SITZUNGSBERICHTE DER LEIBNIZ-SOZIETÄT

Band 96 • Jahrgang 2008

trafo Verlag Berlin ISSN 0947-5850 ISBN 978-3-89626-756-6

Inhalt

01 Heinz Kautzleben: Vorwort zum vorliegenden Band

02 Dieter B. Herrmann: Meilensterne der Weltraumforschung

03 Claus Grote: Grußworte

Ehrung für Sigmund Jähn durch die Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V.

04 Klaus-Dietrich Berge: Geschichte der westeuropäischen Trägerraketen bis zur Gegenwart

05 *Hans Joachim Haubold, Heinz Kautzleben:* Weltraumaktivitäten der Vereinten Nationen. Space Applications. Basic Space Science. Das Internationale Heliophysikalische Jahr 2007

06 *Marcus Schladebach:* 50 Jahre Weltraumrecht: Entwicklungsstand und Perspektiven

07 Reinhard Rummel: Fünfzig Jahre Sputnik und fünfzig Jahre Vermessung des Gravitationsfelds der Erde mit Satelliten

08 *Dietrich Spänkuch:* Fernerkundung der Erde - Hiobsbotschaften aus dem All

09 *Olaf Hellmuth:* Microphysical Interactions between Cosmic Galactic Rays and Clouds: "Missing Link" in the Climate Discussion? Hypotheses, Indications and the Difficulties of Enquiry. Part I: The IPCC 2007 perspective

10 *Sigmund Jähn:* Deutsche Beiträge zur bemannten Raumfahrt. Erinnerungen an Hermann Oberth

11 *Winfried Papenfuβ:* Der Beitrag des Instituts für Luftfahrtmedizin Königsbrück zur raumfahrtmedizinischen Forschung

- 12 Maria von Schönermark, Hans Peter Röser, René Laufer: 50 Jahre Raumfahrt - vom Sputnik zum universitären Kleinsatelliten
- 13 Jörg Albertz, Stephan Gehrke, Hartmut Lehmann: Topographische Karten der Mars-Oberfläche
- 14 Ruth Titz-Weider, Heike Rauer et. al.: Auf der Suche nach Planeten um andere Sonnen
- 15 *Heinz Kautzleben:* Das Koordinierungskomitee Interkosmos (1967-1990) Claus Grote, Mitglied der Leibniz-Sozietät, zu seinem 80. Geburtstag Beteiligung der DDR an der Erforschung und Nutzung des Weltraumes für friedliche Zwecke
- 16 *Horst Montag:* Referenzsysteme für globale Vermessungen und geodynamische Untersuchungen mittels geodätischer Raummethoden
- 17 Thomas von Larcher, Birgit Futterer, Christoph Egbers: The GeoFlow-Experiment on International Space Station (ISS): Research on Thermal Convective Flows in a Spherical Gap under influence of a Central Force Field
- 18 Fritz Gehlhar: 50 Jahre Raumfahrt 104 Jahre Raumfahrtwissenschaft
- 19 Andreas Drexler: Raumfahrt braucht gesellschaftliches Engagement Ein Porträt des Vereins zur Förderung der Raumfahrt e.V.
- 20 *Heinz Kautzleben:* Die Verkehrstechnologie Raumfahrt in Wissenschaft und Gesellschaft
- 21 Heinz Kautzleben: Zum 50. Jahrestag des Startes von "Explorer-1"

Heinz Kautzleben

Vorwort zum vorliegenden Band

Das Kolloquium "50 Jahre Weltraumforschung. Erforschung und Überwachung der Erde und des Weltraumes gestützt auf die Mittel der Raumfahrt" am 29. September 2007 war eine akademiespezifische Wortmeldung der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V. zum großen Jubiläum der Weltraumforschung. Das Projekt wurde vom Wissenschaftssenator des Landes Berlin gefördert, dem hierfür besonderer Dank gebührt. Mitveranstalter des Kolloquiums waren die Archenhold-Sternwarte im Deutschen Technik-Museum Berlin und der Fachausschuss "Geschichte der Raumfahrt" in der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt.

Das Kolloquium fand statt am Vorabend des Tages, an dem fünfzig Jahre zuvor durch die Raketentruppen der UdSSR mit "Sputnik 1" der erste künstliche Erdsatellit der Menschheit gestartet wurde. Die USA zogen am 1. Februar 1958 mit dem Start von "Explorer 1", dem ersten eigentlichen Forschungssatelliten, durch die US Army nach. Geordnete Bahnen erhielt der dadurch eröffnete Wettlauf in den Weltraum mit dem Weltraumvertrag, der am 10. Oktober 1967 in Kraft trat. Eine weitere außerordentlich bedeutsame Leistung, deren Jubiläum es im Kolloquium zu würdigen galt. Im Kolloquium wurde schließlich auch daran erinnert, dass am 17. August 1967 der Ministerrat der DDR die Beteiligung der DDR an der Erforschung und Nutzung des Kosmos zu friedlichen Zwecken im Rahmen der Zusammenarbeit der sozialistischen Länder beschloss und damit die Mitwirkung im Programm "Interkosmos" einläutete. Claus Grote, Mitglied der Leibniz-Sozietät, der seinen 80. Geburtstag am 8. August 2007 begehen konnte, wirkte bei diesen Arbeiten an führender Stelle von 1974 bis 1990. Das Kolloquium war ein willkommener Anlass, ihm hierfür Dank zu sagen.

Wenn auch die Jubiläen der Anlass zum Kolloquium waren, so standen im Mittelpunkt viel mehr die wissenschaftlichen Vorträge, Poster und schriftlichen Vorlagen zu aktuellen Vorgängen im Gebiet der Weltraumforschung. Im vorliegenden Band der "Sitzungsberichte" sind die Manuskripte enthalten, die von den Mitwirkenden am Kolloquium in einer druckfähigen Form bis zum Einsendeschluss 31. Dezember 2007 übergeben werden konnten.

Meilensterne der Weltraumforschung Begrüssung des Präsidenten, Dieter B. Herrmann

Meine sehr verehrten Damen und Herren,

ich heiße Sie alle herzlich willkommen zum heutigen Kolloquium der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin "50 Jahre Weltraumforschung. Erforschung und Überwachung der Erde und des Weltraumes gestützt auf die Mittel der Raumfahrt".

Wir führen dieses Kolloquium gemeinsam mit der Archenhold-Sternwarte und dem Fachausschuss "Geschichte der Raumfahrt" in der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt durch.

Ich freue mich besonders, dass heute zahlreiche Zeitzeugen unter uns sind, die unmittelbar an der Entwicklung der Weltraumforschung beteiligt waren, darunter besonders unsere Referenten und auch mehrere Mitglieder der Leibniz-Sozietät. Es fügt sich gut, dass dieses Kolloquium etwa um die Zeit des 80. Geburtstages unseres Mitgliedes Claus Grote stattfindet, der seit 1974 in verantwortlichen Funktionen die Weltraumforschung der DDR mit entwickelt hat und der dieser Bilanz, die wir zugleich mit einem Blick auf die aktuellen und künftigen Forschungen verbinden, bestimmt großes Interesse entgegenbringen würde. Wir bedauern, dass er heute aus gesundheitlichen Gründen nicht anwesend sein kann.

Meine Damen und Herren.

der Start des 1. Sputnik am 4. Oktober 2007 vor fünfzig Jahren stellte die Verwirklichung einer wissenschaftlich-technischen Utopie dar. Mit diesem Datum begann die Ära der praktischen Raumfahrt, die hier nur aus der "Vogelperspektive" beleuchtet werden kann.

Aus den ersten weltweit beachteten Starts von Raumflugkörpern ist inzwischen das Alltagsgeschäft einer Hochtechnologie geworden, die weltweit operiert und längst in das tägliche Leben eines jeden Einzelnen von uns eingegriffen hat. Die meisten Starts, die heute routinemäßig erfolgen und keineswegs mehr auf Russland und die USA beschränkt sind, werden überhaupt nicht mehr öffentlich zur Kenntnis genommen. Das wäre auch gar nicht

8 Dieter B. Herrmann

möglich, denn vom 4. Oktober 1957 bis zum September 2006, also in rd. 49 Jahren, erfolgten insgesamt 8220 Starts von Weltraumraketen, die Satelliten, Raumsonden oder Menschen und technische Apparaturen in eine Erdumlaufbahn beförderten oder hinausschossen ins All.

Von Anbeginn verliefen die Entwicklung der Raumfahrt und die Entwicklung der "Space Research" parallel, denn es waren stets wissenschaftliche Ziele, die mit den einzelnen Unternehmen verfolgt wurden, wenn man von den militärisch orientierten Projekten einmal absieht. Selbst diese haben allerdings in verschiedener Hinsicht, z.B. im Zusammenhang mit der Fernerkundung der Erde, wissenschaftlich verwendbare Innovationen gefördert.

Obwohl die Idee der Raumfahrt und damit im Zusammenhang auch die Aussichten auf eine qualitativ völlig neuartige Erforschung der Erde, des erdnahen Raumes und der Körper des Sonnensystems bei den Pionieren von Ziolkowski über Zander, Oberth, Goddard, v. Braun und Koroljow immer lebendig geblieben war, ist das Trägermittel der Raumfahrt, die Rakete, in erster Linie aus militärischen Gründen entwickelt worden. Goddard in den USA entwickelte Panzerabwehrraketen, in Deutschland wurde unter Hitler die berüchtigte "Vergeltungswaffenproduktion" forciert und in Russland reicht die Entwicklung von Kampfraketen bis in das 19. Jahrhundert zurück. Auch nach dem Ende des II. Weltkrieges und insbesondere nach dem Abwurf der amerikanischen Atombomben auf Hiroshima und Nagasaki vollzog sich die Raketenentwicklung in beiden Supermächten, der Sowjetunion und den USA, stark unter militärischen Gesichtspunkten. Flugabwehrraketen und interkontinentale Raketen, die vor allem zum Transport von Waffen gedacht waren, erfuhren die Unterstützung der Militärs. Technisch wurden damit jedoch zugleich die Grundlagen für die Raumfahrt geschaffen und man rückte dem Traum immer näher, wissenschaftliche Instrumente in große Höhen der Atmosphäre oder in die Erdumlaufbahn und vielleicht sogar in die Tiefen des Sonnensystems zu bringen.

Man wollte die Welt bewegen mit der Verwirklichung eines uralten Traums, aber alle Beteiligten – in der UdSSR und in den USA – wussten sehr wohl, dass der Erste im All zugleich ein Symbol seiner militärischen Überlegenheit an den Himmel schreiben würde.

Auf der anderen Seite gab es inmitten des Kalten Krieges auch Tendenzen einer systemübergreifenden internationalen Zusammenarbeit. Ein hoffnungsvoller Ausdruck dieser Bestrebungen war das "Internationale Geophysikalische Jahr 1957/58" (IGJ), das den Zeitraum vom 1. Juli 1957 bis zum 31. Dezember 1958 umfassen sollte. Das Ziel waren weltweite Forschungen auf

allen Gebieten der Geophysik, aber auch der Sonnenfleckenforschung, der Physik der Ionosphäre und der Kosmischen Strahlung.

Die bereits erreichten Fortschritte auf dem Gebiet der Raketentechnik legten es nahe, auch den angrenzenden Weltraum in die Untersuchungen mit einzubeziehen. Die USA ließen am 29. Juli 1955 durch einen Sprecher des Weißen Hauses erklären, dass sie als ihren besonderen Beitrag zum IGJ einen künstlichen Erdsatelliten starten wollten. Die Sowjetunion bekundete nur vier Tage später dieselbe Absicht. Es war also das Unternehmen des Geophysikalischen Jahres und damit von der Zielstellung her ein nationenübergreifendes wissenschaftliches Unterfangen, das eine faktische Beschleunigung der entsprechenden technischen Entwicklungen bewirkte.

Der Start des ersten Sputnik am 4. Oktober 1957 kam dennoch für viele überraschend, unerwartet und löste in den USA den bekannten "Sputnik-Schock" aus, weil man dort nicht damit gerechnet hatte, dass die UdSSR es noch vor den USA schaffen würde, das erklärte Ziel zu erreichen.

Von diesem Moment an forcierte die erbitterte Rivalität der beiden Großmächte das Tempo der Entwicklung noch stärker und zwar – trotz der dominierenden wissenschaftlichen Zielsetzungen – stark unter dem Gesichtspunkt des Prestiges und der Demonstration militärischer Überlegenheit. Der Wettlauf um den Kosmos stand symbolisch für die Systemauseinandersetzung, wobei man sich auf beiden Seiten sicher sein konnte, dass dies auch von Millionen von Menschen auf der ganzen Welt so wahrgenommen wurde.

Für das planvolle Vorgehen der Sowjetunion spricht die Tatsache, dass es ihr über mehr als anderthalb Jahrzehnte gelang, durch bravouröse Erstleistungen fast alle Felder der künftigen Weltraumtechnik und -forschung zu besetzen und auch danach noch längere Zeit auf dem Gebiet der bemannten Raumfahrt und der damit verbundenen vielfältigen Forschungsarbeiten die Spitze zu behaupten.

Neuere Forschungen und die Auswertung bis vor kurzem unzugänglicher Dokumente lassen erkennen, dass diese Entwicklung in der UdSSR keinesfalls widerspruchsfrei und ohne große Reibungsverluste verlief.

Wenn nun aber der SPIEGEL in der Titelgeschichte seiner neuesten Ausgabe (Nr. 39, v. 24.9.2007, S. 178–195) die Erfolge der sowjetischen Raumfahrt so darstellt, als seien sie lediglich auf eine Reihe unwahrscheinlicher Zufälle zurückzuführen gewesen, so zeugt das entweder davon, dass die Autoren den Sputnik-Schock bis heute noch nicht überwunden haben oder es muss als Beleg einer wirklichkeitsfremden Sicht auf die Wissenschafts- und Technikgeschichte gesehen werden. Selbstverständlich ist die Evolution von

10 Dieter B. Herrmann

Wissenschaft und Technik ohne Zufälle nicht vorstellbar, selbstverständlich stimmen historische und logische Entwicklung niemals überein. Die Frage ist nur, ob jeweils die technische und intellektuelle Basis vorhanden ist, um solche zufälligen Umstände zielgerichtet zu nutzen. Das war offensichtlich in der Sowjetunion der Fall.

In Deutschland herrschte auf dem Gebiet von Raumfahrt und aller damit verbundenen oder auf sie gestützten Forschungsaktivitäten vor dem Hintergrund alliierter Bestimmungen nach dem II. Weltkrieg damals praktisch der Zustand "Null". Auch das muss man sich ins Gedächtnis rufen, wenn man die zwar zeitlich verzögerte, aber dann doch rasante Entwicklung auf diesem Gebiet, die recht bald in den beiden damals bestehenden deutschen Staaten einsetzte, richtig würdigen will. Auf unserem Kolloquium wird darüber für beide Seiten aus berufenem Munde berichtet werden.

Folgende zeitlich dicht aufeinander folgende Aktivitäten der sowjetischen Raumfahrt nach dem Start des ersten Sputnik sicherten ihr den Ruf, technologisch führend zu sein und widerlegen zugleich die These von der Zufälligkeit dieser Führungsrolle:

- Am 2. November 1957 brachte die UdSSR mit der Hündin Laika zum erstenmal ein Lebewesen ins All.
- Die ersten Lebewesen, die lebend wieder zur Erde zurückgeführt wurden, die Hunde Strelka und Belka, flogen am 19. August 1960 in die Erdumlaufbahn und landeten am 20. August nach 18 Erdumkreisungen weich auf der Erde.
- Am 13. April 1961 flog mit dem Kosmonauten Juri Gagarin an Bord von Wostok 1 zum ersten Mal ein Mensch in die Erdumlaufbahn und kehrte wohlbehalten zur Erde zurück. Damit begann die Phase der bemannten Raumfahrt.
- Im ersten Doppelflug der beiden Kosmonauten Nikolajew und Popowitsch (Wostok 3 und 4) am 11. und 12. August 1962 wurde erstmals die Möglichkeit eines Rendezvous-Manövers erprobt, als sich die beiden Raumschiffe der Kosmonauten bis auf 6 km einander näherten.
- Am 16. Juni 1963 flog mit Valentina Tereschkova die erste Frau ins All.
- Am 12. Oktober 1964 flogen erstmals drei Astronauten (Komarow, Jegorow, Feoktistow) ohne Raumanzüge in den Erdorbit, darunter ein Arzt und ein Ingenieur, d.h. die ersten Wissenschaftsastronauten.
- Am 18. März 1965 erfolgte mit dem Start von Woschod 2 das erste Unternehmen, in dessen Verlauf sich ein Kosmonaut (Alexej Leonov) erstmals für 12 Minuten außerhalb seines Raumschiffes freischwebend in der Erdumlaufbahn bewegte.

• 1986 startete die erste dauerhaft bemannte Raumstation Mir, die bis 2001 in Betrieb gewesen ist.

Auch beim Vorstoß in größere Distanzen jenseits des Erdorbits lag die UdS-SR viele Jahre vorn:

- Am 2. Januar 1959 startete mit Lunik 1 die erste Sonde zum Mond.
- Die am 12. September 1959 gestartete Sonde Lunik 2 landete erstmals hart auf dem Erdtrabanten.
- Die erste weiche Landung auf dem Mond erfolgte am 3. Februar 1966.
- Die am 4. Oktober 1959 gestartete Sonde Lunik 3 lieferte erstmals Bilder von der bis dahin unbekannten Rückseite des Mondes.
- Mit Venera 3 startete am 16. November 1965 erstmals eine Sonde zum Planeten Venus und landete auf dessen Oberfläche.
- Die erste Landung einer Sonde auf dem Planeten Mars startete am 29. Mai 1971.
- Mit Luna 16 gelang im September 1970 zum ersten Mal die automatische Rückkehr einer Sonde von einem anderen Himmelskörper und die Rückführung von Mondbodenproben.
- Im November 1970 wurde mit Lunochod 1 das erste Fahrzeug auf den Mond gebracht.
- Am 19. April 1971 startete die erste Raumstation Saljut 1, der bis 1991 noch sechs weitere folgten und schließlich errichtete die UdSSR mit MIR die erste Langzeitstation, die von 1986 bis 2001 im Erdorbit aktiv war und zahlreiche Mannschaften aus verschiedenen Ländern empfing.

Schon unmittelbar nach dem Start von Sputnik 1 hatten die USA erkannt, dass sie zur Koordinierung ihrer Raumfahrtentwicklung eine straffe zentrale Organisation brauchten. Deshalb wurde bereits am 1. Oktober 1958 die NASA gegründet, die alle Projekte der zivilen und damit auch der wissenschaftlich orientierten Raumfahrt führen sollte. Nach dem Start von Juri Gagarin setzten die USA auf einen besonders öffentlichkeitswirksamen spektakulären Paukenschlag in der Raumfahrt: der ersten Landung von Menschen auf dem Mond und deren wohlbehaltene Rückführung zur Erde. Der damalige Präsident, John F. Kennedy, proklamierte dieses "nationale Ziel" bereits 6 Wochen nach dem Flug von Gagarin Noch vor Ablauf des sechsten Jahrzehnts des 20. Jahrhunderts sollte die bemannte Mondlandung erfolgen.

Das sog. Apollo-Programm, in dessen Verlauf die Mondlandungen vorgesehen waren, begann mit unbemannten und bemannten Tests in der Erdumlaufbahn und erreichte schließlich das angestrebte Ziel mit der Landung der Mondfähre Eagle am 20. Juli 1969 und dem Ausstieg von Neil Armstrong

12 Dieter B. Herrmann

und Edwin Aldrin am 21. Juli. Der Rückstart erfolgte rd. 24 Stunden nach der Landung und die Wasserung im Pazifik am 24. Juli 1969.

Bis zum Jahre 1972 folgten noch sechs weitere bemannte Mondflüge mit umfangreichen wissenschaftlichen Experimenten und der Rückführung von insgesamt 391 kg Mondmaterial. Das Programm endete mit Apollo 17 im Dezember 1972.

Nach den Erfolgen der UdSSR auf dem Gebiet der bemannten Raumfahrt im erdnahen Raum, wendeten sich auch die USA dem Aufbau von Raumstationen zu. Sie starteten 1973 die Station Skylab, die jedoch nur von Mai 1973 bis Februar 1974 bemannt war und 1979 zum Absturz gebracht werden musste. So blieb die UdSSR mit die Langzeitstation MIR ab 1986 weiter führend auf diesem Gebiet. Die USA entwickelten inzwischen jedoch einen wiederverwendbaren Raumtransporter, das sog. Space Shuttle, das nach zahlreichen Vorversuchen und Fehlschlägen in Gestalt der Discovery im August 1983 zum ersten Mal zum Einsatz kam, während die Sowjetunion und Russland mit dem nicht wieder verwendbaren Transporter Progress ein unverwüstliches Modul zum Transport von Versorgungsgütern und mit Sojus einen Zubringer für Menschen in die Erdumlaufbahn verwenden, die bis heute ihre hohe Zuverlässigkeit unter Beweis stellen.

Ein großes Forschungsfeld eröffneten die beiden Raumfahrt-Supermächte mit der Erkundung der Körper des Sonnensystems. Während die UdSSR sich vor allem auf Venus und Mars konzentrierte, erreichte sie bei der Erforschung der Venus zunächst eine klare Führungsrolle, die dazu führte, dass Venus bald als ein vergleichsweise gut erforschter Planet galt. Die USA vollendeten mit ihrer Magellan-Sonde die von der UdSSR begonnene Radarkartierung.

Mit ihren Mars-Sonden war die UdSSR jedoch vom Pech verfolgt und stellte die entsprechenden Aktivitäten nach 1996 vollständig ein. Die USA erlangten, z.T. gemeinsam mit Westeuropa, große Erfolge bei der Erkundung des Mars, zuerst bereits mit den Sonden Viking 1 und 2, die 1976 auf dem Mars landeten und vor Ort Untersuchungen durchführten. Auch gegenwärtig laufen mehrere erfolgreiche Marsaktivitäten. So gelang es z.B. 1997 im Rahmen der Pathfinder-Mission den ersten Rover auf einem anderen Planeten abzusetzen. Erst vor wenigen Wochen wurde der NASA-Marslander Phoenix gestartet, der im Mai 2008 auf dem Planeten aufsetzen soll, um dort Untersuchungen einer vermutlich vereisten Region bis zu 1 m Tiefe durchzuführen.

An der Erforschung des äußeren Sonnensystems hat sich die UdSSR von Anfang an nicht beteiligt. Einige wenige Beispiele mögen die US-amerikanischen Pionierleistungen auf diesem Gebiet in Erinnerung rufen:

- Die ersten erfolgreichen Vorbeiflüge an den Planeten Venus und Merkur mit Mariner 2 (1962) und Mariner 10 (1974);
- die ersten Erkundungen der Planeten Jupiter und Saturn mit Pioneer 10 und Pioneer 11 (1973 und 1979) sowie die mit qualitativ erheblich verbesserter Bildübertragungstechnik versehenen Sonden Voyager 1 und Voyager 2 (1977), die auch die großen Satelliten der beiden Riesenplaneten detailliert fotografierte, wobei Voyager 2 außerdem die Planeten Uranus (1986) und Neptun (1989) erstmals erkundete.
- Auch Asteroiden und Kometenkerne wurden erstmals durch US-Sonden aus unmittelbarer N\u00e4he untersucht. So u.a. der Asteroid Gaspra mit der Sonde Galileo (1991). Die Sonde "Deep Impakt" erreichte 2005 den Kometen Tempel 1 und schlug ein St\u00fcck seines Materials heraus, das dadurch genau untersucht werden konnte.

Die raumfahrtgestützte Erforschung des Weltraums hat auch zu einer unmittelbaren Ausweitung der Möglichkeiten klassischer astronomischer Teleskopastronomie geführt. Während bis zum Start von Sputnik 1 – abgesehen von einigen Experimenten mithilfe von Ballonen und Raketen – nur zwei Fenster des elektromagnetischen Spektrums als Informationsträger über kosmische Objekte zugänglich waren, nämlich das optische und das Radiofenster, entwickelte sich dank der Raumfahrt die Allwellenastronomie. Die Stationierung großer Teleskope im Erdorbit, allen voran das Hubble Space Telescope, aber auch anderer Spezialteleskope für nichtoptische Wellenlängen, haben die Effizienz astronomischer Beobachtungen auch dadurch gesteigert, dass der Wechsel von Tag und Nacht sowie die Witterungsbedingungen nun keine Rolle mehr spielen.

Während die bildgebenden Teleskope Hubble sowie das Spitzer-Infrarot-Teskop und das deutsche Röntgenteleskop ROSAT u.a. durchgreifende Fortschritte auf den Gebieten der Stellarastronomie und der extragalaktischen Forschung erzielten, brachte der Satellit der Europäischen Weltraumagentur ESA, HIPPARCOS, eine Renaissance der klassischen astrometrischen Forschung. Ein Gebiet der klassischen Astronomie, das mit erdgebundenen Beobachtungsmethoden längst ausgereizt schien, wurde durch diesen Satelliten nicht nur erneut belebt, sondern lieferte Sternpositionen und -parallaxen in nie zuvor dagewesener Fülle und Genauigkeit.

All diese Beispiele, ohne den Anspruch auf Vollständigkeit, lassen erkennen, dass die Meilensteine der Raumfahrt wesentlich auch Meilensteine der Weltraumforschung (Space Research), gewesen sind, jener wissenschaftlichen Forschungen also, die sowohl die Erde und den erdnahen Raum, als

14 Dieter B. Herrmann

auch das Sonnensystem und die Tiefen des Weltalls betreffen, die aber nicht möglich gewesen wären, ohne dass man sich auf die Mittel der Raumfahrt hätte stützen können.

Diese Entwicklung begann bereits mit den ersten künstlichen Erdsatelliten. Sowohl die USA wie auch die UdSSR hatte in ihren Ankündigungen über den Start von Satelliten im Rahmen des Geophysikalischen Jahres den Gedanken betont, dass dadurch Wissenschaftlern aus aller Welt für ihre Forschungsvorhaben völlig neue Möglichkeiten eröffnet würden. Jenseits der Bedeutung im Rahmen der Systemkonkurrenz, die in den tagespolitischen Kommentaren damals dominierte, wurde durch die ersten Starts bereits eine völlig neue Epoche der wissenschaftlichen Forschung begonnen.

Schon Sputnik 1 verfügte über einfache Meßapparaten an Bord, mit denen Dichte und Temperatur der Atmosphäre sowie die Ionenkonzentration in der Ionosphäre gemessen werden konnten. Aus den weltweit erfolgenden optischen und Radiobeobachtungen konnte man ableiten, dass die Erdatmosphäre selbst in jener großen Höhe noch wesentlich dichter war als bis dahin allgemein angenommen. Die Daten über die Elektronenkonzentration in knapp 1000 km Höhe ließen interessante künftige Ergebnisse erwarten. Schon der erste US-amerikanische Satellit Explorer 1 (Februar 1958) führte dann nach Einbeziehung der Daten von Sputnik 1 und Explorer 3 zur Entdeckung des van-Allan-Strahlengürtels.. Auch Andeutungen eines Zusammenhanges dieses Gürtels mit der Sonnenaktivität waren bereits zu erkennen. Alle diese Fragen wurden durch spätere Satelliten mit wesentlich verbesserter instrumenteller Technik präziser untersucht.

Gleichgültig, ob wir heute eine wissenschaftliche Monographie über die Erdatmosphäre, die Klimaforschung, das ökologische System des Planeten Erde und die Umweltforschung oder die solar-terrestrischen Beziehungen aufschlagen, – die Inhalte sind dominiert von den Forschungen, die mit den Hilfsmitteln der Raumfahrt in den vergangenen 50 Jahren durchgeführt werden konnten. Physikalische Experimente unter weitgehender Ausschaltung der Gravitation, Weltraummedizin, Satellitengeodäsie (und damit die Möglichkeit mit tausendfacher Genauigkeitssteigerung Veränderungen der Erdoberfläche zu erfassen), – das alles sind Themen und Disziplinen, die es vor dem 4. Oktober 1957 nicht gegeben hat.

Dasselbe gilt von jeder Darstellung über die Objekte unseres Sonnensystems im Rahmen der vergleichenden Planetologie und es gilt auch mit Blick auf die galaktischen und kosmologisch interessanten Objekte. 50 Jahre

Raumfahrt haben also eine weltweite Revolution in der wissenschaftlichen Forschung herbeigeführt.

Ganz unerwähnt gelassen habe ich die zahlreichen sog. SPIN OFFS, die Nutzung von für die Raumfahrt entwickelten Technologien auf Gebieten unseres täglichen Lebens, für die sie ursprünglich gar nicht gedacht waren. Das internet, die Fernerkundung der Erde für die Umweltforschung, die satellitengestützte Kommunikation, die Klimaforschung, neue Möglichkeiten der Energie- und Datenspeicherung, leichte Materialien für den Flugzeug- und Autobau, Werkstoffe mit völlig neuen Eigenschaften, – dies alles verdanken wir der Raumfahrt.

Und diese halbhundertjährige Erfolgsgeschichte wird fortgeschrieben. Visionen vom bemannten Marsflug wirken schon fast nüchtern und greifbar nahe gegenüber bereits diskutierten Projekten der Rohstoffgewinnung aus dem All, des Antimaterieantriebs und der interstellaren Raumfahrt, von denen heute noch niemand zu sagen vermag, ob sie jemals Wirklichkeit werden. Aus der einstigen erbitterten Konfrontation im All ist eine weit entwickelte Kooperation geworden, obwohl auch weiterhin Überlegungen der militärischen Potenz und des nationalen Prestiges eine große Rolle spielen. Dies wird auch an den ehrgeizigen Programmen deutlich, mit denen jetzt neben Russland, den USA und Europa Länder wie Japan, China oder Indien auf den Markt drängen.

Unser heutiges wissenschaftliches Kolloquium, will wesentliche Ereignisse der vergangenen 50 Jahre nachzeichnen. Insgesamt kann es sich schon aus zeitlichen Gründen nur um ein Mosaikbild handeln, d.h. um einzelne, wenn auch durchweg bedeutungsvolle Aspekte der Entwicklung. Die kompetenten Referenten, die wir dafür gewinnen konnten, ausnahmslos Mitgestalter und Zeitzeugen der Ereignisse und Forschungen, bieten jedoch die Gewähr dafür, dass wir hier Wissen aus erster Hand vermittelt bekommen. So dürfen wir hoffen, mit unserem Kolloquium zur Erweiterung unserer Kenntnis über die Geschichte der Erforschung der Erde und des Weltraums und über die Bedeutung dieser Forschungen beizutragen. Das wäre deutlich mehr, als nur eine Erinnerungsveranstaltung zum 50. Geburtstag des Beginns einer wissenschaftlichen Epoche.

Grußworte von Prof. Dr. Claus Grote, Mitglied der Leibniz-Sozietät

Liebe Teilnehmer des Kolloquiums,

zu meinem Bedauern verhindert eine akute Erkrankung meine Teilnahme. Ich hätte aus mehreren Gründen gern teilgenommen, einmal, weil ich in den Jahren 1974 bis 1990 an zahlreichen Entscheidungen zur Entwicklung der Weltraumforschung in der DDR beteiligt war, vor allem aber, weil ich in diesem Zusammenhang viele Kollegen kennen und schätzen gelernt habe, die unmittelbarer die wissenschaftlich-technischen Arbeiten durchgeführt haben und die mir als dem Vorsitzenden des Koordinierungskomitees immer engagiert und kompetent, dabei sachlich und realistisch beigestanden haben. Das Ergebnis unserer gemeinsamen Arbeit – ich bin sicher, dass das Kolloquium das bestätigen wird – war ein im internationalen Maßstab bescheidenes, aber solides Forschungsprogramm.

Natürlich gab es von verschiedenen Seiten Versuche, darüber hinaus Aufgaben zu stellen, die Wissenschaft und Technik der DDR und ihre Akademie überfordert hätten. Ich zähle es gerade im Rückblick zu den positiven Seiten unserer Tätigkeit, dass wir unrealistische Vorschläge sachlich, aber bestimmt zurück gewiesen haben, gleich ob sie von unseren Partnern in den anderen Interkosmosländern kamen oder aus den Ministerien oder dem Zentralkomitee der SED.

Ich benutze die Gelegenheit, allen, die mich in meiner Tätigkeit unterstützt haben, meinen Dank auszusprechen. Ich wünsche dem Kolloquium einen vollen Erfolg.

Aus Anlass des Jahrestages des Sputnik-Starts erlaube ich mir, dem Präsidenten der Leibniz-Sozietät, Herrn Professor Herrmann, ein Dokument für das Archiv der Sozietät überreichen zu lassen, das nunmehr über dreißig Jahre ein Schattendasein in den Unterlagen führte, von denen ich während meiner Dienstzeit als Vorsitzender wegen anderer und damals dringenderer Aufgaben glaubte, sie erst einmal in die Ablage verbannen zu müssen.

Tatsächlich beweist es, dass der Anfang einer internationalen Zusammenarbeit in der Weltraumforschung auch schon eine dreißigjährige Tradition besitzt: Im Juli 1975 koppelten im Weltraum Apollo und Sojus mit drei Astronauten und zwei Kosmonauten zusammen und demonstrierten damit erstmalig in der Welt die Möglichkeiten friedlicher gemeinsamer Arbeit.

Der US-Astronaut Gerald P. Carr, letzter Kommandant des Skylab, überreichte dieses Dokument am 17. Mai 1977 der DDR-Botschaft in Washington zur Weiterleitung an mich. Als es mich erreichte, standen wir gerade in der von Termindruck und ungeheuren Anstrengungen, aber auch von Hektik und Geheimniskrämerei geprägten Vorbereitung des Kosmosflugs unseres Kosmonauten Sigmund Jähn, und die Euphorie des gemeinsamen Fluges der beiden Supermächte war längst wieder dem Alltag des Kalten Krieges gewichen.

Nach dreißig Jahren ist die Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V. wohl die natürliche Heimat dieses Dokuments.



Klaus-Dietrich Berge

Geschichte der westeuropäischen Trägerraketen bis zur Gegenwart



Abb. 1

Der Aufbau und die Entwicklung einer europäischen Trägerrakete war ein mühseliges Unterfangen, denn es galt, in einem neuen Europa mindestens acht Staaten unter einen Hut zu bringen.

Alles fing 1960 an. Der Sputnik hatte bereits seinen Sendebetrieb eingestellt und es wurde immer deutlicher, dass zukünftige Telekommunikations-Satelliten die Zukunft der globalen Kommunikation sein werden. Die Initiative ging von Großbritannien aus, die eine aus der US-Atlas entwickelte Großrakete Bluestreak besaß. Frankreich war schnell mit der zweiten Stufe dabei und Westdeutschland sollte die dritte Stufe bauen. Am 28. Juni 1961 gaben auch die Deutschen ihre Zusage und so wurde am 29. März 1962 die ELDO in Paris gegründet. Diese erste Rakete erhielt den Namen Europa I und wurde von Woomera in Australien gestartet. Es war nicht der ideale Startplatz, denn es waren nur polare Orbits möglich.

Ich will es vorwegnehmen: Alle drei Entwick-

lungsstufen von der Europa I zur Europa III scheiterten und man hatte 1.7 Milliarden DM ausgegeben. Die Deutschen haben mit der dritten Stufe wohl am meisten profitiert, da die alten Hasen aus Frankreich, den USA und England zum Teil zurückkamen. Mit den jungen Ingenieuren gerade von den Universitäten war dies eine gute Mischung, wobei bis 1962 weder Raketen noch Flugzeuge oder militärisches Gerät entwickelt werden durfte. Frankreich hat-

te dabei bereits eigene Raketen entwickelt, wie die Diamant und die Coralie. Ich erwähne dies, weil Frankreich dann mit diesem Potential den Neuanfang für die Ariane-Raketen startete. Im Mai 1973 wurde schließlich die ELDO aufgelöst.

Parallel zur ELDO hatte sich jedoch die ESRO (European Science Research Organisation) entwickelt, die wissenschaftliche Satelliten entwickelte und mit amerikanischen Raketen erfolgreich startete. 1975 wurden dann beide Organisationen zur Esa (European Space Agency) vereint. Damit wurde eine professionale Organisation geschaffen, die mit eigenen Fachleuten ihre Projekte managte und überwachte. Die französische Raumfahrtagentur CNES erhielt dann auch den Auftrag, die Ariane zu entwickeln. Ich selbst durfte einen dieser Wissenschaftssatelliten der ESRO innerhalb der Industrie bei der ERNO in Bremen leiten und dies auch mit 28 Jahren. Nur Satellitenbau konnte man zu dieser Zeit in Deutschland noch nicht studieren.

Der große Durchbruch für die Ariane-Raketenentwicklung kam dadurch zustande, dass Frankreich und Deutschland einen technologisch hochwertigen Kommunikationssatellit en mit Namen Symphonie entwickelt hatten. Aber sie hatten keine eigene Rakete zum Start. So gingen sie in die USA. Die amerikanische Regierung stellte allerdings eine entscheidende Bedingung: Dieser Satellit darf nicht für kommerzielle Zwecke benutzt werden. Sie machten später noch einen weiteren großen Fehler. Damit war die europäische Raketenunabhängigkeit beschlossene Sache. Kein europäischer Politiker ist je davon abgewichen. Es war abzusehen, dass die Raketen und Satelliten Technologien im Kampf um globale Märkte mit Billionen von Dollar werden würden.

Am 24. Dezember 1979 startete schließlich die Ariane 1 von ihrem neuen Startplatz in Kouru/Französisch Guayana nahe des Äquators in Südamerika erfolgreich. Die Konstruktion der Ariane war ein Glücksfall, denn sie konnte durch entsprechende Anpassungen immer größere Nutzlasten in eine geostationäre Einschussbahn bringen. Dieses Baukastensystem ist auf der anliegenden Seite dargestellt.

Eine geostationäre Einschussbahn ist eine Ellipse, an deren höchstem Punkt in 36 000 km ein Raketenmotor im Satelliten zünden musste, um daraus eine Kreisbahn zu ermöglichen.

1980 wurde dann die Arianespace als Betreibergesellschaft der Ariane gegründet. Diese vermarktet die Raketen, bestellt und betreibt sie und ist auch für den Start verantwortlich. Sie ist im Besitz der produzierenden Firmen und steht bis heute traditionsgemäß unter französischer Führung.

Die Ariane 1 konnte nur Nutzlasten von 1800 kg tragen und, da die Satellitenmassen stetig anstiegen, bestand ein Zwang zur Verbesserung der Rakete. Die ging technisch bis zur Ariane 4. Die heutige Ariane 5 musste also ein anderes Design haben, auch weil die Europäer damit Menschen transportieren wollten. Dies wurde jedoch aufgegeben.



Abb 2: Ariane 1 bis 4

Ein wesentliches Charakteristikum aller Ariane-Raketen ist die Doppelstartfähigkeit von Satelliten. Damit kostete ein Satellit nur die Hälfte der jeweiligen Startkosten. Damit konnte den USA und der UdSSR kostenmäßig Konkurrenz geboten werden. Heute ist die Ariane 5 die sicherste Rakete der Welt.

In den achtziger Jahren machten die USA einen weiteren Fehler, von dem Europa sehr stark profitierte: Sie verboten alle Satellitenstarts in den USA mit Raketen, da der Shuttle ausgelastet werden musste. Dies bedeutete eine Hinwendung des Satellitenmarktes nach Europa, da der Shuttle zu teuer war und nicht so oft fliegen konnte. Damit wurde die amerikanische Trägerkonkurr-

enz ausgeschaltet. Für die europäischen Mitgliedsstaaten wurde in diesen Jahren daraus ebenfalls ein Geschäft, da das Fünffache der ausgegebenen Kosten wieder an die Industrien der beteiligten Länder zurückflossen.

	Soyuz	Proton	H-II	Ariane	Shuttle
	Roscosmos		JAXA	ESA	NASA
	Russia		Japan	Europe	United States
	RUSSIA		JAPAN	EUROPE	U.S.
	Soyus SL-4	Proton SL-12	H-II	Ariane 5	Space Shuttle
First Launch	1957	1965	1996	1996	1981
Launch site(s)	Baikonur Cosmodrome	Baikonur Cosmodrome	Tanegashima Space Center		Kennedy Space Center
Launch per- formance payload capacity	7,150 kg (15,750Ib)	20,000 kg (44,000Ib)	16,500 kg (36,400Ib)	18,000 kg (39,700Ib)	18,600 kg (41,000Ib) 105,000 kg (230,000 Ib)
					orbiter only
Return per- formance payload capacity	N/A	N/A	N/A	N/A	18,600 kg (41,000Ib) 105,000 kg (230,000 Ib) orbiter only
Number of	2+4 strap-	4+6 strap-	2+2 strap-	2+2 strap-	1.5+2 strap-
stages	ons	ons	ons	ons	ons
Length	49.5 m (162 ft)	57 m (187 ft)	49.5 m (162 ft)	53 m (173ft)	51 m (167 ft) 56.14 m (182 ft) 37.24 m (122.17 ft), orbiter only
Mass	310,000 kg (683,400Ib)	690,000 kg (1.521,200Ib)	570,000 kg (1.256,600Ib)	746,000 kg (1,644,600Ib)	2,040.000 kg (4,497,400Ib)
Launch thrust	6,000 kN (1.348,800Ibf)	9,000 kN (2,023,200Ibf)	5.600 kN (1.258,900 lbf)	11,400 Kn (2,562,820Ibf)	34,677 kN (7,795,700Ibf)
Payload	Soyuz	Service Module	H-II	Ariane Automated	Shuttle Orbiter

Examples		Functional Cargo Block (FGB) Research Module (RM) Multipurpose	Vehicle (HTV)	Vehicle (ATV)	Nodes. U.5, Lab Colum- bus, JEM, Truss ele- ments
		Multipurpose Lab Module (MLM)			
Airlock, SSRMS ((hier hab ich keine Ahnung, wo das hin sollte))					

The largest U.S. and Russian launch vehicles are used to place elements of the ISS, crew, and cargo in orbit. Eventually, Japanese and European launch vehicles will support cargo delivery. Currently, only the U.S. Space Shuttle provides the capability to return significant payloads.

Tab. 1: International Space Station Transportation/Logistics LAUNCH VEHICLES



Bild 3. Startaggregate der Ariane

Als vorläufig letzter Schritt wurde die Entwicklung der Ariane 5 beschlossen. Hierbei ging es um Satellitenmassen von 10 bis 12 Tonnen in den geostationären Orbit. Hierzu einige Charakteristika:

• dreistufige Rakete; Höhe: 51,4 Meter; Durchmesser: 5,4 Meter; Gewicht: 730 Tonnen;

- Nutzlast in GTO: ein Satellit bis zu 6,8 Tonnen; Nutzlast in LEO: insgesamt 18 Tonnen;
- Nutzlast in polaren Orbit: 10 Tonnen

Ihre Entwicklungskosten betrugen zwölf Milliarden DM in Preisen von 1996. Der deutsche Anteil lag bei zweiundzwanzig Prozent. Die Arbeiten für die deutschen Anteile an der Rakete erledigen 154 Firmen und es werden pro Jahr fünf bis sieben geschossen und produziert.

Ich selbst war an der Ariane-Geschichte sowohl in der Industrie wie auch in der deutschen Raumfahrtagentur beteiligt und habe an vielen Verhandlungen in der ESA die deutschen Interessen vertreten.

Trotz zahlreicher Krisen und dem Nachschießen von viel Geld hat sich auch diese Ariane als Erfolg erwiesen. Dabei sah es gar nicht danach aus. Bei ihrem Erstflug musste ich diesen im RTL-Studio life kommentieren. Sie explodierte in ca. 500 Meter Höhe. Als man mich fragte, was mein Kommentar sei, konnte ich nur noch "Scheiße" sagen. Ich hoffe, sie verzeihen den Ausdruck.

Hans Joachim Haubold und Heinz Kautzleben

Weltraumaktivitäten der Vereinten Nationen. Space Applications. Basic Space Science. Das Internationale Heliophysikalische Jahr 2007¹

Einleitung

Am 13. Dezember 1958 nahm die Generalversammlung der Vereinten Nationen in ihrer 792. Plenartagung die Resolution Nr. 1348 (XIII) an. Sie trug den Titel "Question of the peaceful use of the outer space". Es war die unmittelbare Reaktion der Staatenorganisation auf den "Wettlauf in den Weltraum", den die UdSSR mit dem Start von "Sputnik 1" am 4. Oktober 1957 eröffnet hatte, die USA als Herausforderung verstanden und mit dem Start ihres ersten Raumflugkörpers "Explorer 1" am 1. Februar 1958 angenommen hatten.

In der Resolution heißt es (auszugsweise):

"The General Assembly,

Recognizing the common interest of mankind in outer space and recognizing that it is the common aim that outer space should be used for peaceful purposes only, ...

Wishing to avoid the extension of present national rivalries into this new field, *Desiring* to promote energetically the fullest exploration and exploitation of outer space for the benefit of mankind, ...

Noting the success of the scientific co-operative programme of the International Geophysical Year in the exploration of outer space and the decision to continue and expand this type of cooperation,

Recognizing the great importance of international co-operation in the study and utilization of outer space for peaceful purposes, ...

¹ Für den Druck in den "Sitzungsberichten der Leibniz-Sozietät" von H. Kautzleben angefertigte Fassung der Präsentation, die im Kolloquium der Leibniz-Sozietät "50 Jahre Weltraumforschung. Erforschung und Überwachung der Erde und des Weltraumes gestützt auf die Mittel der Raumfahrt" am 29.9.2007 dargeboten wurde.

- 1. *Establishes* an ad hoc Committee on the Peaceful Uses of Outer Space composed of the representatives of Argentina, Australia, Belgium, Brazil, Canada, Czechoslovakia, France, India, Iran, Italy, Japan, Mexiko, Poland, Sweden, the Union of Soviet Socialist Republics, the United Arab Republik, the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland and the United States of America, and requests it to report to the General Assembly at its fourteenth session on the following:
- (a) The activities and resources of the United Nations, of its specialized agencies and of international bodies relating to the peaceful uses of outer space;
- (b) The area of international co-operation and programmes in the peaceful uses of outer space which could appropriately be undertaken under the United Nations auspices to the benefit of States irrespective of the state of their economic or scientific development, taking into account the following proposals, inter alia:
- (i) Continuation on a permanent basis of the outer space research now being carried on within the framework of the International Geophysical Year;
- (ii) Organization of the mutual exchange and dissemination of information on outer space research;
- (iii) Co-ordination of national research programmes for the study of outer space, and the rendering of all possible assistance and help towards their realization;
- (c) The future organizational arrangements to facilitate international co-operation in this field within the framework of the United Nations;
- (d) The nature of legal problems which may arise in the carrying out of programmes to explore outer space;
- 2. *Requests* the Secretary-General to render appropriate assistence to the above-named Committee and to recommend any other steps that might be taken within the existing United Nations framework to encourage the fullest international co-operation for the peaceful uses of outer space."

Prägnanter können die durch den Beginn der Raumfahrt entstandene Situation, die Wünsche der in der UNO vereinten Staaten an die möglich gewordene Nutzung des Weltraumes, aber auch das große Vertrauen auf die im noch laufenden Internationalen Geophysikalischen Jahr erwiesene Fähigkeit der Nationen, friedlich zusammenarbeiten zu können, nicht beschrieben werden.

Im Kolloquium der Leibniz-Sozietät am 29. September 2007 wird ein kleiner Versuch unternommen, die Entwicklung der internationalen Zusammenarbeit bei der Erforschung und Nutzung des Weltraumes für friedliche Zwecke unter der Schirmherrschaft der UN aus der Sicht unserer Gelehrtengesellschaft

anzusprechen und einige Anregungen für die weitere Auseinandersetzung der Sozietät mit der Weltraumforschung abzuleiten. Verantwortlich für die Wahl der Aspekte ist Heinz Kautzleben, Mitglied der Gelehrtengesellschaft seit 1979 mit den Geo- und Kosmoswissenschaften als Arbeits- und Interessengebiet. Hans Joachim Haubold² steuerte aus seiner langjährigen Tätigkeit in der Weltraumabteilung der UNO die eingehende Kenntnis der Weltraumaktivitäten der Vereinten Nationen bei. Umfassende Informationen zu den Weltraumaktivitäten der Vereinten Nationen findet man überdies im Internet, wobei der Einstieg unter www.unoosa.org zu empfehlen ist.

Die Anfänge

Die entscheidenden, verbindlichen Beschlüsse zu den Fragen der friedlichen Nutzung des Weltraumes werden von der Generalversammlung (General Assembly, GA) gefasst. Die Texte findet man im Internet unter www.un.org.documents/ga/res/. Die ersten Resolutionen waren:

1348 (XIII)	13.10.1958	Question of the peaceful use of outer space
1472 (XIV)	12.12.1959	International co-operation in the peaceful uses of
		outer space
1721 (XVI)	20.12.1961	International co-operation in the peaceful uses of
		outer space
1802 (XVII)	14.12.1962	International co-operation in the peaceful uses of
		outer space
1962 (XVIII)	27.11.1963	Declaration of Legal Principles Governing the
		Activities of States in the Exploration and Use of
		Outer Space
1963 (XVIII)	27.11.1963	International co-operation in the peaceful uses of
		outer space
2130 (XX)	21.12.1965	International co-operation in the peaceful uses of
		outer space
2221 (XXI)	19.12.1966	United Nations Conference on the Exploration
		and Peaceful Uses of Outer Space
2222 (XXI)	19.12.1966	Treaty on Principles Governing the Activities of
		States in the Exploration and Use of Outer Space,
		including the Moon and Other Celestial Celestial
		Bodies

² Prof. Dr. Hans Joachim Haubold ist seit den 1980er Jahren Officer-in-Charge in der Space Applications Section des Office for Outer Space Affairs der UN (UNOOSA).

2223 (XXII) 19.12.1966 Report of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space

In diesen Resolutionen wurden unter den Zielstellungen, die bereits die allererste Resolution nannte, folgende Probleme behandelt:

- Regelung der Rechtsfragen für den Weltraum, Anwendung des Völkerrechts – verantwortlich sind die Staaten
- Sammlung von Informationen über die nationalen Weltraumaktivitäten und Gewährleistung des Informationsaustausches, Einrichtung eines Registers für die Starts der Raumflugkörper
- Organisation innerhalb der UNO, Einbindung ihrer Spezialorganisationen, Beziehungen mit den Nichtregierungsorganisationen
- Anwendungsgebiete: als erste wurden bereits in der dritten Resolution (am 20.12.1961) die Nutzung der Raumfahrt für die Meteorologie und das Nachrichtenwesen genannt.

Die aufgelisteten Resolutionen bestätigen, dass die UNO sich innerhalb weniger Jahre bereits zweckmäßige Instrumente und Verfahrensregeln geschaffen hatte. Hervorzuheben ist, dass am 10. Oktober 1967 der "Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space ..." (im deutschen Sprachgebrauch kurz Weltraumvertrag) in Kraft trat. Die Vereinten Nationen hatten es in intensiven diplomatischen Verhandlungen geschafft, den Vertragstext auszuarbeiten und im Dezember 1966 zur Unterzeichnung vorzulegen. Seine Bedeutung für die weitere Entwicklung der internationalen Zusammenarbeit bei der Erforschung und Nutzung des Weltraumes kann kaum überschätzt werden. Auf die Auflistung der Resolutionen, die in den folgenden Jahren gefasst wurden, an dieser Stelle wird verzichtet.

Das in der Resolution Nr. 1348 (XIII) der Generalversammlung vom 13. Dezember 1958 erwähnte ad hoc Committee wurde bereits ein Jahr später in das Ständige *Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (UNCOPUOS)* umgewandelt. Es unterhält zwei Unterkomitees, das *Scientific & Technic* und das *Legal Subcommittee*. Sowohl das Weltraumkomitee wie auch seine beiden Subkomitees tagen jedes Jahr einmal. Gegenwärtig hat das UNCOPUOS 67 Mitglieder und gehört zu den größten Komitees der UNO. Mitglieder können nach den Regeln der UN nur Staaten sein. Nachdem die beiden deutschen Staaten, die Bundesrepublik Deutschland und die Deutsche Demokratische Republik, am 18. September 1973 Mitglieder der UN geworden waren, wurden beide im selben Jahr auch Mitglied im UNCOPUOS und seinen beiden Sub-

komitees. Die Mitgliedschaft der DDR endete mit ihrer Auflösung am 3. Oktober 1990. Das wieder vereinigte Deutschland wird von der BRD vertreten.

Die Sekretariatsaufgaben für das UNCOPUOS werden vom *Office for Outer Space Affairs (UNOOSA)* erfüllt. Ihm obliegen bezüglich der Weltraumaktivitäten der UN noch zahlreiche weitere Aufgaben administrativer und wissenschaftlicher Art. Das Office befindet sich seit 1994 am zweiten Sitz der UNO in Wien.

Die Vereinten Nationen haben seit 1968 bereits drei *United Nations Conferences on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space* durchgeführt, alle in Wien: 1968 die UNISPACE, 1982 die UNISPACE 82 und 1999 die UNISPACE III.

Seit 1971 gibt es ein *United Nations Programme on Space Applications*. Es wurde 1968 von der UNISPACE empfohlen, von der Generalversammlung beschlossen und wird seit dem immer wieder verlängert. Für die Durchführung des Programms ist das UNOOSA verantwortlich.

Bei der Erforschung und Nutzung des Weltraums für friedliche Zwecke ist die internationale Zusammenarbeit unerlässlich

Das resultiert nicht nur aus den völkerrechtlichen Randbedingungen. Weltraumaktivitäten sind aufwendig und extrem teuer. Eigenständige "runde" Programme kosten heute eine Nation mindestens 500 Millionen \$ US pro Jahr. Die weitaus leistungsfähigste nationale Weltraumagentur, die National Aeronautic and Space Agency der USA, verfügt über ein Jahresbudget von 16 Milliarden \$ US. Die NASA wurde 1958 gegründet und wurde zum Vorbild für die Weltraumagenturen der meisten anderen Staaten. Gegenwärtig haben 44 Nationen eine eigene Weltraumagentur. Die französische CNES verfügt über ein Budget von 2,2 Mrd. \$ US. Sie liegt damit hinter der NASA an 2. Stelle. An 5. Stelle rangiert die nationale Agentur der BRD, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), mit ihrem Jahresbudget für Raumfahrt von 1,0 Mrd. Insgesamt verfügen nur 8 nationale Agenturen (darunter auch Japan, Russland, China, Indien) über ein Jahresbudget von über 0,5 Mrd. \$ US. Das Jahresbudget der multinationalen ESA, der European Space Agency, beträgt 3,8 Mrd. \$ US. Die weitaus meisten Nationen sind auf die Mitwirkung bei den "Großen" angewiesen.

Den Vereinten Nationen kommen bei der Förderung der internationalen Zusammenarbeit umfangreiche Aufgaben zu. Es ist ihr hervorragendes Anliegen, auch dabei die Entwicklungsländer zu unterstützen.

Weltraumaktivitäten der UN - allgemein

Die Organisation der Vereinten Nationen bietet ihren Mitgliedsstaaten zur friedlichen Nutzung des Weltraumes:

- Austausch von Informationen/Meinungen
- Jährlich Sachstandsanalysen
- Förderprogramme
- Technische Unterstützung/Zusammenarbeit.

Mitwirken können Staaten und auch einige internationale Organisationen, soweit es die Regeln der UN zulassen.

Die militärische Nutzung des Weltraumes wird in der Conference on Disarmament in Genf (gegründet 1979, Vorgänger seit 1960) behandelt, nicht im UNCOPUOS.

"Space Solutions for the World Problems"

Inzwischen befassen sich mehr als 30 Struktureinheiten der UNO und Spezialorganisationen der UN mit Weltraumaktivitäten. Es gibt einen permanent tätigen Mechanismus zu deren Koordinierung, dessen Zentrale das UNOOSA bildet. Jährlich wird eine Broschüre mit dem Titel "Space Solutions for the World Problems. How the United Nations family is using space technology for sustainable development" herausgegeben. In allen Ausgaben werden behandelt:

- Space Technology: Communications satellites, Remote sensing satellites; Navigation satellites
- Space Technology for Protecting the Earth's Environment and Managing its Resources
- Space Applications for Human Security, Development and Welfare
- Education, Training and Capacity Building
- Protecting the Space Environment

United Nations Programme on Space Applications

Das Programm gibt es seit 1971. Es hat ein eigenes Budget. Für die Durchführung ist das UNOOSA verantwortlich. Einige Angaben:

Purposes:

Enhance the understanding and subsequent use of space technology for peaceful purposes, in general, and for national development, in particular, in response to express needs in different geographic regions of the world

Thematic areas:

- Use and applications of global navigation satellite systems,
- Natural resources managements & environmental monitoring,
- Satellite communications
- Space technology and disaster management
- Basic space sciences

Regional Centres for Space Science and Technology Education:

Affiliated to the United Nations; in India (for Asia and the Pacific), Morocco and Nigeria (for Africa), Brazil and Mexico (for Latin America and the Caribbean)

Basic Space Science

In den 1980er Jahren wurde empfohlen, in das UN Space Applications Programme auch die grundlegenden Weltraumwissenschaften aufzunehmen, was besonders den Entwicklungsländern zu gute kommen soll. Daraufhin begann 1991 in Zusammenarbeit von UN und ESA eine Serie von *Workshops on Basic Space Science*. Ausführliche Informationen darüber bietet das Buch "Developing Basic Space Science World-Wide. A Decade of UN/ESA Workshops", herausgegeben von Willem Wamsteker, Rudolf Albrecht und Hans J. Haubold (Kluwer Academic Publisher 2004).

In the context of the needs for the developing countries, basic space science was defined to cover:

- Fundamental physics
- Astronomy and astrophysics
- Solar-terrestrial interaction and its influence on terrestrial climate
- Planetary and atmospheric studies
- Origin of life and exo-biology

Applicable techniques:

- Ground-based optical, and radio observations
- Radio and optical telescopes with associated equipment
- Remote sensing, both from the ground and from space
- All measurements from ground-inaccessible windows which can only be made through of instruments and telescopes in Earth orbit
- In-situ measurements from rocket, balloon and satellite platforms

UN Basic Space Science Initiative (UNBSSI)

Seit den ersten Jahren des 21. Jahrhunderts wurden die Aktivitäten der Vereinten Nationen zur Förderung der Basic Space Science in den Entwicklungsländern zur UNBSSI erweitert. Die UNBSSI ist eine weltweite Initiative, um die Entwicklungsländer in die Planung und Durchführung des Internationalen Heliophysikalischen Jahres im Jahre 2007 (IHY 2007) einzubeziehen. Dem diente ab 2005 auch die Serie der Workshops on Basic Space Science. Sie wurden ab 2005 auch von der NASA gefördert.

Für die Entwicklungsländer wurde ein spezielles *UNBSSI TRIPOD concept* entwickelt:

- Installation and operation of scientific instruments
- · Taking data with the instruments
- Using scientific instruments and data for university education

A major thrust of UNBSSI is to deploy arrays of small, inexpensive instruments such as magnetometers, radio telescopes, GPS receiver, all-sky-cameras etc. around the world to allow global measurements of ionospheric and heliospheric phenomena.

Current instrument networks: solar telescopes, ionospheric monitors, magnetometers, particle detectors

Data projects: Using existing databases of space missions.

International Heliophysical Year 2007

Das IHY 2007 ist eine wissenschaftliche und wissenschaftspropagandistische Initiative der großen Weltraumagenturen angeführt von der NASA. Die Initiative bezieht sich auf das Internationale Geophysikalische Jahr 1957/58, will dessen Jubiläum würdigen und es nutzen, um für die aktuellen Forschungen verstärkte Aufmerksamkeit und Förderung zu erreichen. Ausführliche Informationen zum IHY 2007 findet man im Internet unter http://ihy2007.org

Die Ziele des IHY 2007 sind:

- 1a. Develop the basic science of heliophysics through cross-disciplinary studies of universal processes
- 1b. Determine the response of terrestrial and planetary magnetospheres to external drivers
- 1c. Promote research on the Sun-heliosphere system outward to the local interstellar medium the new frontiers
- 2. Foster international scientific cooperation in the study of heliophysical phenomena

- 3. Preserve the history and legacy of IGY on its 50th anniversary
- 4. Communicate unique IHY results to the scientific community and the general public.

Das Programm des IHY 2007 nennt sowohl Coordinated Investigation Programmes als auch die wissenschaftlichen Disziplinen, die zur Erforschung der universellen Prozesse beitragen werden:

- Solar Physics
- Planetary magnetospheres
- · Heliosphere and cosmic rays
- Planetary ionospheres, thermospheres and mesospheres
- · Climate studies
- Heliobiology

Vom Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58 zum Internationalen Heliophysikalischen Jahr 2007

Das zentrale Thema in den beiden Wissenschaftsjahren ist im Wesentlichen identisch: Es geht um den Einfluss der Sonne auf die Erde. Die Kenntnisse über das Sonnensystem, die Sonne und die Heliosphäre, über die in der Heliosphäre herrschenden Bedingungen und die universellen Prozesse sind jedoch seit dem IGY 1957 dank der Nutzung der Raumfahrt zur Erforschung des Weltraumes im Sonnensystem ungeheuer gewachsen. Im IGY 1957 gab es jedoch noch weitere "große" Themen, die im IHY 2007 nicht mehr behandelt werden. Es sind das wesentlich geowissenschaftliche Themen wie die umfassende Erforschung der Polgebiete der Erde und der Meeresräume und die Ansätze, die zur neuen Globaltektonik und weiter zur Geodynamik führten, und die Anstöße zur Entwicklung der heutigen Umweltwissenschaften.

Die politischen und ökonomischen Randbedingungen für die internationale wissenschaftliche Zusammenarbeit im IGY und im IHY sind ganz entscheidend verändert. Der "kalte Krieg" zwischen Ost und West ist überwunden. Die Nutzung der Raumfahrt gehört heute zum Alltag. Das nationale Prestigedenken hat seinen in den Anfangsjahren überragenden Einfluß verloren, ist aber durchaus noch wirksam. Heute gibt es in vielen Ländern für die relevanten Gebiete starke Potentiale, die zu großen Leistungen fähig sind, aber auch sehr viel Geld brauchen, was in dem geforderten Umfang nicht verfügbar ist.

Anregungen für die Leibniz-Sozietät

Die Weltraumwissenschaften gehören nach wie vor zu den Wissenschaftsgebieten, die in der breiten Öffentlichkeit beträchtliche Aufmerksamkeit erregen, aber auch zum Teil kontroverse Diskussionen auslösen. Schon deshalb sollte die Leibniz-Sozietät als eine Akademie der Wissenschaften Wortmeldungen in den aktuellen Wissenschaftsjahren im Umfeld des 50. Jahrestages des Internationalen Geophysikalischen Jahres und des Beginns der Raumfahrt und der Weltraumforschung abgeben.

Die Verbindung der Weltraumwissenschaften mit den Erdwissenschaften ist offensichtlich und bringt eine Vielzahl von interdisziplinären Fragestellungen mit sich, die nur durch eine entsprechende multidisziplinäre Gemeinschaftsarbeit angegangen und gelöst werden können. Die Leibniz-Sozietät sollte hierzu ihre Möglichkeiten ins Spiel bringen. Das betrifft auch die Einbeziehung der Sozial- und Geisteswissenschaften.

Im Jahr 2009 wird die wissenschaftliche Welt das Internationale Jahr der Astronomie (IYA) durchführen. Offensichtlich bestehen enge Zusammenhänge mit den Themen, die im IHY 2007 diskutiert werden. Die Diskussionen zum IHY 2007 sollten so geführt werden, dass sie nahtlos in die zum IYA übergehen. Es dürfte für die Physiker und an der Physik Interessierten unter den Mitgliedern und Gästen der Leibniz-Sozietät sehr spannend sein, wenn die Sozietät sich in nächster Zeit mit den relevanten physikalischen Fragen befasst.

Marcus Schladebach

50 Jahre Weltraumrecht: Entwicklungsstand und Perspektiven

I. Die Anfänge des Weltraumrechts

1. Die Einsetzung des UN-Weltraumausschusses

Die Starts der ersten künstlichen Satelliten "Sputnik 1" (Sowjetunion, 4. Oktober 1957) und "Explorer 1" (USA, 1. Februar 1958) waren die herausragenden technischen Entwicklungen des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957/58. Sie riefen zahlreiche Reaktionen hervor: In naturwissenschaftlichen, gesellschaftlichen, politischen und philosophischen Debatten wurde versucht, den Aufbruch in den - bis dahin allenfalls in Ansätzen erforschten – Weltraum zu erfassen, zu erklären und zu ordnen¹. Schon bald setzte sich die Einsicht durch, dass auch die Rechtswissenschaft auf die neuen Entwicklungen reagieren musste. So richtete die Generalversammlung der Vereinten Nationen 1958 auf Vorschlag des amerikanischen Außenministers Dulles² zunächst ein ad-hoc-Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (COPUOS) ein³. Es wurde 1959 in einen ständigen UN-Weltraumausschuss umgewandelt⁴. Der Ausschuss erhielt die anspruchsvolle Aufgabe, eine internationale Rechtsordnung für den Weltraum auszuarbeiten⁵. Diese Arbeiten führten zu einem Grundsätzekatalog. Der Katalog wurde am 13. Dezember 1963 einstimmig als "Erklärung über die Rechtsgrundsätze zur Regelung der Tätigkeiten von Staaten bei der Erforschung und Nutzung des Weltraums"

¹ Ausführlich zum 50. Jahrestag des Starts von "Sputnik 1" und den weltweiten Reaktionen Schlindwein/Stampf, Die Eroberung des Himmels, Der Spiegel 39/2007, S. 178 ff.

² Department of State Bulletin 1958, S. 529.

³ A/Res/1348 (XIII) vom 13.12.1958.

⁴ A/Res/1472 (XIV) vom 12.12.1959. Er ist das bedeutendste Forum des Weltraumrechts und hat seinen Sitz in Wien.

⁵ Dazu Probst, ZaöRV 19 (1958), 637 ff.; von Münch, AVR 8 (1959/60), 151 ff.; Bödigheimer, EA 1959, 172 ff.; Hartwig, NJW 1962, 1593 ff.; Rehm, EA 1962, 235 ff.; Schwenk, VN 1963, 124 ff.

36 Marcus Schladebach

verabschiedet⁶. Diese Erklärung bildete später die Grundlage für den Weltraumvertrag von 1967.

2. Der Weltraumvertrag von 1967

a) Unterzeichnung

Der Vertrag über die Grundsätze zur Regelung der Tätigkeiten von Staaten bei der Erforschung und Nutzung des Weltraums einschließlich des Mondes und anderer Himmelskörper – kurz: Weltraumvertrag (WRV)⁷ – ist am 27. Januar 1967 in London, Moskau und Washington unterzeichnet worden. Der zutreffend als "Magna Charta des Weltraumrechts"⁸ oder auch "Weltraumverfassung"⁹ bezeichnete Vertrag ist die zentrale Rechtsgrundlage im Weltraumrecht und begeht 2007 seinen 40. Geburtstag. Er wurde von 98 Staaten ratifiziert und von weiteren 27 Staaten unterzeichnet. Der Vertrag ist für einige Staaten bereits am 10. Oktober 1967, für Deutschland dagegen am 10. Februar 1971 in Kraft getreten ¹⁰.

b) Kritik

Der WRV hat von Anfang an viel grundsätzliche Kritik erfahren¹¹. So wurde bemängelt, der WRV sei größtenteils eine bloße Wiederholung der Resolution von 1963. Eine nähere Erläuterung oder Präzisierung der darin verwendeten Begriffe habe nicht stattgefunden. Die wenigen neuen Bestimmungen seien so ungenau ausgearbeitet, dass der Gedanke naheliege, die Verfasser hätten niemals erwartet, dass der Vertrag je aktuelle Bedeutung erlangen werde und eine genaue Auslegung erforderlich werden könnte. Vielmehr hätten sie geglaubt, dass die Vertragsurkunde – solange sie nur leidlich nach einem Vertrag aussehe – ihren Hauptzweck bereits erfülle¹².

Rechtspolitisch sei der Vertrag nicht mehr als ein von den Hauptnutzern des Weltraums erarbeitetes Instrument, um politische Entspannung zu signalisieren. Die Vereinten Nationen sollten zu einem Rechtsakt veranlasst werden, der die psychologische Wirkung von gegenseitigen Zusicherungen habe

⁶ A/Res/1962 (XVIII) vom 13.12.1963.

⁷ BGBl. 1969 II S. 1967.

⁸ Böckstiegel, in: Ders. (Hrsg.), Handbuch des Weltraumrechts (HdWR), 1991, S. 1 (11); von Kries/Schmidt-Tedd/Schrogl, Grundzüge des Raumfahrtrechts, 2002, S. 9; Hobe/Kimminich, Einführung in das Völkerrecht, 8. Aufl. (2004), S. 457; Wolter, ZaöRV 62 (2002), 941.

⁹ Von Kries, in: HdWR (Fn. 8), S. 307 (349).

¹⁰ BGBl. 1971 II S. 166.

¹¹ Insbesondere von Fawcett, Weltraumrecht, 1970, S. 25 ff.

¹² Fawcett (Fn. 11), S. 25.

und als beruhigender Beweis für eine internationale Zusammenarbeit angesehen werde¹³. Ziel sei daher ein Vertrag mit möglichst geringer Verbindlichkeit und Wirkung gewesen. Dies komme vor allem darin zum Ausdruck, dass der WRV keine Streitschlichtung und Sanktionen, dafür aber eine einschränkungslose Kündigungsmöglichkeit (Art. XVI WRV) enthalte. Deshalb trage er wenig oder überhaupt nichts dazu bei, die bereits in den Resolutionen der UN-Generalversammlung festgelegten Grundsätze weiter auszuarbeiten und abzusichern. Der schlecht aufgebaute Vertrag stelle somit insgesamt einen Rückschritt dar¹⁴.

Außerdem ist angemerkt worden, dass viele Formulierungen des WRV inhaltsleere General- und Gemeinwohlklauseln darstellten, unpräzise und lückenhaft seien sowie juristisch unbrauchbare Präambellyrik enthalten 15. Dem folgten andere Autoren insoweit, als sie auf die geringe Präzision einiger Vorschriften hinwiesen 16. Überdies offenbarten viele Regelungen ein kommunikatives Harmoniebedürfnis und einen fragwürdigen politischen Erfolgsdruck, sich auf den kleinsten gemeinsamen Nenner einigen zu müssen 17.

c) Würdigung

Diese Kritik war nicht gerechtfertigt. Der größte Vorzug des WRV besteht darin, dass er hervorragende Grundentscheidungen über die Erforschung und Nutzung des Weltraums getroffen hat 18, die sich in den zurückliegenden Jahrzehnten eindrucksvoll bewährt haben. Positiv ist außerdem seine zukunftsgerichtete inhaltliche Ausgestaltung 19. Er regelte bereits Sachbereiche, die erst in der Zukunft relevant werden sollten. Hierzu zählen Bestimmungen über Weltraumtätigkeiten von Privatunternehmen, den Umweltschutz und die Haftung. Die erhebliche Qualität des WRV liegt somit auch darin begründet, dass er im Vorgriff auf künftige Entwicklungen geschaffen worden ist. Zu Recht ist darauf hingewiesen worden, dass ein solches Vertragswerk nicht entstanden wäre, wenn die Interessenlage der beteiligten Staaten bereits differenzierter und damit konfliktträchtiger gewesen wäre 20. Dann hätte die

¹³ Fawcett (Fn. 11), S. 26.

¹⁴ Fawcett (Fn. 11), S. 27.

¹⁵ Bueckling, DRiZ 1977, 76 (77); Ders., ZRP 1983, 190 ff.; Ders., ZLW 1986, 202; Ders., in: HdWR (Fn. 8), S. 55 (75 ff.).

¹⁶ Matte, in: Bernhardt (Hrsg.), Encyclopedia of Public International Law (EPIL), Vol. III, 1997, 836 (838); Ders., in: Bernhardt, EPIL IV, 2000, 552 (553); Hobe/Kimminich (Fn. 8), S. 464.

¹⁷ Bueckling, DRiZ 1977, 76 (77); Matte (Fn. 16), S. 838.

¹⁸ Böckstiegel, in: HdWR (Fn. 8), S. 11.

¹⁹ Böckstiegel, in: Festschrift für Carstens, 1984, S. 307 (309); Ders., in: HdWR (Fn. 8), S. 8.

²⁰ Böckstiegel, in: HdWR (Fn. 8), S. 8.

38 Marcus Schladebach

Verfolgung von Einzelinteressen eine Einigung in den zentralen Punkten mit Sicherheit nicht zugelassen. Die Aufbruchstimmung in der Raumfahrt beförderte daher die zukunftsgerichteten Inhalte des Vertrags.

Darüber hinaus darf auch das internationale politische Klima dieser Zeit nicht übersehen werden. Der Ende der 1950er Jahre eröffnete Wettlauf in den Weltraum hätte es durchaus nahegelegt, dass die beiden führenden Raumfahrtnationen USA und Sowjetunion jeweils nationale und nicht völkerrechtlich determinierte Wege beschritten hätten. Diese Alternative musste sich spätestens dann geradezu aufdrängen, als Mitte der 1960er Jahre damit begonnen wurde, den Weltraum auch militärisch zu nutzen. Vor diesem Hintergrund war es fortschrittlich, dass der WRV überhaupt geschlossen und durch ihn ein rechtlich verbindlicher Rahmen für die Weltraumnutzung niedergelegt wurde. Bei aller Kritik an unpräzisen Formulierungen und inhaltsleeren Gemeinwohlklauseln muss überdies daran erinnert werden, dass der WRV ausweislich seines Titels und seiner Präambel Grundsätze und Prinzipien zu regeln beabsichtigt. Sein Anspruch war es gerade nicht, bis ins Detail ausgearbeitete Vorschriften zu schaffen. Diese Erwartung wäre politisch – wie dargelegt - gar nicht realistisch gewesen. Wer daher dem WRV mangelnde Präzision und fehlende Definitionen vorwirft, verkennt nicht nur die politischen Umstände der Entstehung dieses Vertrags, sondern auch seine in Titel und Präambel klar zum Ausdruck kommende Zielsetzung.

Die grundsätzliche Kritik an Inhalt und Zweck des WRV ist schließlich auch deshalb entschieden zurückzuweisen, weil der Vertrag eine klarere und sicherere Rechtsgrundlage für seinen Bereich bietet, als sie für andere Völkerrechtsgebiete besteht²¹. Dass einige seiner Bestimmungen einer Auslegung bedürfen, spricht nicht gegen diesen Befund, sondern ist für einen Vertrag völlig normal. Mit den anerkannten Auslegungsmethoden lassen sich – wie in allen anderen Rechtsgebieten – auch im Weltraumrecht sachgerechte Ergebnisse erzielen. Dass ein Vertrag der Auslegung bedarf, stellt deshalb keinen qualitativen Mangel, sondern vielmehr ein Wesenselement dieser Kooperationsform dar.

²¹ Böckstiegel, in: Festschrift für Carstens, 1984, S. 307 (324); Matte (Fn. 16), S. 556.

II. Grundfragen des Weltraumrechts

1. Der Weltraum als hoheitsfreier Gemeinschaftsraum

Der Begriff "Weltraum" ist rechtlich nicht definiert. Unter "Weltraum" ist der Raum zu verstehen, der sich oberhalb des Luftraums in vertikaler Richtung erstreckt. Nach Art. I Abs. 2 WRV ist er – wie die Hohe See, die Tiefsee und die Antarktis – ein hoheitsfreier Gemeinschaftsraum. Hieraus folgen zwei Aussagen: Der Weltraum gehört allen Staaten gemeinsam, und zwar auch denjenigen, die derzeit noch nicht in der Lage sind, Raumfahrt zu betreiben. Jedoch darf kein Staat Hoheitsgewalt im Weltraum und auf den Himmelskörpern begründen. Zur Wahrung dieses besonderen Rechtsstatus verbietet Art. II WRV die nationale Aneignung des Weltraums und aller Himmelskörper.

Damit unterscheidet er sich grundlegend vom Rechtsstatus des staatlichen Luftraums. In ihm besitzt der Bodenstaat nach Art. 1 ChAbk²² volle und ausschließliche Lufthoheit. Dieser verschiedene Rechtsstatus wirft die Frage der Abgrenzung beider Räume auf²³. Vorgeschlagen wurden dazu eine technisch-physikalische Grenzlinie bei 83 km als maximaler Flughöhe für Luftfahrzeuge²⁴, eine Grenze bei 100 km als unterster technisch möglicher Erdumlaufbahn für Satelliten²⁵ oder eine Grenzlinie, die von der Nachweisbarkeit der Erdanziehungskraft bestimmt wird²⁶. Überwiegend wird eine exakte Grenzziehung jedoch abgelehnt, weil die Abgrenzung bislang rechtlich nicht relevant geworden sei²⁷. Zudem könne eine verbindliche Grenze die Nutzungsmöglichkeiten des Weltraums einengen.

²² Chicagoer Abkommen über die Internationale Zivilluftfahrt vom 7.12.1944 (BGBl. 1956 II S. 411).

²³ Harris/Harris, Space Policy 2006, 3 ff.; Ipsen, Völkerrecht, 5. Aufl. (2004), § 56 Rn. 7 ff.; Häußler, JA 2002, 817 (822 f.); Matte (Fn. 16), S. 555; Vitt, in: HdWR (Fn. 8), S. 35 ff.; Dauses, Die Grenze des Staatsgebietes im Raum, 1972; Fasan, Weltraumrecht, 1965, S. 41 ff.

²⁴ Kármán Primary Jurisdictional Line. Nach *Theodor von Kármán* (1881–1963) ist ein Flug auf der Basis des Luftauftriebs (Aerodynamik) oberhalb von 83 km physikalisch nicht mehr möglich; Diese Grenze wird befürwortet von *Schladebach*, Luftrecht, 2007, Rn. 144; *Hofmann*, BayVBl. 1978, 193 (194); *Fasan* (Fn. 23), S. 73.

²⁵ Hierzu Vitt (Fn. 23), S. 41 ff. m. w. N.

²⁶ Rinck, ZLW 1960, 191 (196); Ders., in: Strupp/Schlochauer (Hrsg.), Wörterbuch des Völkerrechts, Bd. 2, 2. Aufl. (1961), S. 437 (438). Danach endet der Luftraum bei ca. 1,5 Mio. km

²⁷ Vitt (Fn. 23), S. 44 ff.; Häuβler (Fn. 23), S. 823; Ipsen (Fn. 23), § 56 Rn. 12 f.; Matte (Fn. 16), S. 555.

40 Marcus Schladebach

2. Das Aneignungsverbot

Nach Art. II WRV unterliegt der Weltraum einschließlich des Mondes und anderer Himmelskörper keiner nationalen Aneignung durch Beanspruchung der Hoheitsgewalt, durch Benutzung oder Okkupation oder durch andere Mittel. Die Vorschrift dient dazu, den Weltraum und die Himmelskörper als hoheitsfreie Gemeinschaftsräume zu sichern. In der Vergangenheit ist viel darüber diskutiert worden, ob Art. II WRV durch seine Beschränkung auf "nationale" Aneignung nur Staaten mit dem Verbot einer Aneignung belege, eine solche durch die dort nicht genannten Internationalen Organisationen. iuristischen oder natürlichen Personen aber zulasse. Eine gelegentlich behauptete Regelungslücke besteht in Art. II WRV jedoch nicht: Wenn schon für Staaten eine Aneignung ausgeschlossen ist, so muss dies erst Recht für alle anderen Rechtssubjekte gelten. Zudem würde ein Eigentumserwerb die in Art. I Satz 2 WRV garantierte freie Erforschung und Nutzung des Weltraums beeinträchtigen. Den Staaten soll es überdies verwehrt sein, durch ein Handeln in Privatrechtsform das Aneignungsverbot umgehen zu können. Mangels Regelungslücke kann Eigentum auf Himmelskörpern wie Mond oder Mars nicht erworben werden²⁸.

3. Die Anwendbarkeit des Völkerrechts

Art. III WRV sieht vor, dass die Vertragsstaaten ihre Tätigkeit bei der Erforschung und Nutzung des Weltraums in Übereinstimmung mit dem Völkerrecht einschließlich der Charta der Vereinten Nationen ausüben. Hierdurch ist klargestellt, dass die Raumfahrtnationen das für die Erde entwickelte Völkerrecht mit hinaus in den Weltraum nehmen und sich ihr Verhalten daran ausrichten muss. Dies ist durchaus nicht selbstverständlich. Mit guten Gründen könnte vertreten werden, dass das Völkerrecht gerade wegen seiner Fixierung auf die Erde von einem Recht verdrängt wird, das planetenunabhängig für den gesamten Weltraum gilt. Der Geltungsanspruch des Völkerrechts würde überdehnt werden, wenn etwa außerirdische Lebensformen sich nach einem Recht zu richten hätten, das allein für den Planeten Erde geschaffen worden ist. Aufgrund solcher Überlegungen wurde vorgeschlagen, dem Weltraumrecht Rechtsgebiete unter der Bezeichnung "Cosmic International Law"²⁹ oder "Meta Law"³⁰ gegenüberzustellen. Da die Regelungsgehalte dieser Ent-

²⁸ Ipsen (Fn. 23), § 56 Rn. 6; Hobe/Kimminich (Fn. 8), S. 458; von Kries/Schmidt-Tedd/ Schrogl (Fn. 8), S. 18 f.; Rehm, in: HdWR (Fn. 8), S. 103 (114).

²⁹ Vazquez, Cosmic International Law, 1965.

würfe sich jedoch im Ergebnis nicht wesentlich von den Grundprinzipien des Völkerrechts unterscheiden, konnten sich diese Alternativkonzeptionen nicht durchsetzen.

4. Militärische Nutzungen

Bei der militärischen Nutzung des Weltraums ist zu unterscheiden³¹: Für den Mond und die anderen Himmelskörper gilt ein Militarisierungsverbot (Art. IV Abs. 2 WRV). Für die dortige wissenschaftliche Forschung ist die Verwendung von Militärpersonal aber zulässig. Im freien Weltraum ist es verboten, Kernwaffen oder andere Massenvernichtungswaffen in eine Erdumlaufbahn zu bringen (Art. IV Abs. 1 WRV). Handelt es sich indes nicht um solche Waffenarten oder werden diese nicht in eine Erdumlaufbahn gebracht, greift das Verbot des Art. IV Abs. 1 WRV nicht ein. Die damit vorhandene Regelungslücke ist zum Teil durch Rüstungskontrollvereinbarungen mit begrenztem Geltungsanspruch ausgefüllt worden.

5. Wirtschaftliche Nutzungen

Bedeutendste wirtschaftliche Nutzung des Weltraums ist der Einsatz von Rundfunk- und Telekommunikationssatelliten³². Je nach Nutzungszweck werden sie auf unterschiedliche Umlaufbahnen verbracht. Besonders begehrt ist der Geostationäre Orbit (GSO) in ca. 36000 km über dem Äquator. Bei richtiger Platzierung im GSO reichen drei Satelliten aus, um ein weltumspannendes Nachrichtensystem aufzubauen. Die Zahl der Satellitenpositionen ist aufgrund technischer Bedingungen auf allen Umlaufbahnen begrenzt. Dieser Umstand führte zu Verteilungskämpfen zwischen den Entwicklungsländern und den Industrienationen. Letzteren wurde vorgeworfen, die attraktiven GSO-Positionen unter sich aufzuteilen und damit einen Ausschluss der Entwicklungsländer zu bewirken, die erst in ferner Zukunft in der Lage sein würden, den GSO entsprechend zu nutzen. Wegen der großen Verbreitungspotenziale für Rundfunkprogramme über GSO-Positionen kritisierten die Entwicklungsländer zudem, einem unerwünschten Kulturimperialismus ausgesetzt zu sein.

³⁰ Fasan (Fn. 23), S. 141 ff.; Bueckling, Weltraumfahrt 1961, 133 ff.; Haley, ZLR 1957, 59 ff.

³¹ Von Kries (Fn. 9), S. 307 ff.; Ders./Schmidt-Tedd/Schrogl (Fn. 8), S. 253 ff.; Wolter, ZaöRV 62 (2002), 941 ff.

³² Hobe, Die rechtlichen Rahmenbedingungen der wirtschaftlichen Nutzung des Weltraums, 1992.

42 Marcus Schladebach

Um ein Minimum an Verteilungsgerechtigkeit herzustellen, wurde ab 1977 zunächst der GSO als "begrenzte natürliche Ressource" anerkannt. Zu ihm muss jeder Staat Zugang haben. Jedem Staat steht zumindest eine GSO-Position zu. Dieses Recht ist unabhängig davon, ob er wirtschaftlich und technisch in der Lage ist, sie tatsächlich zu nutzen. Seit 1998 gelten sämtliche Umlaufbahnen als "begrenzte natürliche Ressource". Hierzu wurde Art. 44 Abs. 2 ITU-Constitution geschaffen. Diese rechtliche Aufwertung der Umlaufbahnen ist zum Teil als verfrüht kritisiert worden. Die Industrienationen befürchten, dass ihre Nutzungsinteressen durch das Verteilungsverfahren beeinträchtigt werden. Für die Zuteilung der Frequenzbereiche und der entsprechenden Orbitpositionen ist die International Telecommunication Union (ITU), eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen mit Sitz in Genf, zuständig³³.

6. Erdfernerkundung

Erdfernerkundung ist die Gesamtheit der Methoden zur Erkundung der Erde aus der Ferne. Aus dem Weltraum aufgenommene Bilder der Erde erreichen eine immer bessere Abbildungsgenauigkeit. Sie werden für militärische und zivile Zwecke verwendet³⁴. Über die militärische Nutzung ist verständlicherweise wenig bekannt. Zivile Zwecke bilden die Erkundung von Rohstoffquellen, die Erforschung von Umweltveränderungen, die Kontrolle agrarischer Anbauflächen und die Verbesserung meteorologischer, geologischer, topographischer, kartographischer, vulkanologischer und archäologischer Erkenntnisse. Betrifft die Erdfernerkundung hoheitsfreie Räume oder eigenes Territorium, entstehen keine Konflikte. Die Erkundung fremden Territoriums kollidiert dagegen grundsätzlich mit dem Souveränitätsanspruch der erkundeten Staaten. Jedoch hat sich gerade in vielen Entwicklungsländern die Einsicht durchgesetzt, dass auch sie von der Erkundung ihres Territoriums profitieren. Mit der UN-Resolution 41/65 vom 3. Dezember 1986 wurde sich daher auf einen Prinzipienkatalog geeinigt, der ein liberales Konzept zur Zulässigkeit der Erdfernerkundung enthält. Dieser Katalog betrifft ausschließlich zivile Nutzungszwecke. Er gewährt erkundeten Staaten ein Zugangsrecht zu den sie betreffenden Daten. Als "soft law" ist er völkerrechtlich nicht verbindlich.

³³ www.itu.int.

³⁴ Malanczuk, in: HdWR (Fn. 8), S. 425 ff.; Cheng, Studies in International Space Law, 1997, S. 572 ff.; Classen, Fernerkundung und Völkerrecht, 1987.

7. Umweltschutz

Der Weltraum sieht sich zunehmenden Umweltbelastungen ausgesetzt. Die größte Belastung stellt der Weltraummüll dar. Darunter werden von Menschen erzeugte Weltraumgegenstände verstanden, die nicht mehr funktionsfähig sind und auch keine Funktionsfähigkeit mehr erlangen werden³⁵. Etwa 100000 Gegenstände mit einem Durchmesser von mehr als 1 cm umkreisen die Erde. Weltraummüll entsteht durch Funktionsverlust, Kollision oder Explosion von Weltraumgegenständen. Ausgebrannte Raketen, funktionslose Satelliten oder sonstige Trümmerteile stellen nicht nur eine Gefahr im Weltraum selbst dar. Im Laufe der Zeit sinken diese Gegenstände in niedrigere Umlaufbahnen und treten in die Erdatmosphäre ein. Ein großer Teil des Weltraummülls verglüht dort. Andernfalls fallen die Trümmerteile unkontrolliert auf die Erde oder müssen – wie bei der Raumstation "MIR" (2001) – kontrolliert zum Absturz gebracht werden.

Rechtliche Regelungen zum Umweltschutz finden sich im WRV nur recht spärlich. Art. IX Satz 2 WRV bestimmt insoweit, dass die Vertragsstaaten Kontaminationen des Weltraums und der Himmelskörper vermeiden und in der irdischen Umwelt jede ungünstige Veränderung infolge des Einbringens außerirdischer Stoffe verhindern sollen. Dies kann indes in keinem Fall als Mangel des WRV angesehen werden. Mitte der 1960er Jahre war an Umweltschutzaspekte allenfalls in Ansätzen zu denken. Erst auf der Stockholmer Konferenz von 1972 konnte eine erste internationale Umweltschutzdeklaration verabschiedet werden 36. Dass der WRV schon vorher eine Umweltschutzklausel aufgenommen hat, muss deshalb uneingeschränkt als Errungenschaft bewertet werden. Unbestritten ist freilich, dass diese Regelung den aktuellen Anforderungen nicht gerecht wird.

8. Haftungsfragen

Das durch Art. VII WRV und das Weltraumhaftungsübereinkommen (WHÜ) konzipierte Haftungssystem³⁷ kennt eine Gefährdungshaftung (Art. II WHÜ) und eine Verschuldenshaftung (Art. III WHÜ). Maßgebend ist dafür, ob der Schaden auf der Erde oder im Weltraum entstanden ist. Für Schadensersatzansprüche gilt ein Vorrang diplomatischer Klärung (Art. IX WHÜ). Wird auf diese Weise keine Regelung des Anspruchs erreicht, kann auf Antrag einer

³⁵ Frantzen, in: HdWR (Fn. 8), S. 597 (599); von Kries/Schmidt-Tedd/Schrogl (Fn. 8), S. 110.

³⁶ International Legal Materials (ILM) 11 (1972), 1416.

³⁷ Zu ihm grundsätzlich Malanczuk, in: HdWR (Fn. 8), S. 755 ff.; Stoffel, NJW 1991, 2181 ff.

44 Marcus Schladebach

Partei eine Schadenskommission eingesetzt werden (Art. XIV WHÜ). Deren Entscheidung ist jedoch nur dann verbindlich, wenn die Parteien dies vorher vereinbart haben. Andernfalls hat die Entscheidung lediglich empfehlenden Charakter (Art. XIX WHÜ).

Der bislang einzige Haftungsfall resultierte aus dem Absturz des mit einem nuklearen Antriebsreaktor ausgestatteten sowjetischen Satelliten Kosmos 954 am 24. Januar 1978 auf kanadischem Gebiet. Ein großer Teil des kanadischen Territoriums wurde radioaktiv verseucht. Die Erstattung der Beseitigungskosten durch die Sowjetunion erfolgte auf diplomatischem Weg. Es wurde 1981 vereinbart, dass Kanada drei Mio. CAN \$ für alle mit dem Absturz von Kosmos 954 zusammenhängenden Kosten erhält³⁸. Wegen der diplomatischen Klärung blieben viele Zweifelsfragen zur Auslegung des WHÜ ungeklärt. Eine interessante Spezialfrage in diesem Zusammenhang stellt die Versicherung gegen durch Weltraumgegenstände verursachte Schäden dar³⁹.

9. Rechtsstellung von Raumfahrern und Besatzung

Art. V und VIII WRV regeln die Rechtsstellung von Raumfahrern und Besatzungen. Nach Art. VIII Satz 1 WRV behält ein Vertragsstaat, in dem ein in den Weltraum gestarteter Gegenstand registriert ist, die Hoheitsgewalt und Kontrolle über diesen Gegenstand und dessen gesamte Besatzung, während sie sich im Weltraum oder auf einem Himmelskörper befinden. In diesem Fall ist der Vertragsstaat ausnahmsweise berechtigt, seine Hoheitsgewalt auch im – grundsätzlich hoheitsfreien – Weltraum auszuüben. Voraussetzung dafür ist die Eintragung des Weltraumgegenstands (z.B. Raumfähre oder -kapsel) in das nationale oder das UN-Register.

Der Begriff der Besatzung wird durchaus unterschiedlich interpretiert⁴⁰. Einerseits wird vertreten, zur Besatzung zählen alle einem Weltraumgegenstand zuzuordnenden natürlichen Personen. Andererseits werden als Besatzung nur diejenigen angesehen, die am Betrieb des Weltraumgegenstands funktional mitwirken. Nach dieser Ansicht würden etwa Weltraumtouristen, Kranke, Verletzte oder blinde Passagiere nicht zur Besatzung gehören. Die in Art. VIII WRV bestimmte Hoheitsgewalt des Vertragsstaats würde diese Personen dann nicht erfassen.

³⁸ International Legal Materials (ILM) 20 (1981), 689.

³⁹ Diederiks-Verschoor, An Introduction to Space Law, 1993, S. 104 ff.; Kadletz, VersR 1996, 946 ff.

⁴⁰ Dazu Bittlinger, in: HdWR (Fn. 8), S. 205 (210 ff.); Cheng (Fn. 34), S. 458 ff.

Die überwiegende Ansicht⁴¹ befürwortet indes eine weite Auslegung und entspricht der erstgenannten Auffassung. Zutreffend wird argumentiert, dass ein enger Besatzungsbegriff zu Regelungslücken im Hinblick auf die Hoheitsgewalt führe. Zudem sei auf die parallele Diskussion zum Begriff "Raumfahrer" in Art. V WRV zu verweisen. Bei Verwehrung der Besatzungseigenschaft würde man diesen Personen auch die Qualifizierung als "Raumfahrer" absprechen müssen. Dies hätte zur Folge, dass ihnen auch das in Art. V WRV und im Weltraumrettungsübereinkommen (WRÜ) niedergelegte Recht auf Rettung in Not zu versagen wäre. Dieses zweifelhafte Ergebnis müsse durch eine weite Auslegung vermieden werden, die den humanistisch orientierten Regelungsgehalt des Art. V WRV und des WRÜ berücksichtige. Deshalb zählen auch Weltraumtouristen zu den Raumfahrern und zur Besatzung.

Nach Art. V WRV und dem WRÜ ist in Not geratenen Raumfahrern im Weltraum, auf Himmelskörpern, bei Notlandung oder Notwasserung jede mögliche Hilfe zu gewähren. Ebenso wie der Besatzungsbegriff ist der Raumfahrerbegriff nach herrschender Ansicht weit auszulegen. Beide Begriffe korrespondieren derart miteinander, dass alle sich im Weltraum aufhaltenden Menschen "Raumfahrer" darstellen und zur "Besatzung" im Sinne des Art. VIII WRV gehören⁴².

Von Art. V Abs. 1 Satz 1 WRV werden Raumfahrer als "Boten der Menschheit" bezeichnet. Diese Formulierung hat zu der Frage geführt, ob Raumfahrer damit einen besonderen völkerrechtlichen Status erhalten haben⁴³. Einige Vertreter meinen, diesem Begriff ein "Element der Unverletzlichkeit" entnehmen zu können. Andere Autoren wollen den Raumfahrern eine "supranationale Immunität" zuerkennen, wenn sie sich in fremden Hoheitsbereichen bewegen. Ein diplomatischer Status solle damit allerdings nicht einhergehen. Schließlich wurde aus dieser Formulierung die Bestätigung abgeleitet, dass es den "Weltbürger im juristischen Sinne" gebe. Die herrschende Ansicht⁴⁴ geht jedoch zutreffend davon aus, dass aus dem Begriff "Boten der Menschheit" kein zusätzlicher rechtlicher Schutzgehalt resultiere. Er habe lediglich symbolischen Wert. Maßgeblich für die Rettung

⁴¹ Bittlinger (Fn. 40), S. 212; Cheng, in: Bernhardt, EPIL I, 1992, S. 278 (279); Ders. (Fn. 34), S. 459.

⁴² Bittlinger (Fn. 40), S. 223 f.

⁴³ Überblick bei *Bittlinger* (Fn. 40), S. 216 ff.; *Ders.*, Hoheitsgewalt und Kontrolle im Weltraum, 1988, S. 102 ff.

⁴⁴ Fasan (Fn. 23), S. 86; Hofmann (Fn. 24), S. 196; Cheng (Fn. 41), S. 279; Bittlinger (Fn. 40), S. 224.

46 Marcus Schladebach

von Raumfahrern blieben Art. V WRV und das WRÜ. Ergänzend ist Art. 98 Abs. 1 der UN-Seerechtskonvention zu berücksichtigen. Die dort geregelte Pflicht des Schiffkapitäns zur Rettung von in Seenot geratenen Personen kann auch für Raumfahrer relevant werden.

10. Die Internationale Raumstation (ISS)

a) Entstehung

Eine Raumstation ist eine dauerhafte, erdumkreisende und bewohnbare Anlage im freien Weltraum⁴⁵. Die erste bedeutendere Raumstation in diesem Sinne war die sowjetische Raumstation "MIR" (Frieden). Sie wurde am 20. Februar 1986 gestartet. Auf Initiative des US-Präsidenten Ronald Reagan planten die westlichen Staaten ab 1984 eine eigene Raumstation. Dazu schlossen die USA, Kanada, Japan und die ESA-Mitgliedstaaten am 29. September 1988 das Übereinkommen über die Entwicklung, den Betrieb und die Nutzung einer ständig bemannten zivilen Raumstation⁴⁶. Nach der politischen Umwälzung 1989 lud die Regierung Clinton 1993 Russland zu diesem Vorhaben ein. Russland sagte eine Beteiligung zu, denn das Ende der Nutzbarkeit der Station "MIR" war absehbar. Zwischen den USA, Russland, der ESA, Japan und Kanada wurde am 29. Januar 1998 das Übereinkommen über die Zusammenarbeit bei der zivilen internationalen Raumstation (ISS) geschlossen⁴⁷. Als völkerrechtlicher Vertrag bedurfte das ISS-Übereinkommen (ISS-Ü) der Ratifizierung durch die Vertragsstaaten. Nach Hinterlegung der Ratifikationsurkunde am 19. Januar 2000 ist es für Deutschland am 28. Juni 2005 in Kraft getreten⁴⁸.

Für die praktische Zusammenarbeit bei der ISS sind von den ISS-Partnern die nationalen Raumfahrtbehörden als verantwortliche Stellen benannt worden (Art. 4 Abs. 1 ISS-Ü). Diese haben sodann mit der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA auf der Grundlage des Art. 4 Abs. 2 ISS-Ü bilaterale Memoranda of Understanding (MoU) geschlossen. Diese stellen neben dem ISS-Ü die jeweiligen Rechtsgrundlagen dar. Für das Verhältnis zwischen den ISS-Partnern USA und dem europäischen Partner gilt demzufolge neben dem ISS-Ü das NASA/ESA-MoU.

⁴⁵ Von Kries/Schmidt-Tedd/Schrogl (Fn. 8), S. 219; Reifahrt, in: HdWR (Fn. 8), S. 537 ff.; Diederiks-Verschoor (Fn. 39), S. 80.

⁴⁶ BGBl. 1990 II S. 637.

⁴⁷ BGBl. 1998 II S. 2445.

⁴⁸ BGBl. 2006 II S. 152.

b) Rechtsverhältnisse

Die Zusammenarbeit der ISS-Partner soll nach Art. 1 Abs. 1 ISS-Ü auf der Grundlage echter Partnerschaft erfolgen. Allerdings wird den USA die Führungsrolle für das Gesamtmanagement zugewiesen (Art. 1 Abs. 2 ISS-Ü). Die ISS-Partner haben sich verpflichtet, Betriebs-, Versorgungs- und Forschungselemente herzustellen. Sie sind in der Anlage zum ISS-Ü aufgeführt. Hauptbeitrag der ESA ist das Forschungslabor "Columbus"⁴⁹. Es ist im Mai 2006 fertig gestellt worden. Sein Transport zur ISS steht unmittelbar bevor.

Nach Art. 2 Abs. 1 ISS-Ü gelten neben den Vorschriften des ISS-Ü auch der WRV und das WRÜ, das WHÜ und das WRegÜ. Die ISS ist damit in das allgemeine Weltraumrecht eingebunden. Jeder Partner registriert die von ihm bereitgestellten Elemente als Weltraumgegenstände. Dadurch behält er nach Art. 5 Abs. 2 ISS-Ü, Art. VIII WRV und Art. II WRegÜ die Hoheitsgewalt und die Kontrolle über die von ihm registrierten Elemente und über Mitglieder des Raumstationspersonals, die seine Staatsangehörigkeit besitzen. Diese Regelung setzt sich beim Eigentum fort. Die ISS-Partner bleiben nach Art. 6 Abs. 1 ISS-Ü Eigentümer der von ihnen bereitgestellten Elemente. Durch das Eingliedern der Stationselemente in die ISS entsteht daher kein Miteigentum. Somit ist die ISS zwar ein gemeinsames Vorhaben. Rechtlich bleibt sie aber ein polyterritoriales Gebilde.

Außerdem haben die ISS-Partner in Art. 9 ISS-Ü ein anteiliges Nutzungsregime für die eingebrachten Stationselemente vereinbart. Diese kann nicht jeder Partner beliebig nutzen. Vielmehr sieht Art. 9 Abs. 1 ISS-Ü vor, dass sich Nutzungsrechte aus der Bereitstellung von Nutzer- und Infrastrukturelementen herleiten. Der Partner, der viele Elemente in die ISS einbringt, hat also größere Nutzungsrechte hinsichtlich der von anderen Partnern bereitgestellten Elementen. Auf diese Weise werden etwa die Nutzungen von Forschungs- und Wohnmodulen miteinander verrechnet. Das durchaus komplizierte Nutzungsregime auf der ISS ist eine Folge der Multinationalität der Station einerseits und der erheblichen Ungleichartigkeit der Beiträge der ISS-Partner andererseits⁵⁰.

Nach Art. 11 Abs. 1 ISS-Ü ist jeder Partner berechtigt, qualifiziertes Personal zu stellen, das mit angemessenem Anteil als Mannschaft der Raumstation eingesetzt wird. Für die Besatzungen gilt nach Art. 11 Abs. 2 ISS-Ü ein

⁴⁹ Das Weltraumlabor "Columbus" wurde am 2.5.2006 in Bremen vom Unternehmen EADS an die ESA übergeben und soll Ende 2007 von Cape Canaveral, Florida, zur ISS transportiert werden, dazu: Europas Tonne im All, Süddeutsche Zeitung vom 3.5.2006, S. 24.

⁵⁰ Von Kries/Schmidt-Tedd/Schrogl (Fn. 8), S. 228.

48 Marcus Schladebach

von den ISS-Partnern vereinbarter Verhaltenskodex (Crew Code of Conduct). Er enthält nicht nur Verhaltensregeln, Verantwortlichkeiten und Befehlsstrukturen, sondern auch Sicherheitsregelungen und Geheimhaltungsvorkehrungen. Die ISS-Astronauten werden über ihre Anstellungsverträge auf die Einhaltung des Kodex verpflichtet. Besondere Auswahlkriterien sind für Besucher auf der ISS vereinbart worden. Bislang haben fünf Personen die ISS besucht, wozu sie nicht nur ein anspruchvolles Trainingsprogramm absolvieren, sondern mit ca. 20 Mio. \$ auch erhebliche finanzielle Mittel aufwenden mussten.

Hervorzuheben sind schließlich die Haftungsvorschriften der Art. 16 ff. ISS-Ü. Aufbau und Betrieb der ISS bergen große Risiken für Besatzung und Material. Dieser Umstand kann für die Kooperation der ISS-Partner hinderlich sein. Deshalb sieht Art. 16 Abs. 1 ISS-Ü einen umfassenden gegenseitigen Haftungsausschluss vor, der im Zweifel weit auszulegen ist. Von diesem Haftungsausschluss werden nicht nur der Partnerstaat selbst, sondern auch seine zugehörigen Stellen erfasst. Als solche gelten Auftragnehmer, Unterauftragnehmer, Nutzer oder Kunden eines Partnerstaates. Jedoch muss es sich um "geschützte Weltraumarbeiten" handeln. Dies sind nach Art. 16 Abs. 2 lit. f) ISS-Ü alle im Rahmen des ISS-Ü und seiner Durchführungsvereinbarungen ausgeführten Trägerfahrzeug-, Raumstations- und Nutzlasttätigkeiten auf der Erde, im Weltraum und auf dem Weg zwischen der Erde und dem Weltraum.

Für alle nicht von Art. 16 ISS-Ü geregelten Schadensfälle sieht Art. 17 Abs. 1 ISS-Ü vor, dass das WHÜ mit seinen differenzierten Haftungsregelungen weiterhin anwendbar bleibt. In diesem Zusammenhang ist auffällig, dass das ISS-Ü keine Bestimmungen über eine Aufgabe der ISS und ihre Rückführung aus dem Weltraum enthält⁵¹.

c) Kritik an der ISS

Neben den vielen wissenschaftlichen Erkenntnissen, die die Arbeit auf der ISS erbringt, sieht sich dieses internationale Großvorhaben auch erheblicher Kritik ausgesetzt. Insbesondere ihr großer Finanzierungsbedarf hat zum Teil Zweifel an dem Sinn der bis 2010 fertig zu stellenden Raumstation laut werden lassen⁵².

⁵¹ Von Kries/Schmidt-Tedd/Schrogl (Fn. 8), S. 232.

⁵² NASA-Chef *Michael Griffin* kritisierte, "die ISS sei nicht die Kosten, Risiken und Schwierigkeiten wert.", FAZ vom 28.9.2005.

III. Perspektiven des Weltraumrechts

1. Mondstation

Das Interesse am Mond erlebt gegenwärtig eine Renaissance als Zwischenstation auf dem Weg zum Mars. Die USA und Japan planen, ab 2020 bzw. 2030 eine Mondstation zu errichten, um von dort den Planeten Mars zu erkunden⁵³. Hiervon wird das Aneignungsverbot (Art. II WRV) berührt. Zwar lässt Art. IV Abs. 2 Satz 4 WRV die Benutzung jeglicher für die friedliche Erforschung des Mondes und anderer Himmelskörper notwendiger Ausrüstungen oder Anlagen ausdrücklich zu. Jedoch ist zu bedenken, dass die für eine solche Station notwendigen Gegenstände nach entsprechender Registrierung im Eigentum des Vertragsstaates bleiben (Art. VIII Satz 2 WRV) und weiterhin seiner Hoheitsgewalt und Kontrolle unterliegen (Art. VIII Satz 1 WRV). Dies führt zu der schwierigen Abgrenzungsfrage, bis zu welcher Schwelle es noch um eine grundsätzlich zulässige Nutzung des Mondes durch Errichtung aufwendiger Infrastruktur⁵⁴ geht und wo die Grenze zur verbotenen Aneignung "durch Beanspruchung der Hoheitsgewalt, durch Benutzung oder Okkupation" (Art. II WRV) verläuft⁵⁵.

2. Weltraummüll

Das gegenwärtig bedeutendste Umweltschutzproblem im Weltraum ist die Vermeidung von Weltraummüll. Rechtliche Regelungen hierzu fehlen bislang. Gründe dafür sind die hohen Kosten für Vermeidungsmaßnahmen und der bisher geringe Problemdruck. Einige Anknüpfungspunkte finden sich im Prinzip 21 der Stockholm-Deklaration von 1972, das mit dem Schutz staatsfreier Räume auch den Weltraum erfasst, und in der UN-Resolution 47/68 vom 14. Dezember 1992 über den Einsatz nuklearer Energiequellen an Bord von Satelliten. Ein Konventionsentwurf der ILA (1994)⁵⁶, ein Handbuch der ESA (2002)⁵⁷ und neuere Untersuchungen des UN-Weltraumausschusses (2007)⁵⁸ enthalten erste Lösungsansätze. Unter ihnen ist der Entwurf der ILA hervorzuheben, der sehr geeignet erscheint, einen internationalen rechtlichen Rahmen für die Behandlung von Weltraummüll zu schaffen.

⁵³ Jakhu, ZLW 2005, 243 ff.; Sarkissian, Space Policy 2006, 118 ff.

⁵⁴ Ryan/Kutschera, Space Policy 2007, 44 ff.

⁵⁵ Hierzu bereits früher Fasan (Fn. 23), S. 115 ff.; Fawcett (Fn. 11), S. 41; Bueckling, DRiZ 1977, 76 (77); ders., ZLW 1986, 202 (203).

⁵⁶ Böckstiegel, ZLW 1995, 29 ff.

⁵⁷ ESA Space Debris Mitigation Handbook, July 2002.

⁵⁸ UNCOPUOS, Bericht vom 6.3.2007, A/AC.105/890, S. 17 ff.

50 Marcus Schladebach

3. US-Weltraumstrategie von 2006

Von höchster Aktualität im Hinblick auf die militärische Nutzung des Weltraums ist die neue US-Weltraumstrategie vom Oktober 2006⁵⁹. Darin erklären die USA, dass sie alle künftigen Rüstungskontrollabkommen ablehnen werden, die der Bewegungsfreiheit der USA im Weltall schaden könnten. Nationen, die sich nicht amerikanischen Interessen gemäß verhielten, werde der Zugang zum Weltraum versperrt. Diese Absichten stehen in einem bemerkenswerten Widerspruch zu internationalen Gemeinschaftsprojekten, wie dem Aufbau der Internationalen Raumstation, bei dem die USA auf partnerschaftlicher Grundlage durchaus erfolgreich mit anderen Raumfahrtnationen zusammenarbeiten. Zudem haben auch die Pläne der USA, wegen der Bedrohung aus dem Iran bodengestützte Raketenabwehrsysteme in Polen und der Tschechischen Republik zu errichten, für Irritationen auf politischer Ebene gesorgt. Hinsichtlich der neuen US-Weltraumstrategie wird sich deshalb die Frage ihrer Vereinbarkeit mit Art. IV WRV stellen.

4. Weltraumtourismus

Weltraumtourismus ist bislang hauptsächlich durch die fünf Weltraumtouristen en 60 auf der Internationalen Raumstation ins öffentliche Bewusstsein getreten. Für diesen abgegrenzten Bereich haben sich die Raumstationspartner auf Auswahlkriterien für Weltraumtouristen verständigt⁶¹, die durch das Kriterium einer erheblichen finanziellen Leistungsfähigkeit (ca. 20 Mio. \$) zu ergänzen sind. Weltraumtourismus wird künftig indes stärker von privaten Raumfahrtunternehmen⁶² angeboten werden, deren Raumfähren sich nur für kurze Zeit im Weltraum aufhalten. Mit ca. 200000 \$ sollen diese Kurzzeitflüge ins Weltall um einiges kostengünstiger sein als die mehrtägigen Aufenthalte an Bord der Internationalen Raumstation. Dem Weltraumtourismus wird eine große wirtschaftliche Entwicklung vorausgesagt⁶³. Rechtsgrundlage der Kurzzeitflüge wird ein zivilrechtlicher Beförderungsvertrag zwischen dem Weltraumtouristen und dem Raumfahrtunternehmen sein. Der Vertrag

⁵⁹ Robinson, ZLW 2007, 45 ff.

⁶⁰ Dennis Tito (2001), Mark Shuttleworth (2002), Gregory Olsen (2005), Anousheh Ansari (2006), Charles Simonyi (2007).

⁶¹ Zur praktischen Vorbereitung siehe Charles Simonyi, Die Reise meines Lebens, FAZ vom 25.11.2006, Z 1.

⁶² Die bekanntesten Unternehmen sind Space Adventures, Virgin Galactic und Bigelow Aerospace.

⁶³ Billings, Space Policy 2006, 162 ff.; Loizou, Space Policy 2006, 289 ff.

wird nicht nur die finanzielle, sondern auch die körperliche Leistungsfähigkeit des Touristen zur Vertragsbedingung erklären.

5. Weltraumgesetz für Deutschland

Einige Staaten wie die USA, Großbritannien, Russland, die Ukraine, Australien und Japan haben bereits nationale Weltraumgesetze geschaffen. Sie sind nach Art. VI WRV erforderlich, wenn Privatunternehmen im Weltraum tätig werden wollen. Diese Tätigkeiten privater Akteure bedürfen nach Art. VI Satz 2 WRV der Genehmigung und ständigen Aufsicht durch den zuständigen Vertragsstaat. Mit einem Weltraumgesetz können sich die Staaten zudem von ihrer nach Art. VI WRV grundsätzlich unbeschränkten Haftung für private Weltraumaktivitäten zu einem bestimmten Teil befreien⁶⁴. In Deutschland existiert ein solches Gesetz bislang noch nicht. Deutschland braucht jedoch ein Weltraumgesetz, um der prosperierenden Weltraumwirtschaft einen sicheren rechtlichen Handlungsrahmen zu geben.

IV. Zusammenfassung

Um den Anforderungen von Gegenwart und Zukunft gerecht zu werden, muss das Weltraumrecht wirksame Antworten auf die derzeit drängenden Probleme des Weltraummülls, der Militarisierungsabsichten und der Zuteilung von Satellitenpositionen und Frequenzbereichen finden. Wie im Völkerrecht üblich, sind schnelle Lösungen nicht zu erwarten. Diese bekannte Einsicht ändert jedoch nichts an dem Befund, dass das Weltraumrecht schon früh zukunftsgerichtete Grundentscheidungen für die Erforschung und Nutzung des Weltraums getroffen und heute einen beachtlichen Entwicklungsstand erreicht hat. Seine zentrale Rechtsgrundlage, der Weltraumvertrag von 1967, stammt noch aus der Zeit des Kalten Kriegs, in der der Abschluss von derart bedeutenden multilateralen Verträgen nicht selbstverständlich war. Angesichts der enormen Entwicklungen der letzten Jahrzehnte bedarf er jedoch einer zeitgemäßen Fortschreibung. Mit seinen zahlreichen Errungenschaften ist der Weltraumvertrag maßgeblich dafür verantwortlich, dass das Weltraumrecht auf 50 erfolgreiche Jahre zurückblicken kann. Bei einer grundsätzlichen Offenheit gegenüber erforderlichen Novellierungen wird das Weltraumrecht auch die Herausforderungen von Gegenwart und Zukunft meistern.

⁶⁴ Gerhard, Nationale Weltraumgesetzgebung, 2002; Reifahrt, in: HdWR (Fn. 8), S. 823 ff.

52 Marcus Schladebach

Literaturverzeichnis

Bernhardt (Hrsg.), Encyclopedia of Public International Law (EPIL), 4 Bde. Den Haag 1992–2000.

Billings, Exploration for the masses? Or joyride for the ultra-rich? Prospects for space tourism, Space Policy 2006, 162 ff.

Bittlinger, Hoheitsgewalt und Kontrolle im Weltraum. Köln 1988.

Böckstiegel, Perspektiven der Entwicklung des Weltraumrechts bis zum Jahre 2000, in: Börner/Jahrreiß/Stern (Hrsg.), Einigkeit und Recht und Freiheit, Festschrift für Carstens, Bd. 1. Köln 1984, S. 307 ff.

Böckstiegel (Hrsg.), Handbuch des Weltraumrechts (HdWR). Köln 1991 (zitiert: Bearbeiter, in: HdWR).

Böckstiegel, ILA Draft Convention on Space Debris, Zeitschrift für Luft- und Weltraumrecht (ZLW) 1995, 29 ff.

Bödigheimer, Die Bemühungen um eine internationale Weltraum-Konvention (1957–1958), Europa-Archiv (EA) 1959, 172 ff.

Bueckling, Weltraumrecht im metarechtlichen Dilemma, Weltraumfahrt 1961, 133 ff.

Bueckling, Weltraumrecht – ein System aus völkerrechtlichem Soft-Recht?, Deutsche Richter-Zeitung (DRiZ) 1977, 76 ff.

Bueckling, Der Fluch der Generalklauseln, Zeitschrift für Rechtspolitik (ZRP) 1983, 190 ff.

Bueckling, Weltraumrecht: Rückschau – Orbitnahme – EG-Recht, Zeitschrift für Luftund Weltraumrecht (ZLW) 1986, 202 ff.

Cheng, Studies in International Space Law. London 1997.

Classen, Fernerkundung und Völkerrecht. Tübingen 1987.

Dauses, Die Grenze des Staatsgebietes im Raum. Berlin 1972.

Diederiks-Verschoor, An Introduction to Space Law. Den Haag 1993.

Fasan, Weltraumrecht. Mainz 1965.

Fawcett, Weltraumrecht. München 1970.

Gerhard, Nationale Weltraumgesetzgebung. Köln 2002.

Haley, Weltraumrecht und Recht außerhalb der Erde, Zeitschrift für Luftrecht (ZLR) 1957, 59 ff.

Harris/Harris, The need for air space and outer space demarcation, Space Policy 2006, 3 ff.

Hartwig, Über den gegenwärtigen Stand des Weltraumrechts, Neue Juristische Wochenschrift (NJW) 1962, 1593 ff.

Häuβler, Räume im Völkerrecht: Luft-, See- und Weltraumrecht im Überblick, Juristische Arbeitsblätter (JA) 2002, 817 ff.

Hobe, Die rechtlichen Rahmenbedingungen der wirtschaftlichen Nutzung des Weltraums. Berlin 1992.

Hobe/Kimminich, Einführung in das Völkerrecht, 8. Aufl. Tübingen 2004.

Hofmann, Der Weltraum in der Rechtsordnung, Bayerische Verwaltungsblätter (BayVBl.) 1978, 193 ff.

Ipsen, Völkerrecht, 5. Aufl. München 2004.

Jakhu, Twenty Years of the Moon Agreement: Space Law Challenges for Returning to the Moon, Zeitschrift f
ür Luft- und Weltraumrecht (ZLW) 2005, 243 ff.

Kadletz, Versicherung im Weltraum, Versicherungsrecht (VersR) 1996, 946 ff.

Von Kries/Schmidt-Tedd/Schrogl, Grundzüge des Raumfahrtrechts. München 2002.

Loizou, Turning space tourism into commercial reality, Space Policy 2006, 289 ff.

Von Münch, Grundfragen des Weltraumrechts, Archiv des Völkerrechts (AVR) 8 (1959/60), 151 ff.

Probst, Rechtliche Probleme des Raumflugs, Zeitschrift für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht (ZaöRV) 19 (1958), 637 ff.

Rehm, Die Bemühungen um eine internationale Weltraum-Konvention (1959–1961), Europa-Archiv (EA) 1962, 235 ff.

Rinck, Recht im Weltraum, Zeitschrift für Luft- und Weltraumrecht (ZLW), 1960, 191ff.
Robinson, The U.S. National Space Policy: Pushing the Limits of Space Treaties?,
Zeitschrift für Luft- und Weltraumrecht (ZLW) 2007, 45 ff.

Ryan/Kutschera, Lunar-based enterprise infrastructure, Space Policy 2007, 44 ff.

Sarkissian, Return to the Moon: A sustainable strategy, Space Policy 2006, 118 ff. Schladebach, Luftrecht. Tübingen 2007.

Schlindwein/Stampf, Die Eroberung des Himmels, Der Spiegel 39/2007, 178 ff.

Schwenk, Die Vereinten Nationen und der Weltraum, Vereinte Nationen (VN) 1963, 124 ff.

Simonyi, Die Reise meines Lebens, FAZ vom 25.11.2006, Z 1.

Stoffel, Das Haftungssystem des internationalen Weltraumrechts, Neue Juristische Wochenschrift (NJW) 1991, 2181 ff.

Strupp/Schlochauer (Hrsg.), Wörterbuch des Völkerrechts, 3 Bd., 2. Aufl. Berlin 1960–1962.

Vazquez, Cosmic International Law. Detroit 1965.

Wolter, Völkerrechtliche Grundlagen "Gemeinsamer Sicherheit" im Weltraum, Zeitschrift für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht (ZaöRV) 62 (2002), 941 ff.

Reinhard Rummel

Fünfzig Jahre Sputnik und fünfzig Jahre Vermessung des Gravitationsfelds der Erde mit Satelliten

Issac Newton stellte mit seinem universellen Gravitationsgesetz die geniale gedankliche Verbindung her zwischen dem freien Fall eines Apfels vom Baum und der Bewegung eines Satelliten um die Erde, vgl. Abb. 1.

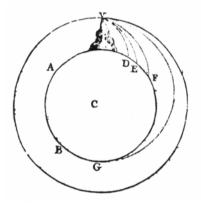


Abb. 1: aus Newtons "De mundi systemate" (1715)

Er wies uns damit den Weg, die Bewegung eines künstlichen Satelliten um die Erde als freien Fall einer Testmasse im Gravitationsfeld der Erde zu interpretieren. Wäre die Erde eine homogene Kugel, so wäre die Bahn des Satelliten eine perfekte Ellipse, wie sie mit den Keplerschen Gesetzen mathematisch beschrieben wird. In einem der beiden Brennpunkte der Ellipse befände sich das Zentrum der Erdkugel. Die Bahnebene der Ellipse stünde bezüglich des Fixsternhimmels unveränderlich im Raum. Betrachtet man eine abgeplattete Kugel – eine Form, die der Erdfigur sehr nahe kommt – so vollführt die Bahnebene eine langsame Kreiselbewegung im Raum; man spricht von der Präzession der Bahnebene. Aus der geschlossenen Ellipse

56 Reinhard Rummel

wird nun eine sich um die Erde "windende" Spirale. Für die wirkliche Erde, mit einer Vielfalt von Dichtevariationen im Inneren und an der Oberfläche des Erdkörpers, ist diese Spiralbewegung überlagert mit einem Gravitationssignal. Der Satellitenbewegung ist eine kontinuierliche Abfolge von kleinen oszillierenden Beschleunigungen und Verzögerungen aufgeprägt. Diese drei Fälle sind in Abb. 2 dargestellt.

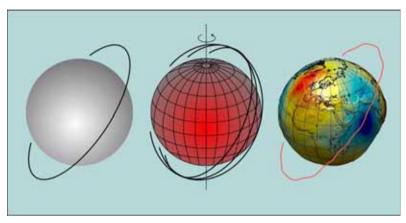


Abb. 2: Bahnbewegung um Kugel, abgeplattete Erde und wirkliche Erde

Der Start von Sputnik 1 am 4. Oktober 1957 bedeutete für die Geodäsie eine Zeitenwende. Erstmals konnte man eine wirklich globale und räumliche Vermessung der Erde ins Auge fassen. Bereits mit den Radiosignalen der Satelliten Sputnik-1 und Sputnik-2 gelang eine sehr genaue Bestimmung der Erdabplattung. In seinem Buch "A tapestry of orbits"(1992) beschreibt King-Hele, einer der Pioniere dieser ersten Jahre der Satellitengeodäsie, welch tiefgreifender Einschnitt dies für die klassische Erdmessung war.

Bis dahin beruhten die Ergebnisse der Erdmessung auf den berühmten Gradmessungen des 18. Jahrhunderts, gefolgt von der durch General Johann Jacob Baeyer 1861 (Baeyer, 1861) initiierten Verknüpfung der Gradmessungen zur mitteleuropäischen, dann europäischen und schließlich internationalen Bestimmung der Erdfigur. Es sei erwähnt, dass zur Realisierung dieses Vorhabens unter anderem das berühmte Preußische Geodätische Institut auf dem Telegrafenberg in Potsdam gegründet wurde. Es gelangte unter Friedrich Robert Helmert zu Weltruhm. Nach dem 2. Weltkrieg ging aus diesem Institut das Zentralinstitut für Physik der Erde (ZIPE) hervor, dessen Nachfolgeeinrichtung das heutige GeoForschungsZentrum (GFZ) ist.

Doch zurück zur Vermessung der Erde. Ein wesentlicher Parameter der Bestimmung der Erdfigur ist die Abplattung des bestanschließenden Ellipsoids. Die internationale Erdmessung ermittelte mit den Methoden der Triangulation und astronomischen Ortsbestimmung

den Wert f=1:297, wobei f=(a-b)/a mit der großen Halbachse a und der kleinen Halbachse b. Die beiden ersten künstlichen Erdsatelliten Sputnik-1 und Sputnik-2 ermöglichten die Bestimmung der Erdabplattung aus der Messung der bereits erläuterten Präzessionsbewegung, d.h. der Kreiselbewegung der Bahnebene im Raum. Das von King-Hele ermittelte Abplattungsglied J_2 der Reihendarstellung war $J_2=1084\cdot 10^{-6}$ und die daraus berechnete geometrische Abplattung ergab f=1:298. Dieser Wert hat sich bis heute nur unwesentlich verbessern lassen; er ist nun 1/298.257, vgl. (King-Hele, 1992, S. 39).

Auch noch heute wird dieser Ansatz, leicht modifiziert und wesentlich genauer eingesetzt, nun aber zur Bestimmung der zeitlichen Veränderung der Erdabplattung. Dazu werden primär die passiven, d.h. nur mit Laserreflektoren ausgestatteten Satelliten LAGEOS-1 und -2 verwendet. Aus der Laufzeitmessung von Laserpulsen lässt sich deren Bahn zentimetergenau rekonstruieren. Die Messreihen von 1979 bis 2001 zeigen eine konstante Abnahme der Erdabplattung von 2.9 · 10⁻¹¹, sehr wahrscheinlich verursacht durch den langsamen isostatischen Massenausgleich im Erdmantel als Reaktion auf das relativ schnelle Abschmelzen der Eisschilde in den polnahen Gebieten nach der letzten Eiszeit. Nur in den zurückliegenden sechs Jahren zeigte sich eine Umkehr dieses Trends. Sie muss mit größeren Massenverschiebungen im Erdsystem zusammenhängen und ist daher sehr wichtig zum Verständnis der viel diskutierten Klimaänderungen. Denkbare Ursachen wären Abschmelzprozesse der Eisschilde, Veränderungen der Meereszirkulation, atmosphärische Massenverlagerungen, Verlagerungen im globalen Wasserkreislauf oder aber Prozesse im Erdkern. Abschließende Erklärungen stehen noch aus, siehe (Cox & Chao, 2002; Dickey u.a., 2002; Cazenave & Nerem, 2002).

Soviel zur Bestimmung der Erdabplattung und ihrer zeitlichen Veränderungen, die mit Sputnik ihren Anfang nahm. Weit langwieriger gestaltete sich die "Entzifferung des Gravitationskodes", d.h. die globale Bestimmung der Variationen des Gravitationsfeldes der Erde aus Messungen der Bahnunregelmäßigkeiten. Bis zum Jahr 2000 musste sich die Wissenschaft mit einem komplizierten Flickwerk begnügen. Die von einer großen Anzahl von Observatorien durchgeführten Messreihen zu sehr unterschiedlichen Satelliten

58 Reinhard Rummel

wurden in einem aufwändigen Rechenprozess kombiniert. Es entstanden relativ realistische Modelle der Geoidfigur und der räumlichen Variationen der Erdanziehung; Beispiele sind das amerikanische Modell EGM96 (Lemoine u.a., 1998) und das deutsch-französische Model GRIM5 (Gruber u.a., 2000).

Mit dem erfolgreichen Start des vom GeoForschungsZentrum auf dem Telegrafenberg initiierten deutschen Kleinsatelliten CHAMP begann 2000 eine neue Ära in der Satellitengravimetrie. CHAMP ist einerseits mit einem GPS-Empfänger geodätischer Präzision und andererseits mit einem sehr empfindlichen Beschleunigungsmesser ausgestattet. Der GPS-Empfänger ermöglicht die kontinuierliche und dreidimensionale Bahnverfolgung mit Zentimetergenauigkeit. CHAMP umkreist die Erde in einer Höhe von nur 450 km, d.h. sehr nahe an den anziehenden Massen des Erdsystems, vgl. Abb. 3.

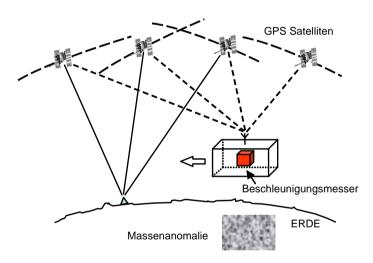


Abb. 3: Prinzip CHAMP: GPS und Akzelerometer

Die GPS-Satelliten in einer Höhe von ca. 20000 km sind in ihrer Bahnbewegung von den Massenunregelmäßigkeiten der Erde weitgehend unbeeinflusst. Damit lässt sich aus großer Höhe mit den Satelliten des Global Positioning Systems das Gravitationssignal des erdnahen CHAMP perfekt abtasten. Der Beschleunigungsmesser ist im Zentrum des Satelliten gelagert und ermöglicht die Messung der auf die Satellitenhülle einwirkenden Störeinflüsse der Restatmosphäre. Somit lassen sich Störeinflüsse der Atmosphäre von den rein gravitativen Bahnsignalen trennen. Mit den Daten nur dieses einen Satelliten

entstanden globale Schwerefeldmodelle einer vollkommen neuen Qualität, z.B. (Reigber u.a, 2002) oder (Gerlach, u.a., 2003).

Dennoch bleibt auch bei diesem Ansatz das aus dem Newtonschen Gravitationsgesetz folgende Hindernis jeder Form von Gravitationsfeldbestimmung mit Satelliten erhalten: Die Anziehungswirkung von Massen des Erdsystems klingt mit dem Quadrat des Abstands ab. Daher entstanden schon in den siebziger Jahren Überlegungen zu differentiellen Verfahren, (Williamstown Study, 1969), die sich jedoch erst in neuester Zeit technologisch umsetzen lassen. Der Grundgedanke ist dabei, die gravitative Relativbewegung zwischen Testmassen im Orbit zu messen und damit über differentielle Messungen das quadratische Abklingverhalten wenigstens teilweise zu kompensieren. Das erste Experiment dieser Art ist die amerikanische Satellitenmission GRACE, an der das GFZ maßgeblich beteiligt ist. Zwei CHAMP-artige Satelliten, ausgestattet mit GPS und Beschleunigungsmesser, folgen einander in der gleichen Umlaufbahn in einem Abstand von circa 200 km, vgl. Abb. 4.

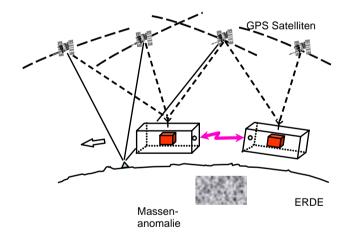


Abb. 4: Prinzip GRACE: Abstandsmessung zwischen zwei sich folgenden Satelliten

Mit einem Mikrowellenverfahren werden die Variationen des Abstands mikrometergenau gemessen. Dieser Ansatz entspricht der Messung der Gravitationsdifferenz zweier im Abstand von 200 km im Gravitationsfeld der Erde frei fallender Massen. Diese äußerst empfindlichen Messungen gestatten erstmals die Bestimmung der zeitlichen Veränderungen, nicht nur der Abplattung, sondern des ganzen Schwerefeldes der Erde. Sie werden zum Beispiel

60 Reinhard Rummel

hervorgerufen durch die jahreszeitlichen Variationen im globalen Wasserkreislauf oder durch das Abschmelzen der polaren Eiskappen. Sie sind daher von großer Bedeutung für die Erforschung der globalen, klimabedingten Veränderungen im Erdsystem, vgl. zum Beispiel (Chen u.a., 2005; Velicogna u.a., 2005; Chambers, 2006).

Ein zu GRACE alternativer Ansatz ist die Gravitationsgradiometrie im Satelliten. Sie wird mit dem Start der Mission GOCE der europäischen Raumfahrtagentur ESA im Frühjahr 2008 erstmals erprobt werden, siehe (ESA, 1999 und Johanessen u.a., 2003) und Abb. 5.



Abb. 5: GOCE im Testlabor (Dank an ESA)

Dabei werden sechs Beschleunigungsmesser zu einem Instrument vereinigt. Im Abstand von 50 cm und paarweise entlang von drei orthogonalen Achsen angeordnet, messen sie sehr kleine Differenzen der Gravitationsanziehung der Erde. Die maximal auftretenden Gravitationsbeschleunigungen betragen weniger als ein Millionstel der Anziehung auf der Erde. Ihre genaue Messung erfolgt mit einer äußerst empfindlichen Messapparatur. Die Nutzung dieser differentiellen Messgrößen erfordert eine extrem niedrige Erdumlaufbahn, eine genaue Kontrolle der Satellitenbewegung und ein starres und temperaturkonstantes Satellitengehäuse. Die Erwartung ist, mit dieser Mission die Geoidoberfläche, d.h. die geometrische Form der Niveaufläche (Horizontalfläche) auf Meereshöhe zentimetergenau zu vermessen. Die wissenschaft-

lichen Anwendungen reichen von Untersuchungen der globalen Ozeanzirkulation, über die Erfassung der Dynamik der Lithosphäre und des oberen Erdmantels, zu Analysen der Veränderung des Meeresspiegels und der Vereinheitlichung der weltweiten geodätischen Höhensysteme.

Mit dem Start von Sputnik-1 1957 trat die Menschheit in ein neues technologisches Zeitalter ein. Die moderne Kosmologie, Solarphysik, Planetologie und Erdsystemforschung wären ohne Satelliten nicht mehr denkbar. Die Geodäsie wurde mit den Raumverfahren wirklich global und dreidimensional. Mit den technischen Fortschritten der jüngsten Jahre eroberte die Geodäsie zudem die Koordinate "Zeit" als vierte Dimension. Erdgestalt, Gravitationsfeld und Rotation der Erde wurden in ihrer räumlichen und zeitlichen Dynamik erfassbar; sie sind heute wichtige Indikatoren bei der Erforschung des Erdsystems.

Literatur

- Baeyer, J.J. (1861): Über die Größe und Figur der Erde. Georg Reiner Verlag, Berlin. Cazenave, A., R.S. Neren (2002): Redistributing Earth's Mass. Science, 297, 783-784.
- Chambers, D.P. (2006): Observing seasonal steric sea level variations with GRACE and satellite altimetry. Journal of Geophysical Research, Vol. 111, C03010, doi: 10.1029/2005JC002914.
- