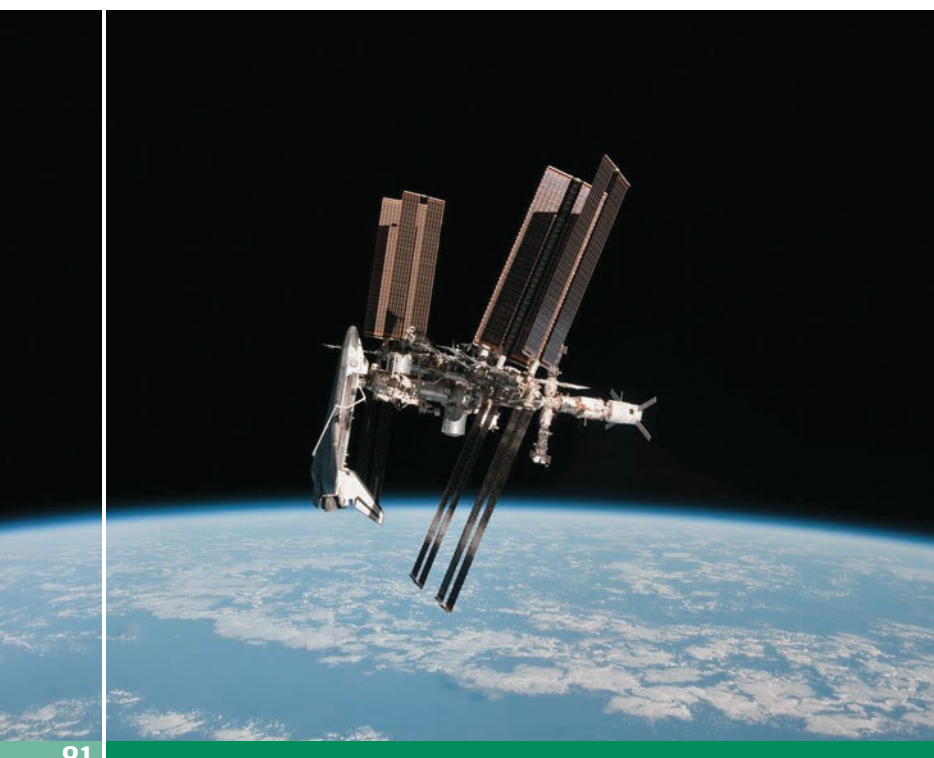


# IRS auf ISS

**Universität Stuttgart  
experimentiert auf der Internationalen Raumstation**



01

„Der Traum vom Fliegen“ betrifft in der Raumfahrt nicht nur die Astronautinnen und Astronauten. In ähnlicher Weise motiviert er viele Naturwissenschaftler und Ingenieure, neue wissenschaftlich und technologisch interessante und anspruchsvolle Problemstellungen anzugehen, die von der Erde aus nicht realisierbar sind. Ein besonders gutes Beispiel ist hierfür die Nutzung der Internationalen Raumstation ISS – die Beiträge des Instituts für Raumfahrtsysteme der Universität Stuttgart belegen dies und sind Gegenstand dieses Artikels.

## 1. Einleitung

*Die Internationale Raumstation fliegt im Vergleich zu Satelliten auf einer sehr niedrigen Flughöhe von ca. 400 Kilometern bei einer hohen Bahnneigung gegenüber dem Äquator von  $51,6^\circ$ , d.h. sie kann gerade noch bei geografischen Breiten von 70 Grad gesehen werden. Die Gesamtmasse beträgt seit dem Jahr 2009 circa 400 Tonnen, die Solargeneratoren mit der Gesamtfläche von 3.000 Quadratmetern sichern durch Nachführung mit Blick zur Sonne mindestens 110 Kilowatt bei Tag und Nacht (der ISS-Tag dauert 90 Minuten, davon ist die Station 30–40 Minuten im Erdschatten).*

Mit etwas Glück ist die Internationale Raumstation als strahlender, schnell bewegter Lichtpunkt am Nachthimmel zu sehen. Heller als alle Sterne und Planeten (mit Ausnahme von Venus) zieht sie in ungefähr zehn Minuten in östlicher Richtung von Horizont zu Horizont. In diesem künstlichen Himmelskörper leben und arbeiten seit dem Erstbezug am 2. November 2000 ständig bis zu sechs Astronauten. 16 Nationen betreiben gemeinsam das Großforschungslabor im Weltall. Es ist das wahrscheinlich größte wissenschaftlich-technische Projekt in der Geschichte der Menschheit, ein sichtbares Beispiel für die globale Zusammenarbeit zur friedlichen Nutzung des Weltraums.

Die Partner im internationalen Raumstations-Konsortium nennen unterschiedliche, länderspezifische Argumente, wenn sie ihre Beteiligung an diesem Großprojekt begründen. Sie sind politischer, wirtschaftlicher oder wissenschaftlicher Natur oder eine Kombination mit unterschiedlicher Gewichtung. Man einigte sich auf drei gemeinsame, allgemeine Ziele, die als Richtschnur für Konstruktion und Bau dienen:

- Forschung ist die wichtigste Aufgabe der Raumstation. Hier werden die speziellen Bedingungen des Weltraums für grundlegenden und anwendungsbezogenen Untersuchungen in vielen wissenschaftlichen Disziplinen ausgenutzt.

- Von ähnlicher Bedeutung ist das Gebiet der Technologieentwicklung, sowohl für die Verbesserung von industriellen Verfahren auf der Erde, als auch für zukünftige Raumfahrtvorhaben.
- Als Außenposten der Erde bildet die Raumstation ein Sprungbrett für die weitere Erforschung und Erschließung des Weltraums.

Raumstationen sind Vielzweck-Einrichtungen in der Erdumlaufbahn. Sie bestehen aus großen und komplexen Anlagen, die, ähnlich wie irdische Großlaboratorien für Elementarteilchenforschung, meist in internationaler Zusammenarbeit aufgebaut und betrieben werden. Dabei teilen sich viele Wissenschaftler die Geräte und die verfügbare Zeit. Die Forschungsprojekte werden im internationalen Wettbewerb ausgewählt. Knappe Ressourcen wie elektrische Energie, Datenspeicher- und -übertragungskapazität oder Astronautenzeit werden nach Kriterien der wissenschaftlichen Priorität zugeteilt.

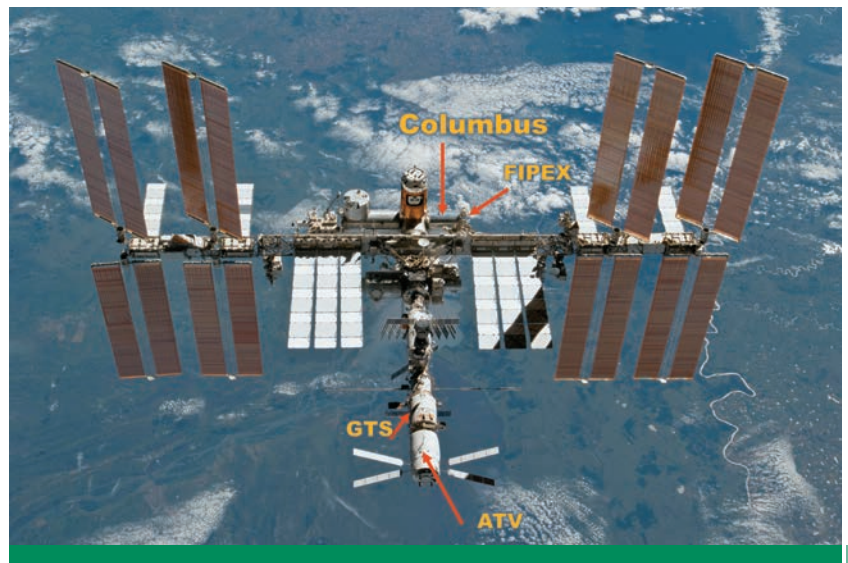
Eine Raumstation ermöglicht vielen Forschungsdisziplinen gleichzeitig einen Zugang zu den besonderen Umgebungsbedingungen im erdnahen Weltraum. Dort lassen sich physikalische Eigenschaften wie Schwerelosigkeit, großräumiges Vakuum, besondere Strahlungsbedingungen sowie die Beobachtungsmöglichkeiten der Erde oder des Weltraums nutzen.

