Rückzug. Von 1968 bis 1975 wurde der Gletscher ausführlich beobachtet. Während dieser Zeit hat der Schild durchschnittlich 13,5 Kubikkilometer Eis pro Jahr eingebüßt. Vergleicht man diese Daten mit denen aus der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) von 1995 bis 2000 dann verliert dieses Gebiet jährlich sogar 38,7 Kubikkilometer Eis pro Jahr. Astronauten haben im Februar 2014 von der ISS aus den Gletscher aufgenommen.



Columbus Eye: Spektakuläres Unterrichtsmaterial aus dem Weltraum

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Damit unsere Erde eine Zukunft hat, braucht es vor allem junge, engagierte Menschen, die sich bewusst sind, wie verletzlich und einzigartig unser Planet ist. Deswegen gilt das Missionsmotto „shaping the future – Zukunft gestalten“ der Blue Dot-Mission des deutschen ESA-Astronauten Alexander Gerst besonders für die Bildungsarbeit. Er wird sich darum während seiner Mission auf der Raumstation auch um die jungen Bewohner unseres Planeten kümmern und ihr Bewusstsein für die Probleme unserer Erde schärfen. Hierfür wird er zahlreiche Bildungsaufgaben übernehmen. Ganz im Sinne der Blue Dot-Idee haben viele dieser Aufgaben mit unserer Erde zu tun – zeigen wie schön und einzigartig, aber auch wie zerbrechlich und schutzbedürftig sie ist. Alexander Gerst hat von der Raumstation einen ganz besonderen Blick auf unseren Heimatplaneten. Diese Perspektive möchte er gerne an Schüler weitergeben.

Experimentbeschreibung:

Für das Schülerexperiment Columbus Eye nehmen vier HD-Videokameras atemberaubende Filmsequenzen von der Erde auf, die ein Team des Geographischen Instituts der Universität Bonn auf der Homepage (www.columbuseye.uni-bonn.de) jedermann zur Verfügung stellt. Doch Columbus Eye bietet nicht nur schöne Aussichten. Ebenfalls auf dieser Seite findet man Informationen zum deutschen Engagement auf der ISS und zum Thema Erdbeobachtung. Kernstück von Columbus Eye ist jedoch das Unterrichtsmaterial zu Fächern wie Physik und Geographie. Es erklärt Lehrern, wie sie die spektakulären Aufnahmen verwenden können, um Ihren Schülern ein umfassenderes Bild über das System Erde zu vermitteln. Auch dieses Material kann auf der Webseite kostenfrei abgerufen werden. Auf einer Roadshow quer durch die Bundesrepublik werden Schülern und Lehrern die Unterrichtsmaterialien genau erklärt. Columbus Eye zeigt – ganz im Sinne von „shaping the future“ – die Erde als dynamisches System und geht dabei auf aktuelle Ereignisse wie zum Beispiel Naturkatastrophen aber auch menschengemachte Phänomene wie Waldbrände, Massenrodung der Regenwälder oder Bergbauschäden ein. Astronauten haben einen Logenplatz, wenn es um die Sicht auf

unseren Heimatplaneten geht. Um deren Eindruck mit dem der Schüler zu vergleichen, können Schüler des Gymnasiums Siegburg Alleestraße live mit Alexander Gerst über seine Sicht auf unseren blauen Planeten sprechen. Er wird über ein Funkgerät auf der ISS mit ihnen Kontakt aufnehmen und ihre Fragen beantworten. Funkamateure des Deutschen Amateur Radio Clubs (DARC) und die Organisation Amateur Radio on the International Space Station (ARISS) werden sie dabei unterstützen.

Status:

Die NASA-Nutzlast High Definition Earth Viewing (HDEV) wurde im April 2014 außen am europäischen Columbus-Modul angebracht. Mit vier HD-Videokameras nimmt HDEV seitdem atemberaubende Filmsequenzen unserer Erde auf, die der Öffentlichkeit auf der Homepage www.columbuseye.uni-bonn.de zur Verfügung gestellt werden.

Ergebnisse:

Offen.

Perspektiven:

Die Videos und neuen Unterrichtsmaterialien des Schülerexperimentes Columbus Eye werden dabei helfen, Schülern bewusst zu machen, wie wertvoll aber auch wie zerbrechlich unsere Erde ist. Je mehr junge Menschen sich dieser Tatsache bewusst werden, desto besser wird es in der Zukunft gelingen, die Erde zu schützen. Denn sie ist der einzige Ort in unserem Sonnensystem, auf dem wir leben können. Unsere gesamte Geschichte, angefangen von Einzellern und Dinosauriern bis hin zu den Menschen, hat sich auf diesem einen, winzigen blauen Punkt im unendlichen Universum abgespielt. Unsere Ressourcen wie Öl, Energie, Wasser und Luft sind begrenzt. Wir leben aber so, als wäre alles in unendlichen Mengen vorhanden. Wenn Alexander Gerst unseren Planeten verlässt, so sieht er die Erde von der Raumstation aus mit anderen Augen. Er sieht, dass wir nur ganz begrenzte Ressourcen haben. Wenn wir diesen schätzenswerten Ort verlieren, endet unsere Geschichte. Diesen Perspektivenwechsel möchte Alexander Gerst auch den Jungen und Mädchen ermöglichen und sie auf diesem Weg für den Schutz der Umwelt im Alltag sensibilisieren.



Der Hurrikan Sandy bildete sich am 19. Oktober 2012 im Karibischen Meer, zog dann nordwärts über Jamaika, Kuba und die Bahamas und traf schließlich am 29. Oktober 2012 in New Jersey auf das Festland der Vereinigten Staaten. Auf seiner Bahn richtete Sandy erhebliche Schäden an. Dutzende von Personen wurden durch die Auswirkungen des Sturms getötet. Mit einem Durchmesser von fast 1.800 Kilometern gilt Sandy als das ausgedehnteste, jemals im Atlantik gemessene Sturmgebiet.

ISS-Zeitraum	ab Sommer 2014 beginnend mit der Blue Dot-Mission
Unterbringung	außen am Columbus-Modul
Experimentator	Johannes Weppeler; Prof. Dr. Gunter Menz
Einrichtung	DLR Raumfahrtmanagement; Universität Bonn
Bereich	Bildung
Partner	ESA





Seifenblasen-Experiment: Sind sie in Schwerelosigkeit „unsterblich“?

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Seifenblasen müssten in Schwerelosigkeit einige Besonderheiten aufweisen, denn auf der Erde sorgt die Schwerkraft dafür, dass das Wasser innerhalb einer Seifenblase nach unten gezogen und der Seifenfilm daher im oberen Teil schnell recht dünn wird. Deshalb platzt die Seifenblase schon nach kurzer Zeit. In Schwerelosigkeit sollte der dünne Film aus Seifenwasser dagegen viel länger stabil bleiben. Sind schwerelose Seifenblasen vielleicht sogar „unsterblich“? Und was passiert, wenn man eine Büroklammer hineinsteckt? Oder zwei zu einer einzigen vereint? Diese Fragen haben sich zwei Schülerteams gestellt, die an der „Aktion 42“, einem Schülerwettbewerb des DLR, der ESA und der Stiftung Jugend forscht teilgenommen haben.

Experimentbeschreibung:

Über 50 Schülerinnen und Schüler hatten an dem Wettbewerb teilgenommen und Vorschläge eingereicht. Dabei durften sie Gegenstände aus einer Liste von 42 Zutaten auswählen. Ganz unabhängig voneinander kamen dabei zwei Schüler-Teams des Gymnasiums am Sandberg in Wilkau-Haßlau und des Friedrich-Schiller-Gymnasiums in Marbach am Neckar auf die Idee, Seifenblasen in Schwerelosigkeit zu untersuchen. Dazu kommt noch die Idee einer Schülerin vom Pater-Rupert-Mayer-Gymnasium in Pullach, bei der es um Schallwellen geht: Kann man mit dem Kammerton A oder mit anderen Tönen die Seifenblasen und vielleicht auch schwebende Wasserkugeln in Bewegung versetzen? Diese Aufgaben der 15- bis 17-jährigen Schüler wird Alexander Gerst nun auf der ISS angehen. Das DLR wird die ausgewählten Ideen jetzt in engem Kontakt mit den Jungwissenschaftlern für die Durchführung auf der ISS vorbereiten und weltraumtauglich machen.

Status:

Die Gewinner stehen fest. Sie werden – zusammen mit vier weiteren Teams, die es auf die vorderen Plätze geschafft haben – zu einer Startveranstaltung eingeladen, um live dabei zu sein, wenn Alexander Gerst im Mai 2014 zur ISS fliegt. Und sie treffen den ESA-Astronauten nach seinem Flug zu einem persönlichen Gespräch. Darüber hinaus erhalten alle Schüler-Teams, die mitgemacht haben, vom DLR ein großes „Raumfahrt-Überraschungspaket“.

Ergebnisse:

Offen.

Perspektiven:

Mit ganz einfachen Dingen wie zum Beispiel Seifenlauge kann man spannende Forschung im Weltraum betreiben. Daraus entstehen dann zum Beispiel Unterrichtsmaterialien zur Forschung in Schwerelosigkeit. Diese und viele andere Aktivitäten werden in den nächsten Wochen und Monaten folgen. DLR und ESA wollen so gerade auch junge Leute für Naturwissenschaften und Technik begeistern.

ISS-Zeitraum	ab Sommer 2014 beginnend mit der Blue Dot-Mission
Unterbringung	Columbus-Modul
Experimentator	Dr. Volker Kratzenberg-Annies; Dr. Matthias Sperl
Einrichtung	DLR Nachwuchsförderung; ESA; Stiftung Jugend forscht
Bereich	Bildung
Partner	ESA



Wie verhalten sich Seifenblasen in Schwerelosigkeit? Und kann man sie mit Schall aus dem Lautsprecher in Bewegung versetzen? Im Training studiert der deutsche ESA-Astronaut Alexander Gerst jeden Handgriff ein – wie bei den wissenschaftlichen Experimenten auch.

OEE: Emulsionen begeistern Schüler für Naturwissenschaften

Hintergrund und wissenschaftliche Ziele:

Wie verhalten sich Emulsionen in Schwerelosigkeit? Während seiner ESA-Langzeit-mission „Astrolab“ hat der deutsche Astronaut Thomas Reiter auf der Internationalen Raumstation das Oil Emulsion Experiment in Space (OEE) durchgeführt, um diese Frage gemeinsam mit Schülern zu beantworten. Emulsionen bestehen aus zwei sich nicht ohne weiteres zu vermischenden, eigentlich ineinander unlöslichen Flüssigkeiten, bei dem die eine in Form kleiner Tröpfchen in der anderen verteilt ist. Die Flüssigkeiten mischen sich nicht freiwillig, sondern benötigen dazu ein Hilfsmittel: Erst wenn man sogenannte Tenside – also beispielsweise Spülmittel – hinzugibt, vermengen sich die beiden Flüssigkeiten sehr fein. Indem junge Menschen in den unteren Klassen der weiter-führenden Schulen das Verhalten von Emulsionen im All und auf der Erde untersuchten, sollten sie auf praktische Art für Naturwissenschaften begeistert werden. OEE sollte die „vier B“ – Beobachtung eines Vorgangs, dessen genaue und detaillierte Beschreibung, die Bildung einer Hypothese sowie deren Begründung – mit einer wichtigen Erfahrung verknüpfen: Forschung ist spannend und mit der Zukunft unserer Erde eng verknüpft.

Experimentbeschreibung:

Eine Öl-Wasser Emulsion in einem durchsichtigen und abgedichteten Behälter wurden von Thomas Reiter sowie von den Lehrern und Schülern geschüttelt bis sich Öl und Wasser entsprechend vermischten – beim ersten Mal nur vorsichtig, so dass circa zwei bis drei Zentimeter große rote Wasserglobuli im klaren Öl entstanden. Danach wurden über 24 Stunden hinweg in regelmäßigen Zeitabständen Videoaufnahmen vom Ver-halten der Flüssigkeiten gemacht. Nach Ablauf der 24 Stunden wurde das Experiment wiederholt. Diesmal schüttelte Thomas Reiter stärker, so dass sich circa einen halben bis einen Zentimeter kleine Globuli bildeten, die anschließend in vorgegebenen Zeit-abständen regelmäßig beobachtet und gefilmt wurden. Alle Filmaufnahmen wurden im Anschluss zur Erde übermittelt und durch OEE-Bilder während eines Parabelfluges ergänzt.

Bei den Experimenten auf der Erde deckten die Lehrer die Experimentbehälter nach dem Schütteln ab, um zu verhindern, dass die Schüler das Verhalten der Flüssigkeit sehen, bevor sie eigene Überlegungen angestellt hatten. Denn die Schüler sollten die Experimente auf der Erde und im All beschreiben und eine Hypothese zum möglichen Verhalten der Flüssigkeiten nach dem Schütteln an den verschiedenen Experiment-orten aufstellen. Nach einer gewissen Ruhezeit der Emulsion wurden die verschiedenen Grade an Entmischung beobachtet und durch die Lehrer entsprechend erklärt. Die unterschiedlichen Ergebnisse beim Verhalten der Emulsionen im All und auf der Erde sind die Basis für Physik-Unterrichtseinheiten zum Thema Flüssigkeiten unter Schwere-losigkeit und Fluidparametern wie zum Beispiel Dichte und Viskosität.

Status:

Das gesamte Experiment wurde einsatzfertig zur ISS geliefert und durchgeführt. Am 24. August 2006 fiel der Startschuss für das Schülerexperiment im Nutzerzentrum für Weltraumexperimente (MUSC) des DLR in Köln. Das DLR und ZDF tivi riefen alle weiter-führenden Schulen auf, an dem Weltraumexperiment teilzunehmen. Eine Unterrichts-stunde mit Thomas Reiter von der ISS wurde in einer Medienkampagne begleitet.

Ergebnisse:

Wasser und Öl vermischten sich nicht. Der Versuch zeigte den Schülern, wie For-scher wissenschaftlich arbeiten: präzise und sorgfältig den Aufbau eines Experiments dokumentieren, eine Hypothese bilden und begründen sowie das Ergebnis mit den aufgestellten Hypothesen vergleichen und die entsprechenden Schlussfolgerungen ziehen. Die teilnehmenden Schulklassen verbreiteten die Ergebnisse und Eindrücke im Lauf des Experiments an ihr Umfeld weiter – „Mund-zu-Mund-Propaganda“ für die Wissenschaft. Die Europaschule in Bornheim wurde ausgewählt, um Schüler beim Experimentieren zu filmen. Ihre Ergebnisse stellten diese jungen Forscher dann auf einer gemeinsamen Pressekonferenz von DLR, ESA und ZDF im DLR in Köln der breiten Öffentlichkeit vor. Darüber hinaus berichteten die Kindernachrichten „logo“ über das Projekt. Es gab eine Kooperation mit dem ZDF über eine Sendung der Serie „pur+“ und mit der Jugenddorfschule in Königswinter (CJD) entstand kurzfristig ein 1,5 Minuten-Beitrag für die Tagesthemen. Auch viele regionale Medien berichteten über das Experiment.

Start
4. Juli 2006 / Space Shuttle Discovery (STS-121)

ISS-Zeitraum	April 2006 bis April 2007
Unterbringung	Columbus-Modul
Experimentator	Dr. Hartmut Ripken; Claudia-Yvonne Nini
Einrichtung	DLR Raumfahrtmanagement
Bereich	Bildung
Partner	ESA



Anfänge eines außergewöhnlichen Welt-raumexperiments: Bis das Flugmodell fertig war, musste viel ausprobiert wer-den. Erst hat man die Lösung gelb gefärbt, dann rötlich bis man später die ideale Farbe für die Emulsion gefunden hatte.



„The Cube:“ Ein eng verschlossener Plexi-glascontainer mit doppelten Wänden mit einer Ölmischung für das ISS Schülerexpe-riment. Das Wasser ist rot gefärbt.



Auch die Schüler in ihren Klassenzimmern auf der Erde mussten die Emulsion schüt-teln und beschreiben, wie sich die Mixtur unter dem Einfluss der Schwerkraft ver-hält.



Impressum

Herausgeber:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Sabine Hoffmann
Leiterin DLR-Kommunikation (ViSdP)

Redaktion:

Martin Fleischmann (Redaktionsleitung)
Elisabeth Mittelbach
Andreas Schütz
Königswinterer Straße 522–524, 53227 Bonn
DLR.de/rd

Projektkoordination

Andrea Groß und Dipl.-Ing. Claudia Philot

Mitarbeiter der Ausgabe:

PD Dr. Markus Braun, Dr. Thomas Driebe,
Dr. Rainer Forke, Andrea Groß, Dr. Rainer Kuhl,
Prof. Dr. Günter Ruyters, Freya Scheffler-Kayser,
Volker Schmid, Dr. Katrin Stang, Johannes Weppler

Druck:

Meinders & Elstermann GmbH & Co. KG, 49191 Belm

Gestaltung:

CD Werbeagentur GmbH, 53842 Troisdorf
www.cdonline.de

Nachdruck nur mit Zustimmung des Herausgebers
und Quellenangabe. Gedruckt auf umweltfreundli-
chem, chlorfrei gebleichtem Papier. Alle Bilder DLR,
soweit nicht anders angegeben. Namentlich gekenn-
zeichnete Artikel geben nicht unbedingt die Mei-
nung der Redaktion wieder. Abgabe kostenlos.