



Die Integrative Humanphysiologie im

*Von Günter Ruyters*

# Geschöpfe der Schwerkraft

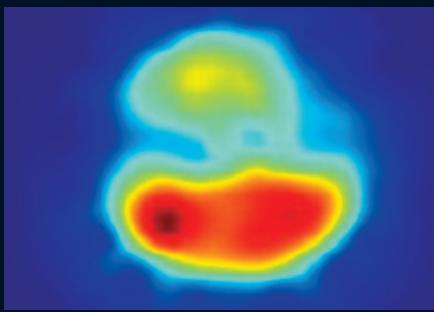
W e l t r a u m   s c h r e i b t   E r f o l g s g e s c h i c h t e n

Was haben Kosmonauten und Astronauten mit älteren Menschen auf der Erde gemeinsam? In der Schwerelosigkeit des Weltraums läuft im Zeitraffer dasselbe ab, was ältere Menschen auf der Erde erleben: Muskelschwund, Osteoporose, Kraftlosigkeit, Rückenbeschwerden und Kreislaufprobleme. An ansonsten gesunden Astronauten können im Zeitraffer Krankheiten und Alterungsprozesse studiert werden. Die strukturelle Organisation und die Funktionen vieler Systeme des menschlichen Körpers werden so erst richtig verstanden.

Die Weltraummedizin – genauer humanphysiologische Forschung unter veränderten Schwerkraftbedingungen – hat in den letzten Jahren zu einer Fülle von wichtigen Erkenntnissen über das Funktionieren der verschiedenen Organ-systeme des Menschen und ihr integratives Zusammenspiel geführt. Nicht selten musste etabliertes Lehrbuchwissen umgeschrieben werden. Zudem: Medizingeräte, die für diese Forschung neu entwickelt wurden, finden mehr und mehr Eingang in den klinischen Alltag oder die ärztliche Praxis – vom All in den Alltag eben.

### Geschöpfe der Gravitation

Der Mensch hat sich mit seiner Physiologie und seinem Verhalten im Zuge der Evolution so optimal an die Schwerkraft angepasst, dass ihr Einfluss häufig gar nicht mehr wahrgenommen wird. Wenn



wir „aufrecht durch das Leben gehen“, wird uns meist nicht bewusst, wie nachhaltig die Schwerkraft auch unsere Sprache und unser Wertesystem geprägt hat. In der Tat sind Schwerkraft und Leben auf unserem Planeten seit etwa vier Milliarden Jahren untrennbar miteinander verwoben. Wir sind Geschöpfe der Gravitation.

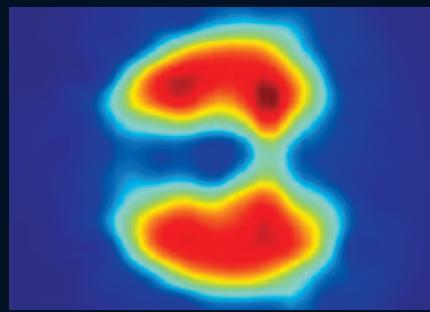
Schon der aufrechte Gang des Menschen, so selbstverständlich er uns auch erscheinen mag, muss als ständiger Kampf gegen die Schwerkraft verstanden werden. Er beansprucht rund zwei Drittel der gesamten Skelettmuskulatur (Gesamt-muskulatur = 40 Prozent des Körpergewichts), dabei überwiegend Rücken-, Hüft- und Beinmuskulatur. Beim Gehen zu ebener Erde werden etwa 90 Prozent der insgesamt aufgewendeten Energie nur für die aufrechte Körperstellung und das Anheben der Beine entgegen der Schwerkraft verbraucht, und nur zehn

Prozent der Gesamtenergie ist notwendig für das Vorwärtsschwingen der Beine, die eigentliche Fortbewegung.