Nachdem die Europäische Weltraumagentur ESA, unterstützt durch zehn ihrer Mitgliedsländer unter Führung Deutschlands, im Jahr 1995 beschloss, sich an Aufbau, Betrieb und Nutzung der ISS zu beteiligen, wurden kurz danach die europäischen Wissenschaftler dazu ermutigt darüber nachzudenken, wie die ISS mit ihren speziellen Umgebungsbedingungen für ihre Forschung zu nutzen ist. Forscher des Instituts für Raumfahrtssysteme der Universität Stuttgart reichten mehrere Vorschläge ein, zwei Experimente wurden ausgewählt, in den folgenden Jahren entwickelt und erfolgreich auf der ISS durchgeführt:

- GTS Global Transmission Services, ein Experiment zur weltweiten Zeitsynchronisation und zum Aufspüren und Verfolgen beweglicher Objekte,
- FIPEX Flux Probe Experiment, ein Experiment zur Messung der Verteilung des molekularen und atomaren Sauerstoffs in der Raumstationsumgebung.

## SUMMARY

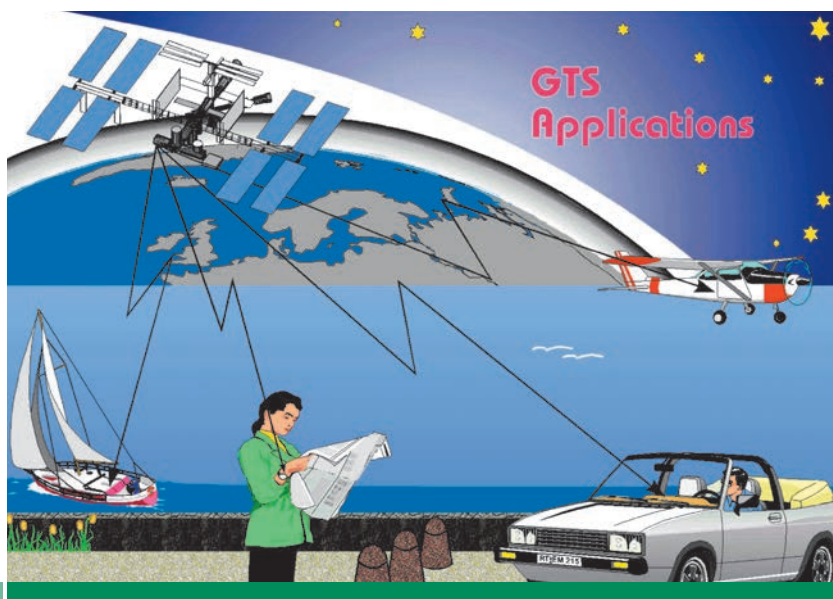
*Up to six astronauts live and work continuously onboard the International Space Station ISS since November 2000. This space laboratory is probably the largest scientific and technological project in the history of mankind and a visible example of global cooperation. A space station allows for specific investigations in basic and applied science disciplines due to its peculiar environmental conditions, offering unique possibilities in particular for a „research under reduced gravity“. Thus, new opportunities are emerging for the development of new technologies for both, the improvement for industrial processes on Earth and future space infrastructures. As outpost of Earth, the space station also represents a launch pad for the further exploration and utilization of space. Researchers of the Space Systems Institute of the University of Stuttgart have designed, developed and successfully conducted two scientific experiments on-board the ISS until today: Global Transmission Services (GTS), an experiment for global time synchronization and for detecting and tracking of moving objects; and Flux Probe Experiment (FIPEX) to measure molecular and atomic oxygen in the space station environment. Another space station experiment to be flown in a few years is currently under development. This experiment shall investigate advanced regenerative processes for life support systems of future space stations and transfer vehicles, which have as destinations asteroids and Mars. The motivation of these experiments in the context of “the dream of flying”, some selected results obtained until today, and their spin-off potential for terrestrial applications are subject of this paper.*



Ein weiteres Experiment zur Erweiterung der regenerativen Stoffwirtschaft, d.h. Verbesserung des Lebenserhaltungssystems an Bord von zukünftigen Raumstationen und Transferfahrzeugen zu Asteroiden und zum Mars, wird gegenwärtig vorbereitet und soll in den nächsten Jahren ebenfalls zur ISS fliegen. Über diese drei Experimente, die bisher erzielten Ergebnisse und deren Spin-off-Potenzial für terrestrische Anwendungen soll hier berichtet werden.

*Der Transceiver des GTS-Experiments ist im Servicemodul des russischen Stationsteils untergebracht; die GTS-Antenne auf der Außenseite zeigt direkt nach unten. Am hinteren Teil dieses Servicemoduls wird zeitweise das europäische Versorgungsschiff ATV ange dockt. Das Experiment FIPEX ist in Flugrichtung rechts außen am Columbus-Modul so ange dockt, dass die Anströmung der Restatmosphäre auf die Sensoren von vorn (oben) und seitlich erfolgt. Das geplante Experiment ReSTWEX wird innerhalb des Columbus-Labors unterzubringen sein.*



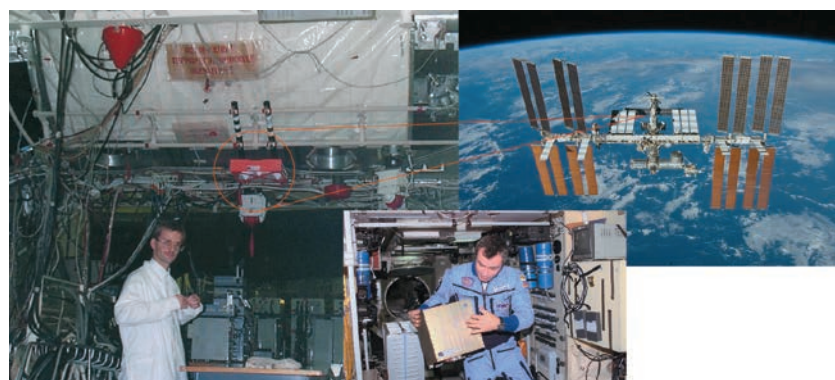


03

Ursprüngliche Idee eines Kommunikationsexperiments für die ISS, welches im Jahr 1996 bei der ESA eingereicht und 1998 zum Mitflug ausgewählt wurde.

## 2. Neue Funkdienste aus dem Weltall

Global Transmission Services (GTS) ist ein Kommunikationssystem zur Übertragung von Funksignalen von der Internationalen Raumstation (ISS). Es wird gegenwärtig im Rahmen eines Pilotexperiments auf der ISS erprobt und soll bald darauf als neue Dienstleistung weltweit angeboten werden. GTS war eines der ersten Experimente auf der neuen Raumstation; mit ihm sollten außerdem die Möglichkeiten der Nutzung der Raumstation für kommerzielle Zwecke demonstriert werden. Die Durchführung des Experiments wurde



04

Dr. Felix Huber bei der Montage der GTS-Antenne auf die Unterseite des russischen Servicemoduls im Jahr 1998 in Moskau und Kosmonaut Wladimir Deshurow beim Einbau des GTS Transceivers vier Jahre später innerhalb des Servicemoduls.

von der DaimlerChrysler Forschung, Fortis Swiss Watches sowie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der Europäischen Weltraumbehörde ESA unterstützt. Die Experimentidee ent-

stand im IRS, die Projektleitung und Entwicklung des Raumsegmentes wird vom Steinbeis Transferzentrum Raumfahrt (TZR), die Entwicklung des Bodensegmentes durch die Industriepartner, u.a. EADS Astrium Bremen, durchgeführt. Die früh benötigte Antennenplattform für das Experiment wurde bereits im Dezember 1998 am russischen Service Modul (SM) montiert und mit diesem im Sommer 2000 mit einer Trägerrakete vom Typ Proton zur ISS gebracht. Die Senderhardware folgte kurze Zeit später mit einem russischen Progress-Transporter und wurde von den Astronauten an Bord installiert. Der Beginn des experimentellen Sendebetriebs erfolgte 2002.

Für die erste Phase des Experimentes war die Untersuchung von zwei Anwendungsgebieten vorgesehen: die weltweite Synchronisation von Armbanduhren und der Diebstahlschutz für Kraftfahrzeuge.

Das GTS-System arbeitet seit gut über zehn Jahren mit Hilfe eines Computersystems und Senders an Bord der ISS. Es wird direkt von Stuttgart aus von einem neuen Bodensteuerzentrum kontrolliert. Hier erfolgt die Überwachung und Aufarbeitung der gesendeten Daten, die dann vom Sender zur Station abgestrahlt werden. Anfängliche technische Probleme durch fehlerhafte Kabelverbindungen und bisher in ihrer Wirkung unbekannte Signalstörungen konnten schrittweise durch Verbesserung der Signalqualität größtenteils kompensiert werden.

Die Vorteile der Internationalen Raumstation für das GTS-Experiment sind:

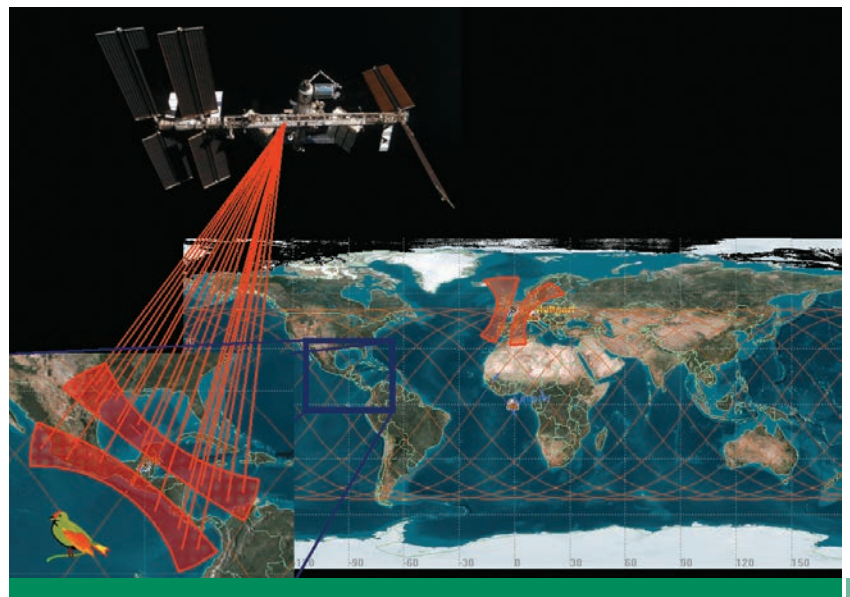
- Wegen der niedrigen Bahnhöhe von 400 Kilometern und der hohen Bahninklination kann jeder Ort der Erde innerhalb der Breitengrade 70°N und 70°S per Funk fünf bis sieben Mal pro Tag erreicht werden;
- GTS ist daher bestens geeignet, ein Zeit- oder Datensignal von nur wenigen Watt Sendeleistung auszustrahlen und auf der Erdoberfläche überall (abgesehen von den Polargebieten) zu verteilen;
- durch die niedrige Flugbahn und die hohe Bahngeschwindigkeit werden Signaleigenschaften erzeugt (Dopplereffekt, schnelle Winkeländerungen), die sich gegenseitig so ergänzen, dass eine grobe Navigation durchgeführt werden kann;
- die ISS ist als größtes Raumfahrtprojekt aller Zeiten für die nächsten zehn Jahre auf dieser vorteilhaften Bahn verfügbar (unabhängig von jeder speziellen Dienstleis-

ung) und bietet gleichzeitig die Möglichkeit des Austausches und der Wartung von Geräten durch Astronauten sowie günstige Transportmöglichkeiten im Abstand von maximal drei Monaten.

Nachteilig im Vergleich mit den Mobilfunk-Satellitenkonstellationen wie Iridium, Globalstar und ICO ist, dass ein Echtzeitbetrieb nicht möglich ist, d.h. ein zeitkritischer Betrieb kann mit der ISS alleine nicht unterstützt werden. Allerdings ist GTS vorbereitet für den Betrieb auf einer Satelliten-Konstellation z.B. in Form von einem zusätzlichen Nutzlastmodul auf existierenden Satellitenbussen wie etwa beim Galileo-Navigationssystem oder Orbcom-Satellitensystem. GTS soll es in Zukunft ermöglichen, kommerzielle Datenpakete weltweit an beliebige mobile Miniaturempfänger zu verteilen. Hierzu gehören u.a. die Verbreitung eines globalen Zeitsignals, um Funkuhren weltweit mit der richtigen Lokalzeit zu versorgen (globale Funkuhrsynchronisation), für Personrufdienste (Paging), Datenübertragungen zu Smartcards mit Polymerdisplays, Diebstahlsicherungen für KFZ, Kreditkarten und Handys etc., Autorückruf und -notruf, Fernsteuerung, Container-Verfolgung, Flotten Management usw. Beim zukünftigen Galileo-Satellitensystem sind im Gegensatz zum amerikanischen GPS unter der Bezeichnung „Public Regulated Services“ solche Dienste möglich.

Durch die Miniaturisierung des Empfängers wird es in Zukunft möglich sein, auch kleinere Gegenstände wie Uhren, Funktelefone, elektronische Fahrzeugschlüssel und Chipkarten vor Missbrauch zu schützen. Im Experiment wird derzeit erprobt, ob außerdem bei Diebstahl die Position dieser oder größerer hochwertiger mobiler Geräte (Container, Lkw-Auflieger) zumindest grob bis auf einige hundert Meter bestimmt werden kann. Dies ist bei einer Sendeleistung von einigen 100 mW vom Miniaturempfänger aus mit einem Rückkanal zur Raumstation möglich.

Die neuen Dienste sollen nach der Experimentierphase durch eine kommerzielle Betreibergesellschaft vermarktet werden. Das TZR entwickelte außerdem einen neuartigen, voll digitalen Empfänger für die genannten Anwendungsmöglichkeiten. Nach Abschluss der Experimentierphase wird dieser Prototyp direkt in einen generischen Mikrochip umgewandelt, der alle oben genannten Funktion ver-



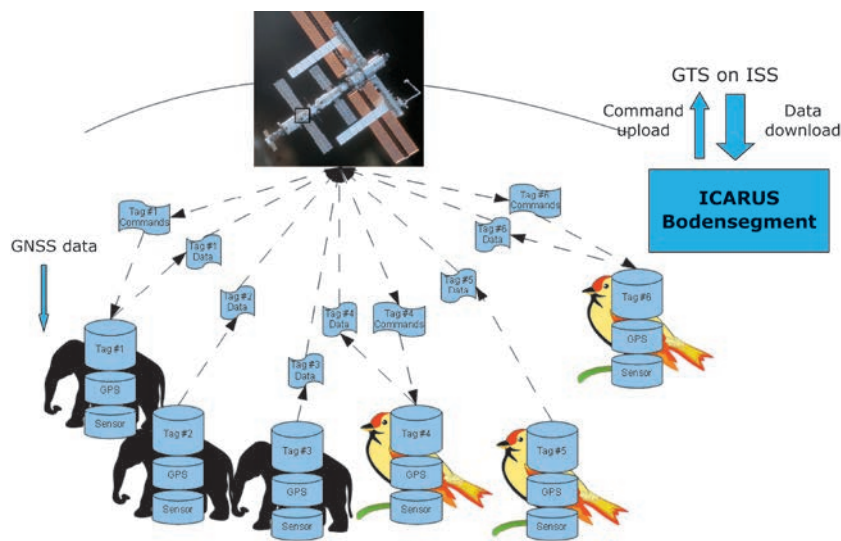
05

*Bodenspur der ISS mit typischem Empfangsbereich in Echtzeit (links) und Bodenspuren über einen ganzen Tag zum Verfolgen von über 1.000 unterschiedlichen Sendern pro Empfangsbereich mit kleinen, in Vögeln angebrachten Chips mit der Abmessung von nur vier Quadratmillimetern, viel kleiner als alles was heute möglich ist.*

wirklicht. Durch die generische Chipform, die für den jeweiligen Anwendungsfall konditioniert wird, lässt sich eine hohe Stückzahl und damit ein niedriger Preis erreichen.

Das Funktionsprinzip des GTS: Der Sender an Bord der ISS sendet periodisch die Zeitsignale und die vom Bodenkontrollzentrum erhaltenen Nutzsignale 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  $\pm 70$  Breitengraden, d.h. nahezu der gesamte bewohnte Bereich der Erde, abgedeckt. Die Armbanduhren am Boden können durch die besondere Form der Abstrahlung der Signale die richtige Uhrzeit ermitteln und im Falle von Nutzdaten kann durch eine spezielle Kodierung, die nicht durch andere Sender nachgebildet werden kann, die Authentizität der Daten überprüft werden. Dadurch wird eine fälschungssichere Übertragung der Daten, z.B. für den Diebstahlschutz, gewährleistet. Das GTS-System sendet für die verschiedenen Zeitzonen jeweils die korrigierte Lokalzeit mit Sommer/Winter-Informationen aus, so dass die Uhren am Boden automatisch die korrekte Zeit anzeigen. Jeder Empfänger am Boden hat eine eigene Identifikation (ID), durch die gezielt Informationen an einen einzelnen Benutzer gesendet werden können.

Für den Einsatz als Diebstahlschutz sendet das GTS System kodierte Nachrichten an den Empfängerchip, der daraufhin die



06

*Nutzer-definierte Kontakte der ICARUS-Nutzer per Telecommand (drei bis vier Mal pro Tag) via Raumstation zu den Tieren. Zurück kommen Daten wie Position (GPS- oder Galileo-Messung in Chip integriert), Beschleunigung, Temperatur und Druck.*

Elektronik blockiert. Dabei kann der Chip sowohl in Kraftfahrzeugen als auch in den entsprechenden Schlüsseln untergebracht sein. Es kann damit verhindert werden, dass ein Dieb selbst mit einem gestohlenen Originalschlüssel ein Fahrzeug entwendet, da der Schlüssel nach kürzester Zeit wirkungslos wird. Der zunehmenden Bedrohung der Fahrzeuginhaber, die durch die gewaltsame Herausgabe des Schlüssels immer häufiger besteht, wird damit entgegengewirkt.

Der GTS Datendienst ist im Wesentlichen für die Übertragung von Daten vom All zur Erde ausgelegt. Für Anwendungen, die einen Datenrückkanal benötigen, wird derzeit eine Erweiterung des Systems entwickelt: Das Icarus-Projekt nutzt die GTS Technologie, um Funketiketten („Animal Tags“) fernzusteuern und auch auszulernen. Da hierzu viele Sender gleichzeitig vom Boden zur ISS senden müssen, wird ein Zusatzmodul entwickelt, das durch ein nicht-kohärentes Bandspreizverfahren bis zu 1.000 Etiketten gleichzeitig unterscheiden kann. Ein leistungsfähiger digitaler Signalprozessor in Verbindung mit einer speziellen Antennencharakteristik kann die gleichzeitig verschickten Datenpakete separieren und weiterverarbeiten. Der GTS Downlink kann hierbei verwendet werden, um die Etiketten zusätzlich während des Funkkontakts zu kommandieren, z.B. Messraten umzustellen oder andere Parameter einzustellen. Die besondere Herausforderung bei den Funketiketten sind ein geringer Stromverbrauch und geringe Masse, inklusive der Antenne. Durch die

besondere Antennenform auf der ISS kann mit geringen Sendeleistungen gearbeitet werden. Zukünftige Etiketten sollen weniger als 9 Gramm wiegen und ihre Stromversorgung durch „Energy Harvesting“ bewerkstelligen. Frei zugängliche Schnittstellen und Nutzerspeicher werden die Anbindung eigener Sensoren und die Entwicklung neuer Strategien zur Datenerfassung und Verbrauchsoptimierung durch die Endbenutzer ermöglichen.

Beispielhaft sollen einige der beabsichtigten Anwendungen speziell der Ornithologie erwähnt werden:

- Lokalisierung der Brutplätze von Vögeln
  - Kollisionsvermeidung mit Flugzeugen
  - Migrationswege und -verhalten
- und allgemein aus der Zoologie:
- Detektion von Klimaveränderungen durch Animal Tracking
  - Einfluss von Klimaveränderungen auf Tiere
  - Erforschung der Ausbreitung von durch Tiere verbreiteten Krankheiten wie SARS, West-Nil-Virus
  - Erforschung von Migrationsrouten für Planung von Landschaftselementen (Wälder, Kraftwerke, Windkraftwerke, Autobahnen ...).

### 3. Flux ( $\Phi$ ) Probe Experiment auf ISS – FIPEX

„FIPEX on ISS“ ist ein Experiment, das die Konzentrationen von atomarem und molekularem Sauerstoff in der direkten Umgebung der ISS bestimmen sollte. Es ist 1995 in der Planungsphase der ISS vom Institut für Raumfahrtssysteme vorgeschlagen, entwickelt und nach dem Wechsel des Projektleiters Stefanos Fasoulas an die TU Dresden dort ab 2000 für den Einsatz qualifiziert worden. Es wurde, integriert auf einer externen Experimentierplattform (European Technology Exposure Facility, EuTEF), am 7. Februar 2008 zusammen mit dem europäischen Forschungsmodul Columbus mit dem Space Shuttle Atlantis gestartet, ein paar Tage später installiert sowie anschließend 572 Tage operationell betrieben. Das Experiment und die gesamte Plattform wurden danach mit einer der letzten Shuttle-Missionen zur Erde zurückgeführt. Unterstützt wurde das Projekt durch eine langjährige Förderung durch das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) und die Europäische Raumfahrtagentur (ESA).



Die wissenschaftliche Motivation für dieses Experiment besteht darin, dass Raumflugkörper im niedrigen Orbit, wie z.B. das Space Shuttle, die ISS und einige wissenschaftliche und kommerzielle Satelliten, die Erde in einer sehr verdünnten Restatmosphäre umkreisen. Die Obergrenze der „wirkenden“ Atmosphäre wird dabei für Raumfahrtfragen in etwa dort definiert, wo der solare Strahlungsdruck die atmosphärischen Kräfte als wesentlichen Störeinfluss ablöst (circa 1.000 Kilometer Höhe). Allerdings wird oberhalb der Mesopause (ab etwa 85 Kilometer) der üblicherweise in der unteren Atmosphäre vorhandene molekulare Sauerstoff durch die Solarstrahlung im UV-Bereich dissoziiert. Die dadurch entstehenden Sauerstoffatome sind nun wegen der geringeren Masse beweglicher und es erfolgt damit ihre Anreicherung ab dieser Höhe, zumal die ebenfalls mögliche Rekombination zu molekularem Sauerstoff in der zunehmend dünneren Atmosphäre immer unwahrscheinlicher wird. Atomarer Sauerstoff dominiert folglich ab einer Höhe von etwa 200 Kilometer im Vergleich zu Sauerstoff- und Stickstoffmolekülen und stellt tatsächlich die Hauptkomponente der Restatmosphäre bis circa 1.000 Kilometer Höhe dar.

Der Teilchenfluss an atomarem Sauerstoff auf die Oberfläche eines Raumflugkörpers bewirkt nun wegen der extremen Reaktionsfreudigkeit und der hohen Relativgeschwindigkeiten eine Vielzahl von Oberflächenprozessen, darunter auch beispielsweise eine Erosion des Oberflächenmaterials. Für einen Satelliten im erdnahen Orbit kann die Anzahl der auftreffenden Sauerstoffatome auf circa  $10^{22}$  pro Quadratcentimeter für eine Sonnenzyklusperiode von elf Jahren abgeschätzt werden. Die Erosion nicht besonders geschützter Strukturbauteile könnte hier dramatische Folgen haben. Bauteile aus Kohlenfaserverbundwerkstoffen mit einer Dicke von 1,25 Millimeter, wie sie ursprünglich für den Einsatz bei der ISS vorgesehen waren, würden beispielsweise etwa 80 Prozent ihrer Dicke über eine geplante Missionsdauer von 30 Jahren verlieren. Da außerdem der Widerstand von Raumflugkörpern in großem Maße von der Dichte der Anströmung abhängt, ist für die Planung von Missionen im niedrigen Erdrorbit und für alle Startvorgänge von Raketen die Kenntnis der vorliegenden Atmosphären-

verhältnisse von großer Bedeutung. Da aber die Atmosphäre andererseits dem Einfluss der solaren Strahlung sowie des Erdmagnet- und Gravitationsfeldes unterliegt, hängt der genaue Zustand an einem gegebenen Punkt von vielen Parametern ab, die längerfristige, kurzfristige und räumliche Variationen beinhalten. Für die Untersuchung dieser Effekte ist deshalb die Messung des Teilchenflusses einzelner Gasbestandteile, insbesondere des Sauerstoffs, auf eine wohldefinierte Fläche von großer Bedeutung.

Die zeitlich aufgelöste Messung von atomarem Sauerstoff ist jedoch nicht nur für die operationelle Raumfahrt von Bedeutung. Die dissoziative Strahlungsabsorption im ultravioletten Bereich ist tatsächlich eine der wichtigsten Wechselwirkungen der Solarstrahlung mit unserer Atmosphäre. Die Auswirkungen sind vielfältig und teilweise global. Nach erfolgter Photodissoziation wird nämlich ein Teil der absorbierten Energie direkt durch Stöße in Wärme umgewandelt, zum Teil in Form von Emissionen wieder in den Weltraum emittiert und zum Teil als potentielle chemische Energie vorübergehend gespeichert. Über Rekombinationsprozesse wird diese potentielle chemische Energie dann letztlich in Wärme umgewandelt, wobei sie im Bereich von 80 bis 90 Kilometer Höhe den größten Beitrag zur gesamten Aufheizung leistet. Genau wie an den Heizprozessen ist atomarer Sauerstoff auch entscheidend an den entsprechenden Kühlprozessen beteiligt. Im globalen Strahlungsbudget der oberen Erdatmosphäre ist eine wesentliche Wärmesenke die Abstrahlung infraroter Photonen im 15 Mikrometer-Band des Kohlendioxids. In Bezug auf den atomaren Sauerstoff ist hier von besonderer Bedeutung, dass sich die Energieniveaus dieses Bandes oberhalb von etwa 70 Kilometer Höhe wegen der geringen Luftdichte und der damit verbundenen geringen Anzahl von Stößen nicht mehr im thermischen Gleichgewicht mit dem Strahlungsfeld befinden. Die genauen Besetzungszahlen dieses Energieniveaus hängen dabei entscheidend von Stößen mit atomarem Sauerstoff zusammen, wobei im relevanten Höhenbereich in der Regel die Konzentration des atomaren Sauerstoffs nicht bekannt ist. Neben dem offensichtlich negativen Effekt auf unser Verständnis des Energiebudgets der oberen Erdatmosphäre ist noch von Bedeutung, dass die meisten satelliten-



07

Positionierung von FIPEX auf der ISS nach der Installation auf einer externen Plattform am Columbus-Modul der ISS (Bild: NASA, siehe auch (02)). Das Bild zeigt das integrierte Experiment mit insgesamt 12 Sensoren, 6 in Flugrichtung und weitere 6 senkrecht dazu und einer Gesamtmasse von 5 Kilogramm. Dargestellt sind auch die verwendeten „FIPEX on ISS“-Sauerstoffsensoren für das Ultrahochvakuum (im Vergleich zum Streichholz), Sensoren für den Einsatz in der Medizin- und Umwelttechnik (mittig) und ausgelotetes momentanes Miniaturisierungspotenzial (rechts).

gestützten Verfahren zur Bestimmung des Temperaturprofils auf einer Messung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im selben Wellenlängenbereich von 15 Mikrometer beruhen. Da aber u.a. die Konzentration des atomaren Sauerstoffs nicht hinreichend gut bekannt ist, weisen entsprechende satellitengestützte Messungen in der oberen Erdatmosphäre oft dramatische Fehler von bis zu einigen zehn Grad auf.

Damit kann also eine entsprechende, zeitlich hoch aufgelöste Messung von atomarem Sauerstoff das Verständnis über die auftretenden Phänomene wesentlich erhöhen, einen Beitrag zu einer verbesserten Modellbildung unserer Atmosphäre leisten und damit sogar Einzug in Klimamodellen finden.

Vor dem Einsatz auf der ISS wurden als Vorläufermodelle von FIPEX mit leicht modifizierten kommerziellen Sensoren bereits mehrere kurzzeitige Flugexperimente durchgeführt, um primär das Funktionsprinzip zu demonstrieren:

- TEXUS 34, eine ballistische Höhenforschungsrakete (Start in Kiruna, Schweden, 1996);
- VS30, ebenfalls Höhenforschungsrakete (Start in Brasilien, 1997);
- TEAMSAT/Ariane 502, ein Forschungssatellit, gestartet mit dem Zweitstart der Ariane 5 mit etwa 1 Woche Betriebsdauer (1997);
- IRDT 1 und IRDT 2, europäisch-russische Demonstrationsmissionen für aufblasbare Wiedereintrittskapseln (erstmalig mit eige-

nen miniaturisierten Sensoren, 2000, 2002). Die zunächst eingesetzten kommerziellen Sensoren hatten dabei einen vergleichsweise hohen Leistungs- und Energiebedarf, weshalb die eigene Entwicklung von miniaturisierten Sensoren initiiert wurde. Diese Mikrosensoren basieren auf einem keramischen Festkörperelektrolyt, der für Sauerstoffionen leitfähig ist. Trifft Sauerstoff auf die Elektroden auf, wird er katalytisch in zweifach negativ geladene Ionen zerlegt. Diese Ionen werden dann, mittels einer angelegten Spannung, durch den Festelektrolyt geleitet. Der Strom, der durch diese Ionenleitung entsteht, kann gemessen werden und ist proportional zum Sauerstoffpartialdruck in der Umgebung. Durch Variation der eingesetzten Elektrodenmaterialien kann zusätzlich eine Selektivität für bestimmte Gasarten (z.B. atomaren Sauerstoff) erfolgen. Die Sensoren müssen dabei eine Betriebstemperatur von über 400 °C haben, da erst dann der keramische Festelektrolyt eine ausreichende Leitfähigkeit für Sauerstoffionen aufweist.

Ein weiterer Einsatz von FIPEX wird derzeit auf einem miniaturisierten Satelliten der TU Dresden (CubeSat SOMP, ein Kilogramm Gesamtmasse, ein Liter Volumen) vorbereitet, dessen Start in einen polaren Orbit demnächst erfolgen soll. Ebenso sind Missionen mit Höhenforschungsraketen bereits fest eingeplant. Schließlich wird das Instrument derzeit auch als Bestandteil von Satellitenschwärmen in Erwägung gezogen, um praktisch eine vierdimensionale Vermessung der atomaren Sauerstoffkonzentration in den drei Raumkoordinaten und der Zeit durchzuführen.

Erwähnenswert ist abschließend, dass die Miniaturisierung der Sensoren für die Raumfahrt sehr rasch auch attraktiv für zahlreiche terrestrische Anwendungen wurde, wie z.B. für verschiedene industrielle Anwendungen in der Regelungs- und Verfahrenstechnik, für die medizinische Leistungsdiagnostik, bei der Lecksuche in Vakuumsystemen und viele andere.

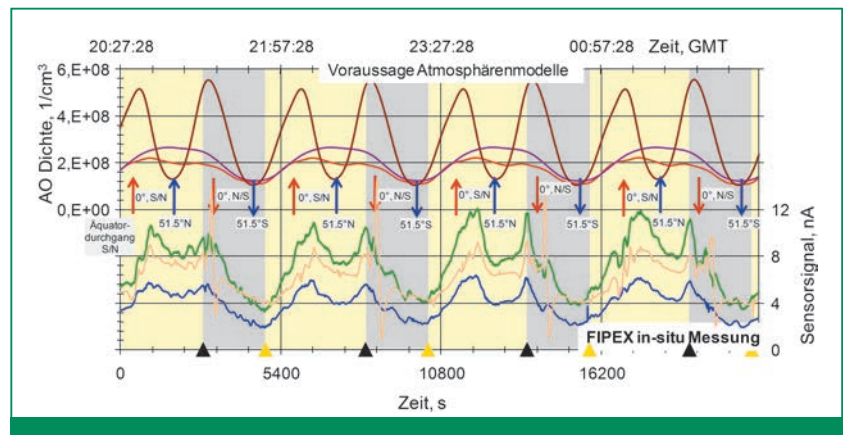
#### 4. Regenerative Stoffwirtschaft – erprobt auf der ISS

Die Entwicklung von regenerativen und nachhaltigen Lebenserhaltungssystemen ist eine wesentliche Voraussetzung für die Realisierung von Langzeitaufenthalten des Menschen im Weltraum. Das Lebenserhal-

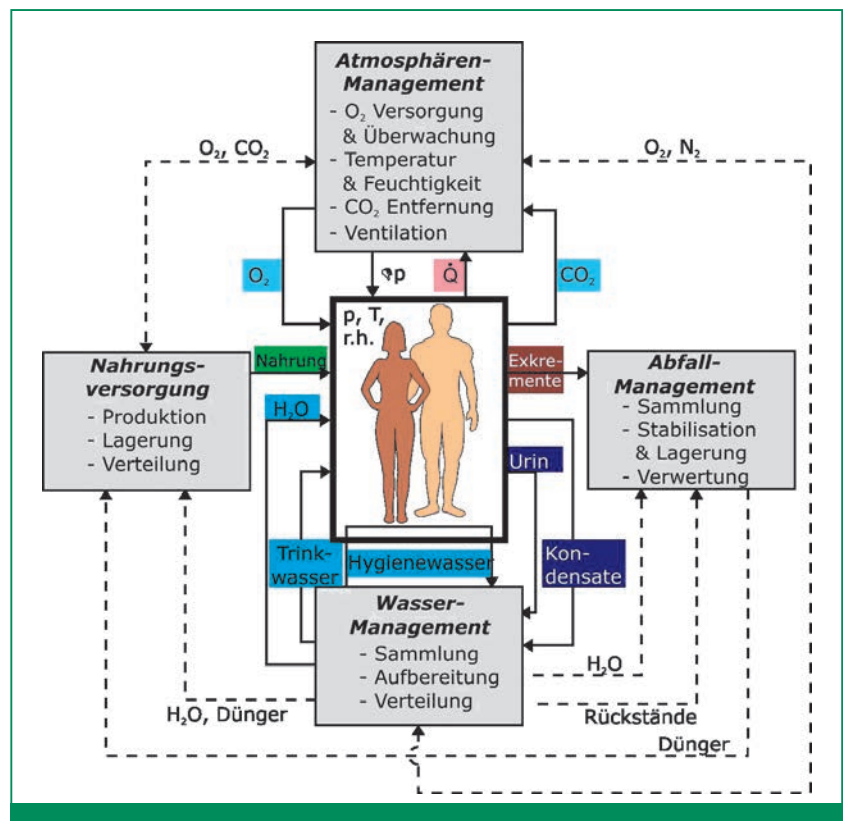
tungssystem (LSS – Life Support System) ist jenes Subsystem eines bemannten Raumfahrtssystems, welches dem Menschen das Überleben in der lebensfeindlichen Umgebung des Weltraums ermöglicht, indem es die Versorgung mit Bedarfsgütern und die Entsorgung sowie gegebenenfalls die Wiederaufbereitung von Abfall sicherstellt. Die Verbesserung von Lebenserhaltungssystemen verfolgt das langfristige Ziel, regenerative Systeme bis hin zur Autarkie zu entwickeln und zu erproben.

Zukünftige bemannte Raumfahrtmissionen werden den niedrigen Erdorbit verlassen und stellen aufgrund größerer Entfernung zur Erde und folglich längerer Transferzeiten im Vergleich zur Internationalen Raumstation neue Anforderungen an Betrieb und Funktionalität. Aktuelle Bestrebungen reichen vom Aufbau einer Forschungsbasis auf dem Mond, über die bemannte Erkundung von erdnahen Asteroiden bis zu bemannten Marsmissionen. Die Minimierung des Nachschubbedarfs spielt eine zentrale Rolle zur Bewältigung dieser Herausforderungen. Dies kann durch Regeneration der lebenswichtigen Stoffe Sauerstoff, Wasser und Kohlenstoff – also die Schließung der entsprechenden Kreisläufe – erzielt werden. Heute verfügbare und bereits im ISS- Lebenserhaltungssystem eingesetzte Technologien basieren auf physikochemischen Prozessen und ermöglichen die Regeneration von Wasser und teilweise auch schon von Sauerstoff. Im nächsten Schritt soll durch Kultivierung von biologischen Systemen zusätzlich der Kohlenstoff-Kreislauf geschlossen werden mit dem Ziel, Nachschubmasse einzusparen oder zumindest durch ungleiche Redundanzen die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Versorgung von Astronauten zu erhöhen. Zusätzlich sind Veränderungen an der Infrastruktur so vorzunehmen, dass die synergetische Vernetzung von Komponenten eine zusätzliche Einsparung von Tankmassen und Nachschub ermöglicht.

Der von Wissenschaftlern des IRS gewählte und vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR seit 2009 geförderte Ansatz, welcher im Experiment auf der Erde schon realisiert und später im Welt- raum erprobt werden soll, ist die Unter- suchung der Machbarkeit von Lebenser- haltungssystemen auf Basis der synergeti-



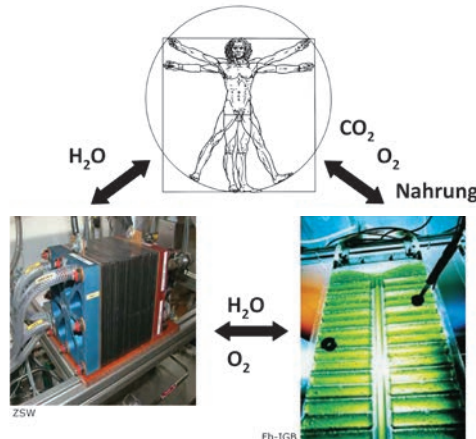
Die ersten Ergebnisse des „FIPEX on ISS“ Experiments im Vergleich zu verschiedenen Atmosphärenmodellen. Dargestellt sind die Werte für vier Orbits im Zeitraum 16.-17. April 2008. Die schwarzen Dreiecke symbolisieren den Eintritt in die Schattenphase (grau hinterlegt), die gelben Dreiecke den Sonnenaufgang. Der obere Teil des Diagramms zeigt die Voraussagen von drei verschiedenen Atmosphärenmodellen, die teilweise nicht einmal qualitativ übereinstimmen. Der untere Teil zeigt die Messergebnisse von drei Sensoren, die zu diesem Zeitpunkt betrieben wurden. Man erkennt deutlich den Anstieg der Konzentration nach dem Austritt aus der Schattenphase, das Erreichen eines Maximums in der Nähe des Äquators, das Absinken für größere nördliche und südliche Breiten sowie das deutliche Absinken nach dem Schatteneintritt.



Die Aufgaben der Lebenserhaltung sind auf Subsysteme verteilt, welche den Nachschub der Atmosphärengase, von Wasser und Nahrung sichern und die Abfallstoffe entsorgen. Keines dieser Subsysteme arbeitet unabhängig von den anderen, alle stehen miteinander in Beziehung. Dabei wird der Mensch auch als Subsystem betrachtet, mit Ein- und Ausgängen für seine „Stoffströme“.



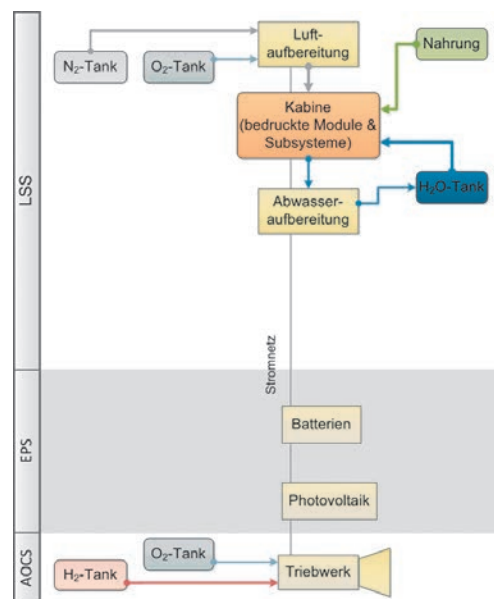
Stoff- und Energieströme im Lebenserhaltungssystem zwischen dem Menschen, der Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle und dem Photobioreaktor: Die direkt oder durch Lichtleiter indirekt dem Sonnenlicht ausgesetzten Algen wandeln das ausgeatmete Kohlendioxid der Astronauten durch Photosynthese um und produzieren dabei Sauerstoff und essbare oder energetisch nutzbare Biomasse. Der Mensch kann den Sauerstoff einatmen oder die Brennstoffzelle diesen, zusammen mit zugeführtem z.B. durch Elektrolyse erzeugtem Wasserstoff, zur Produktion elektrischer Energie nutzen. Dabei entsteht trinkbares Wasser. Physikochemische Filterung reinigt die Stoffströme so, dass die zu Grunde liegenden Prozesse lange Zeit stabil ablaufen.



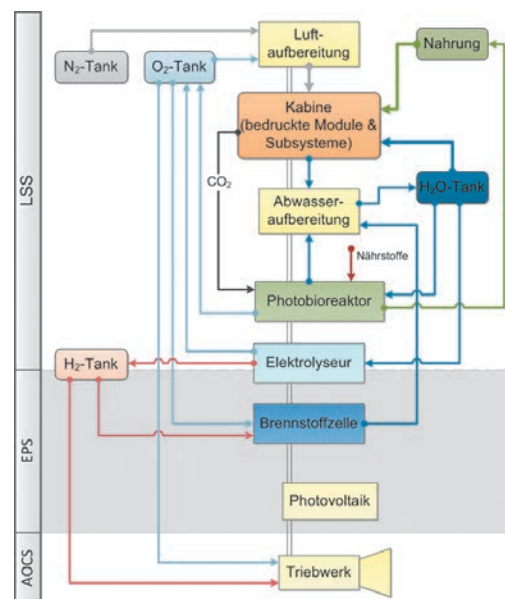
Die Integration von Photobioreaktoren und Brennstoffzellen. Mit den Photobioreaktoren, die für die Kultivierung von Mikroalgen eingesetzt werden, kommen biologische Prozessführungen hinzu.

Die eingesetzten Mikroalgen der Spezies *Chlorella vulgaris* setzen das ausgeatmete Kohlendioxid der Besatzung mit Hilfe von Licht in Biomasse (Nahrung) um. Der dabei produzierte Sauerstoff kann einerseits in die Kabine zurückgeführt, andererseits der Brennstoffzelle zusammen mit Wasserstoff zur Erzeugung elektrischer Energie zugeführt werden. Über den Elektrolyseprozess wird Wasser aus dem Photobioreaktor bzw. aus dem Brennstoffzellenprozess in Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten. Letzterer ist vor allem als Energiespeicher und Treibstoff vielseitig einsetzbar. Durch die Stoffregenerations-

Verdeutlichung des Einsparpotenzials anhand des Vergleichs eines nicht vernetzten Lebenserhaltungssystems mit dem weitgehend synergetisch vernetzten System einschließlich Energiesystem (EPS – Electrical Power System) und dem Lage- und Bahnregelungssystem (AOCS – Attitude and Orbit Control System). Das unvernetzte Raumfahrtssystem (links) sieht für jedes Subsystem seine eigene Stoffinfrastruktur vor. Hier kann bereits eine regenerative Brennstoffzelle, d.h. inklusive Elektrolyseur, anstelle der Batterie eingesetzt werden. Es kann jedoch als geschlossenes System nur die Aufgabe einer sekundären Batterie erfüllen. Im Beispiel des vernetzten Systems (rechts) werden für Wasserstoff und Sauerstoff sowie Wasser die Grenzen der Subsysteme durchdrungen. Wasserstoff steht sowohl der Brennstoffzelle, als auch dem Antriebssystem zur Verfügung. Sauerstoff kann zur Erzeugung von elektrischer Energie in der Brennstoffzelle als Oxidationsmittel und zur Versorgung der an Bord befindlichen Personen verwendet werden.



und Vernetzungsfähigkeit der eingesetzten Technologien, sowie durch die Ausnutzung synergetischer Effekte bei der Infrastrukturgestaltung, lassen sich Masseneinsparungen und Redundanzen erzielen. Unter einem hybriden Lebenserhaltungssystem versteht man die Zusammensetzung des LSS aus physikochemischen und biologischen Komponenten oder auch die Verknüpfung von zwei oder mehreren Prozesswegen außerhalb des menschlichen Stoffwechsels zum Vorteil beider Prozesse. Hybride LSS sind kurz- bis mittelfristig umsetzbar, da sie bereits entwickelte physikochemische Prozesse und einfach kontrollierbare biologische Systeme einsetzen. Insbesondere Vorteile bei der äquivalenten Systemmasse und Zuverlässigkeit sind gegenüber rein bioregenerativen LSS zu erwarten. Aktuell sind physikochemische Prozesse besser verstanden, daher auch zuverlässiger zu kontrollieren, weniger wartungsintensiv und kompakter in der Bauweise. Biologische Prozesse arbeiten träger, sind aber in der Lage, Kohlenstoff aufzubereiten. Künftig kann die Zuverlässigkeit biologischer Systeme durch eine effizientere Kontrolle und dank ihrer Eigenschaft, dass sie in der Lage sind, sich bei Störfällen zu erholen und selbst zu reparieren, gesteigert werden. Diesem Prinzip der Selbsterholung liegt die Selbstorganisation von Lebewesen und Organismen zugrunde und bleibt physikochemischen Technologien vorenthalten. Die Herausforderung in der Umsetzung besteht in noch offenen biologischen Fragen und in der System-



integration, für welche ein interdisziplinärer Ansatz erforderlich ist. Wissenschaftler und Ingenieure aus verschiedenen Disziplinen müssen einen Beitrag zu einem Gesamtsystem leisten. Hybride Lebenserhaltungssysteme stellen somit den mittelfristigen Zwischenschritt zu bioregenerativen Systemen dar. Aufgrund geringer Puffer- und Speicherkapazitäten sind eine effiziente kontinuierliche Überwachung und Kontrolle erforderlich, sowie schnelle und zuverlässige Komponenten redundant einzubeziehen.

Die gestellten Anforderungen und Randbedingungen sind wie folgt: Die Massenströme eines Menschen sind in (09) dargestellt. Die Massenströme können je nach Aktivität des Menschen höher oder niedriger liegen. Einen nicht zu vernachlässigenden Anteil nimmt die Verpackung der Nahrung ein. Das Hygienewasser umfasst Waschwasser für Hände, Dusche, Kleidung und Geschirr sowie Toilettenspülung. Die Menge hängt davon ab, welchen Komfort im Umgang mit Wasser einer Besatzung zugestanden wird. Grundsätzlich gilt: je länger die Missionsdauer, desto höher der Bedarf an Hygienewasser. Die Kabinenluft entspricht weitgehend der Luftzusammensetzung auf der Erde. Aus Sicherheitsgründen darf der Partialdruck von Sauerstoff höchstens ein Drittel des Gesamtdrucks ausmachen, um die Entflammbarkeit von Materialien in Grenzen zu halten und nicht länger als zwei Stunden unter 134 Millibar liegen.

Eine synergetische Vernetzung im LSS bedeutet, dass das Zusammenschalten von Komponenten, die jeweils eine konkrete Aufgabe erfüllen, weitere übergeordnete Vorteile im systemischen Zusammenwirken ergeben wie etwa Masseeinsparung oder Redundanzen. Für die Umsetzung eines hybriden LSS können synergetische Vorteile durch die Integration von Brennstoffzellen und Photobioreaktoren zur Kultivierung von Mikroalgen in einer vernetzten Stoffinfrastruktur hinsichtlich Masse, Volumen und Nachschub erzielt werden.

Die aktuelle Forschung konzentriert sich auf die Systembewertung dieser Vernetzung von Photobioreaktoren (Sauerstoffproduktion, Kohlendioxidaufnahme, Nutzung als Nahrung) und der Brennstoffzellen (Erzeugung von elektrischer Energie und Wasser) sowie auf die technischen Aspekte der Systemintegration. Von den Schnittstellen der Komponenten zum Lebens-

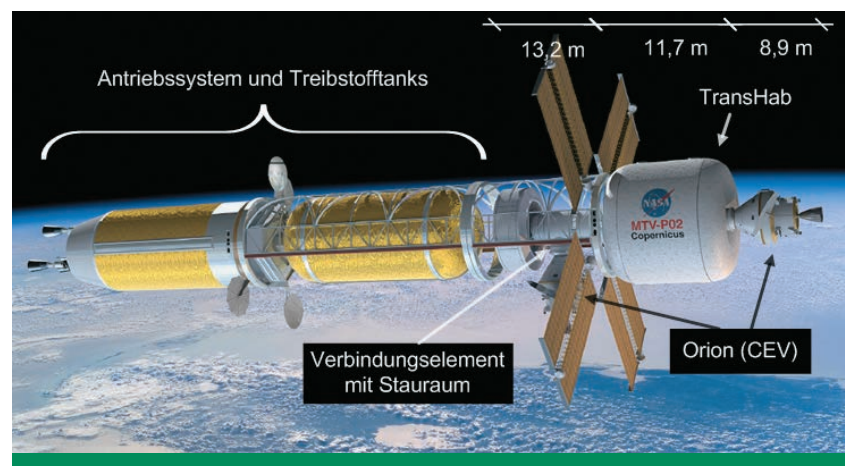
## ZUSAMMENFASSUNG

Seit November 2000 leben und arbeiten ohne Unterbrechung bis zu sechs Astronauten in der Internationalen Raumstation ISS. Das Großforschungslabor im Weltall ist das wahrscheinlich größte wissenschaftlich-technische Projekt in der Geschichte der Menschheit und ein sichtbares Beispiel für die globale Zusammenarbeit. Die Raumstation ermöglicht durch die speziellen Umgebungsbedingungen grundlagen- und anwendungsbezogene Untersuchungen in vielen wissenschaftlichen Disziplinen und damit einzigartige Möglichkeiten insbesondere für die „Forschung unter reduzierter Schwerkraft“. Dadurch ergeben sich neue Möglichkeiten der Technologieentwicklung, sowohl für die Verbesserung von industriellen Verfahren auf der Erde, als auch für zukünftige Raumfahrt-Infrastrukturen. Als Außenposten der Erde bildet die Raumstation zudem ein Sprungbrett für die weitere Erforschung und Erschließung des Weltraums.

Forscher des Instituts für Raumfahrtssysteme der Universität Stuttgart haben bislang zwei Experimente entwickelt und erfolgreich auf der ISS durchgeführt: GTS Global Transmission Services, ein Experiment zur weltweiten Zeitsynchronisation und zum Aufspüren und Verfolgen beweglicher Objekte und das FIPEX Flux Probe Experiment zur Messung der Verteilung des molekularen und atomaren Sauerstoffs in der Raumstationsumgebung. Ein weiteres Experiment zur Erweiterung der regenerativen Stoffwirtschaft (ReStWEX), d.h. Verbesserung des Lebenserhaltungssystems an Bord von zukünftigen Raumstationen und Transferfahrzeugen zu Asteroiden und zum Planeten Mars, wird gegenwärtig vorbereitet und soll in den nächsten Jahren ebenfalls zur ISS fliegen. Über diese drei Experimente, die bisher erzielten Ergebnisse und deren Spin-off-Potenzial für terrestrische Anwendungen wird hier berichtet.

erhaltungssystem darf keine Gefahr einer Kontamination ausgehen, so dass Gegenmaßnahmen mitberücksichtigt und im Labor untersucht werden müssen. Zusätzlich ist ein mikrogravitationstauglicher Photobioreaktor zu entwickeln. Die ersten Ergebnisse fließen bereits in einen Vorschlag für ein Weltraumexperiment ein, welches künftig auch als Erweiterung des geplanten Advanced Closed Loop Systems (ACLS) auf der Internationalen Raumstation geplant ist. Das ACLS-Experiment der Firma EADS Astrium Friedrichshafen soll demonstrieren, dass bei Transport-

Interplanetares Transfer-Vehikel (ITV) für den Flug zum Mars. Ein solcher Flug dauert unter Beachtung der Rückkehrfenster knapp zwei Jahre bei 15 Tagen Aufenthalt am Mars und – ohne Alternative dazwischen – mindestens drei Jahre bei 15 Monaten Aufenthalt auf dem Mars. Trotz der Verwendung von nuklear-thermischen Triebwerken besteht die Abflugmasse hauptsächlich aus Treibstofftanks und Antriebssystem. Das gesamte Volumen der Module beträgt der NASA-Studie zufolge 600 Kubikmeter.



## DIE AUTOREN

**PROF. DR. DR.-ING. E.H.  
ERNST MESSERSCHMID**

arbeitete nach dem Studium der Physik an den Universitäten Tübingen und Bonn als Wissenschaftlicher Mitarbeiter von 1970 bis 1977 am CERN in Genf, am Brookhaven National Laboratory in New York, am DESY in Hamburg und promovierte 1976 an der Universität Freiburg. Ab 1978 war er im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR Oberpfaffenhofen) beschäftigt und wurde ab 1983 in Köln-Porz zum Wissenschaftsastronauten ausgebildet. Er startete am 30.10.1985 mit dem amerikanischen Space-Shuttle Challenger zum 7-tägigen Flug der D1-Spacelab-Mission. 1986 wurde er zum Ordinarius für Raumfahrtssysteme und Direktor des gleichnamigen Instituts der Universität Stuttgart berufen. Von 2000 bis 2004 war Ernst Messerschmid von der Universität Stuttgart beurlaubt, um die Leitung des Europäischen Astronautenzentrums der ESA in Köln-Porz wahrzunehmen.

**PROF. DR.-ING. STEFANOS FASOULAS**

arbeitete nach dem Studium der Luft- und Raumfahrttechnik von 1990 bis 1999 als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Raumfahrtssysteme der Universität Stuttgart, wo er 1995 auch promovierte. Im November 1999 folgte er einem Ruf auf die Professur für Raumfahrtssysteme und Raumfahrtnutzung an die TU Dresden. In 2006 übernahm er hier als geschäftsführender Direktor die Leitung des Instituts für Luft- und Raumfahrttechnik. Im Juli 2010 wechselte er wieder an die Universität Stuttgart, um die Professur für Raumtransporttechnologie am Institut für Raumfahrtssysteme zu übernehmen.

**PROF. DR.-ING. FELIX HUBER**

arbeitete nach dem Studium der Luft- und Raumfahrttechnik von 1993 bis 1999 als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Raumfahrtssysteme der Universität Stuttgart, wo er 1994 auch promovierte. Im selben Zeitraum war er außerdem Projektleiter am Transferzentrum Raumfahrt der Steinbeis-Stiftung für Wirtschaftsförderung, dessen Leitung er 2000 übernahm. Im Februar 2009 folgte er einem Ruf auf die Position des Direktors für Raumflugbetrieb und Astronautentraining im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR Oberpfaffenhofen) in Verbindung mit der Professur „Raumflugbetrieb“ an der Universität der Bundeswehr in Neubiberg.

**Kontakt**

Universität Stuttgart  
Institut für Raumfahrtssysteme  
Astronautik und Raumstationen  
Pfaffenwaldring 29  
D-70569 Stuttgart  
Tel. +49 (0) 711/685-62383  
Fax +49 (0) 711/685-62358  
messerschmid@irs.uni-stuttgart.de  
www.irs.uni-stuttgart.de

kosten zur ISS von 22.000 Dollar pro Kilogramm Nachschubmasse der Aufwand für ein Luftaufbereitungssystem, welches eine Abscheidung von Kohlendioxid und Erzeugung von Sauerstoff ermöglicht, sich sprichwörtlich „bezahlt“ macht. Mit einem zusätzlich installierten Sabatier-Reaktor soll der aus dem alkalischen Elektrolyseur stammende Wasserstoff mit Kohlendioxid zu Methan reagieren, um den Wasserstoff als Wasser wieder zurückzugewinnen. Methan wird als Abfallprodukt zunächst noch in den Weltraum entsorgt, könnte aber zukünftig auch als gut lagerfähiger Treibstoff verwendet werden. Das ACLS soll im Jahr 2016 auf der ISS im Columbus-Modul installiert werden. Kurze Zeit später könnte das ReStWEX nachgeliefert werden.

Insofern könnten die in diesem Experiment erarbeiteten ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen dazu beitragen, den „Traum vom Fliegen“ in eine bislang von der Menschheit nicht erreichten Dimension außerhalb des Wirkungspotentials der Erdgravitation zu ermöglichen. Denn zukünftige Raumschiffe zu fernen Zielen im Sonnensystem, mit teilweise langen Reisezeiten zu Asteroiden, Mars oder dessen Monde, werden nicht ohne regenerative Lebenserhaltungssysteme auskommen. Die Astronauten werden außerdem lernen müssen, vor Ort verfügbare Ressourcen zu nutzen und die Vorräte in den Tanks nachzufüllen.

Die Verbesserung von Lebenserhaltungssystemen, auch Habitat-Forschung bezeichnet, generiert daher – ähnlich der Ökosystemforschung auf der Erde – kollektiv nützliches Wissen, um Zusammenhänge des eigenen Lebensraums zu begreifen und um diese zu beeinflussen. Raumfahrt-Habitat-Technologie kann als Spin-off für die Ökosystem- und Energieforschung auf der Erde verstanden werden. Stoffumsätze laufen im Vergleich zur Erde beschleunigt ab und Einzelphänomene sind den Untersuchungen besser zugänglich. Möglichkeiten und Grenzen bei der Schließung von Stoffkreisläufen in der Raumfahrt zeigen uns den Weg für den Umgang auf der Erde mit begrenzten Ressourcen wie Sauerstoff, Wasser und Nahrung und nötigen uns den Respekt ab vor dem, was die Natur bisher alleine ohne unser Zutun vollbringt, vielleicht nicht für immer. •

Ernst Messerschmid,  
Stefanos Fasoulas, Felix Huber