Auch das Herz-Kreislauf- und das Gleichgewichtssystem spielen hierbei natürlich eine Rolle und sind an irdische Schwerkraftverhältnisse zunächst optimal angepasst. Mit zunehmenden Alter des Menschen kommt es jedoch hier wie auch bei den Muskeln und Knochen zu Problemen: Nach dem 40. Lebensjahr setzt ein Schwund der Haltemuskulatur ein. Der Gang wird zunehmend gebeugt, sich zu erheben geschieht häufig unter Zuhilfenahme der Armmuskulatur. Muskel- und Knochenmasse nehmen ab.

### Zeitraffer Schwerelosigkeit

Mit ganz ähnlichen Problemen wie der alternde Mensch haben Astronauten in der Schwerelosigkeit zu kämpfen. Zum Glück



sind diese Veränderungen – im Gegensatz zum Alterungsprozess – reversibel. So können an den Astronauten Krankheiten und Alterungsprozesse wie Muskelschwund, Osteoporose, Herz-Kreislauf-Probleme und Störungen des Gleichgewichtssystems gewissermaßen im Zeitraffer studiert werden. Die strukturelle Organisation und die Funktionen vieler Systeme des menschlichen Körpers, vor allem ihr integratives Zusammenspiel, werden so erst richtig verstanden. Prävention, Diagnose und Rehabilitation von Krankheiten erfahren durch die Weltraummedizin – oder die Weltraumforschung in Integrativer Humanphysiologie, wie Fachleute sagen – neue Anstöße.

Die Integrative Humanphysiologie ist seit Jahren einer der Schwerpunkte des Deutschen Biowissenschaftlichen Raumfahrtprogramms. Was sind nun die herausragenden Ergebnisse der letzten Jahre? Wo ist die klinische Relevanz dieser wissen-

schaftlichen Resultate? Welche neu entwickelten Medizingeräte haben sich im klinischen Alltag bereits erfolgreich durchsetzen können? Eins sei vorweg genommen: Nicht selten muss etabliertes Lehrbuchwissen umgeschrieben werden.

### Salz in unserer Haut – Konsequenzen für die Bluthochdruck-Therapie

So auch nach der Mir'97 Mission. Nach der gängigen Lehrbuchmeinung ging man vor der Mission davon aus, dass Natrium- und Flüssigkeitshaushalt beim Menschen eng aneinander gekoppelt seien. Bei erhöhter Kochsalzzufuhr sammelt der Körper demnach Wasser an. Ergebnisse der Mir'97 Mission hatten bereits Zweifel an der Allgemeingültigkeit dieses Dogmas geweckt.

In ergänzenden Studien am Boden, durchgeführt von der Arbeitsgruppe von Frau Dr. Heer am Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin des DLR in Köln sowie einer Arbeitsgruppe von Prof. Kirsch der Freien Universität Berlin, konnte gezeigt werden, dass es offenbar einen bislang übersehenen körpereigenen Salzspeicher gibt, der Natrium aufnimmt, ohne gleichzeitig Flüssigkeit einzulagern – die Haut.

Versuche, bei denen Probanden im DLR Köln-Porz standardisierte Kost mit unterschiedlichen Kochsalzmengen zu sich nahmen, ergaben eindeutig, dass bei stark erhöhter Salzzufuhr weder die entsprechende Wassermenge eingelagert noch über die Haut und die Ausscheidung entsprechend Salz abgegeben wurde. Die Ergebnisse lassen sich nur so deuten, dass der Organismus Salz speichern kann, ohne gleichzeitig Flüssigkeit einzulagern. Nach neuesten tierexperimentellen Untersuchungen sind dafür spezielle Protein-Kohlenhydrat-Verbindungen, sog. Glucosaminylykane, zuständig, die bei hoher Salzzufuhr in der Haut vermehrt gebildet werden.

Die Ergebnisse sind von besonderer klinischer Relevanz für bestimmte Bluthochdruck-Patienten. Während viele Hypertoniker auf Salz kaum mit Blutdruckanstieg reagieren – das überflüssige Salz wird einfach weggespült –, steigt bei salzsen-sitiven Personen der Blutdruck an. Dies könnte nach den neuen Erkenntnissen darauf zurückzuführen sein, dass aufgrund eines genetischen Defektes die

Fähigkeit zur körpereigenen Salzspeicherung in der Haut fehlt – ein neuer Ansatzpunkt für die Behandlung des Bluthochdrucks.

### Neues Verfahren zum Monitoring der Lungenfunktion

Schon frühere Weltraumexperimente z.B. während der deutschen D-2 Shuttle-Mission haben gezeigt, dass die Annahme, die ungleichmäßige Verteilung der Atmung in der Lunge auf der Erde beruhe nur auf der Schwerkraft, allein nicht stimmen kann. Weitere Faktoren müssen dabei eine Rolle spielen. Ein neuer Ansatz, um dieses Phänomen noch tiefer analysieren zu können, ist die Elektrische Impedanz-Tomographie (EIT).

Die bislang in der Klinik etablierten Verfahren zur Untersuchung der Lungenfunktion weisen gewisse Nachteile auf: Entweder ist es nicht möglich, regionale Unterschiede in der Lungenfunktion zu lokalisieren (z.B. Multiple Inertgas-Technik) oder die Methoden sind mit Strahlenbelastung für den Patienten und/oder hohem apparativen Untersuchungsaufwand verbunden (Computer-Tomographie, Magnetresonanz-Tomographie, Szintigraphie) und können nicht am Krankenbett oder in der Raumfahrtforschung eingesetzt werden.

Unter der Leitung von Prof. Hellige hat sich ein Team der Universität Göttingen unter Weiterentwicklung der Impedanztomographie die elektrischen Eigenschaften von Zellen und Geweben zunutze gemacht. Durch um den Brustkorb platzierte Elektroden werden Ströme eingespeist und resultierende Signale der Zellen erfasst. Anschließend wird nach einer komplizierten Datenverarbeitung auf die regionale Lungenbelüftung geschlossen. Auch das Blut- und Flüssigkeitsvolumen der Lunge und ggf. auch ihre Durchblutung können mit der Methode analysiert werden. Diese „neue Mathematik“ und eine optimierte Messtechnik sind der Schlüssel zum Erfolg der Methode.

Auf Flugzeugparabelflügen des DLR wurde die EIT-Methode bereits erfolgreich angewendet und interessante Ergebnisse über die Funktion der Lunge unter wechselnden Schwerkraftbedingungen gewonnen. Erstmals wurden gravitationsbedingte regionale Veränderungen

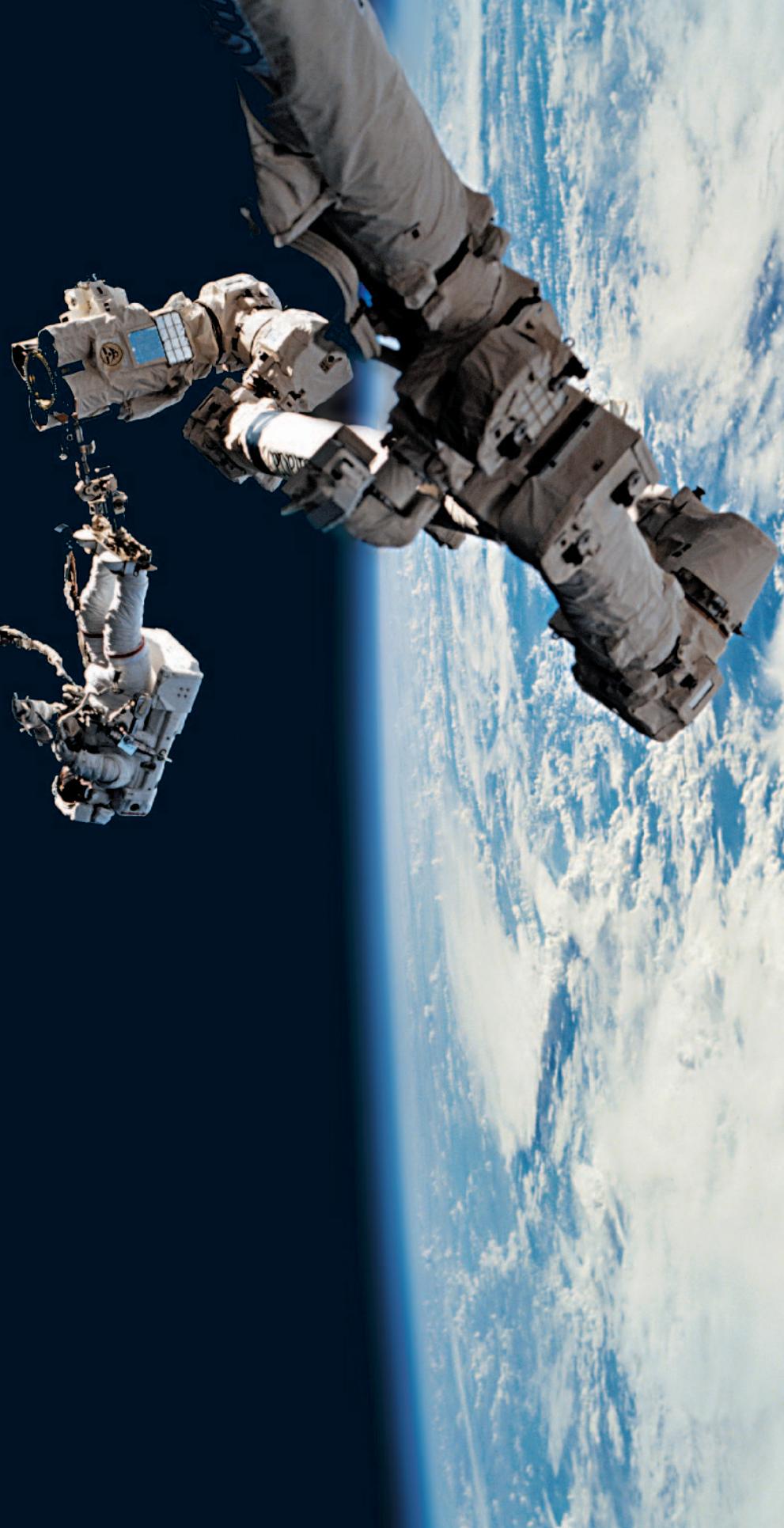


Abb. rechts: Astronaut in der Schwerelosigkeit des Weltraums. (Bild: NASA)

Abb. ganz links: Tomographieaufnahme der Lungenfunktion unter normalen Bedingungen.

Die Schwerkraft führt in Seitenlage zu unterschiedlicher Durchlüftung der Lungenflügel.

Abb. links: Die Tomographieaufnahme der Lungenfunktion in Schwerelosigkeit zeigt trotz Seitenlage eine gleichmäßige Belüftung der Lunge. (Bilder: Prof. Hellige, Universität Göttingen)



der Lungenfunktion und Verschiebungen des Blut- und Flüssigkeitsvolumens im Brustkorb erfasst.

In einer internationalen multizentrischen Anwendungsstudie werden derzeit die Voraussetzungen für eine Übertragung der Methodik in die klinische Praxis geschaffen. Wichtige Anwendungsfelder wären beispielsweise die fortlaufende Überwachung und Therapiesteuerung der künstlichen Beatmung bei frühkindlichem Lungenversagen und beim so genannten ARDS (Adult Respiratory Distress Syndrome) mit dem Ziel, die therapeutischen und pflegerischen Maßnahmen bei diesen schwerstkranken Patienten zu optimieren. In Ergänzung des deutsch-französischen CARDIOLAB – der CNES/DLR Beistellung zu den European Physiology Modules in Columbus – ist auch an einen künftigen Einsatz der EIT-Methode auf der ISS (Internationale Raumstation) gedacht, um die Lungenfunktion der Astronauten in Schwerelosigkeit zu erfassen.

#### **Fit im Alter: das Mars-Missions-Training**

Bettlägerigkeit, Bewegungsarmut, Lähmung, aber auch ein Gipsverband und nicht zuletzt der Aufenthalt in Schwerelosigkeit führen nach relativ kurzer Zeit (etwa ab der zweiten Woche) zum Muskelabbau, da die Muskeln unter diesen Bedingungen nicht oder nur wenig aktiviert werden können. Die Folge des Muskelkraftverlustes ist zwangsläufig der Abbau des Knochens, da dieser nicht mehr das entscheidende Signal zur Anregung des Knochenstoffwechsels erhält, nämlich die durch den Muskel hervorgerufene Verformung. Eine Vielzahl von Trainingsmethoden wurde in den letzten Jahren bei Astronauten und kranken Menschen getestet und angewendet – alle mit mehr oder weniger mäßigem Erfolg.

Ein Trainingsgerät verspricht nun mehr Erfolg: Das „Galileo Space“-Trainingsgerät wurde in der Berliner Bettliegestudie 2003/ 2004 an 20 Probanden getestet, die acht Wochen lang im Klinikbett ausharren mussten. Nach Angaben des Arbeitsgruppen-Leiters, Prof. Felsenberg, verloren die Probanden, die als Training im Liegen für einige Minuten pro Tag gegen eine vibrierende Platte drücken mussten, nur etwa zehn Prozent ihrer

Abb. oben: Das Leben auf der Raumstation erfordert körperliche Fitness und hartes Training gegen den Muskel- und Knochenschwund. (Bild: NASA)

Abb. rechts: Trainer und Aktiver im Trainingsinstitut Prof. Dr. Baum GmbH in Köln.

Abb. ganz rechts: Bildungs- und Forschungsministerin Edelgard Buhlmann beim Testen des Eye-Tracking-Device (ETD) am Tag der Raumfahrt 2004 in Köln-Porz.

Muskelleistung und 0,5 Prozent ihrer Knochendichte. Hingegen büßten Testkandidaten ohne Training 40 Prozent Muskelkraft und 4,5 Prozent Knochendichte ein. Weitere Studien prüfen derzeit den Einsatz des Geräts für alte und kranke Menschen. Nicht zuletzt durch diese Studie ist klar geworden: Jede Osteoporotherapie muss gerade auch im Alter mit Muskeltraining begleitet werden.

Daneben hat ein Team der Charite-Universitätsmedizin unter der Leitung von Prof. Blottner in diesen Studien erfolgreich versucht, bestimmte Muskelmoleküle, so genannte NO-Synthasen, als funktionelle Marker der Muskelaktivität zu etablieren. Ziel ist die Entwicklung eines zellulären Monitorsystems, mit dem die Reaktion verschiedener Muskeln auf Training oder Reha-Maßnahmen im Welt Raum wie auf der Erde und damit ihre Wirksamkeit verfolgt werden kann.

#### Kosmonautentraining für Senioren?

Um Symptome wie Kreislaufproblemen, Rückenbeschwerden und Kraftlosigkeit bei Senioren entgegen zu wirken, wurde – beruhend auf Erkenntnissen aus Raumfahrtexperimenten, ein neuartiges Fitnesskonzept für Menschen ab 50 entwickelt.

Ein Team der Deutschen Sporthochschule (DSHS) Köln arbeitet seit rund zehn Jahren in der bemannten Weltraumforschung.

Die Erhaltung der Gesundheit und vor allem der körperlichen Leistungsfähigkeit von Astronauten und Kosmonauten ist das zentrale Thema dieser Forschung. Die auf verschiedenen Missionen mit dem amerikanischen Shuttle und der russischen Raumstation Mir sowie zahlreichen begleitenden terrestrischen Studien gewonnenen Erkenntnisse lassen sich nach Meinung von Prof. Baum, dem Leiter der Projektgruppe, ohne weiteres auf den Menschen auf der Erde übertragen. So helfen spezielle Übungen gegen den im Alter verbreiteten Muskel- und Knochenschwund und erhalten die Mobilität der älteren Menschen. Inzwischen hat sich die Prof. Klaus Baum GmbH als eigenständige Firma gegründet, nicht zuletzt um das neue Trainingskonzept zu vermarkten. Die bisherigen Erfolge geben dem Konzept Recht.

#### Neue Diagnosemethoden für Gleichgewichtsstörungen und das Schielen

Seit vielen Jahren befasst sich das Team der Professoren Scherer und Clarke der Charite-Universitätsmedizin in Berlin mit der Erforschung des menschlichen Gleichgewichtssystems und seinen Störungen auf der Erde sowie bei Astronauten in Schwerelosigkeit. Im Rahmen ihres Ansatzes, bei dem das Gleichgewichtssystem über die Messung der „kompensatorischen“ Augenbewegungen analysiert wird, wurden mehrere Generationen von Diagnoseapparaturen entwickelt und z.B. auf der russischen Mir-Station sowie zu Forschungszwecken in Universitätskliniken genutzt.

Die neueste Entwicklung, das so genannte 3D Eye-Tracking-Device (ETD) wurde in verschiedenen Flugzeugparabel-Kampagnen des DLR getestet und verwendet

Bestätigung dieser ersten Befunde durch die derzeit auf der ISS laufenden Messungen hätte Konsequenzen für das gesamte Verständnis unserer Sinnessysteme und für die Differenzierung von Krankheitsbildern in der Klinik.

Inzwischen wird das ETD in verschiedenen kommerziellen Ausgestaltungen von zwei Firmenausgründungen in Berlin erfolgreich vermarktet. Die Anwendungsbereiche sind höchst unterschiedlich und reichen von der Feststellung der Müdigkeit von LKW- und Busfahrern, über die Verlaufskontrolle bei der Laser-Hornhautabtragung zur Behandlung von Kurzsichtigkeit und zur Diagnose einer Vielzahl von neurologischen Erkrankungen, z.B. auch von Schwindel bis hin zur Verfolgung der Kopf- und Augenbewegung von Probanden, während sie Werbung schauen (Werbewirkungsforschung).



sowie im Frühjahr 2004 im Rahmen der holländischen Taximission zur ISS gebracht. Derzeit erfolgen weitere Messungen an den Langzeitcrews auf der ISS.

Erste Auswertungen zeigen, dass sich die so genannte Listingsche Ebene, ein internes Koordinatensystem für das visuelle System, in Abhängigkeit von den Schwerkraftbedingungen ändert, was sich zuvor bereits in Parabelflugexperimenten ange deutet hatte. Die Konsequenzen für die Raumorientierung der Astronauten sowie für den Menschen auf der Erde sind noch gar nicht absehbar. Offenbar wird nicht nur das Gleichgewichtssystem, sondern auch die allgemeine Steuerung der Augenbewegungen – das so genannte okulomotorische System – durch den Wegfall der Schwerkraft verändert. Die durch die so genannten Otolithenorgane vermittelte Schwerkraft würde danach eine zentrale Bezugsgröße für das gesamte sensorisch-motorische System darstellen. Eine

#### Für die Zukunft gut gerüstet

Überraschende, ja Bahn brechende Forschungsergebnisse, innovative Medizingeräte – die Integrative Humanphysiologie im Weltraum schreibt Erfolgsgeschichten, und deutsche Wissenschaftler und Firmen sind in vorderster Front mit dabei. Die Nutzung der Internationalen Raumstation ISS wird diese Erfolgsgeschichten weiter schreiben – vorausgesetzt, das Deutsche Raumfahrtprogramm liefert die notwendige finanzielle Unterstützung für diese Nutzung. Infrastruktur und Experimentieranlagen sowie herausragende Wissenschaftler und Ingenieure sind in Deutschland jedenfalls vorhanden.

---

Prof. Dr. Günter Ruyters ist Programmleiter für Forschung unter Weltraumbedingungen/Biowissenschaften in Bonn. ▲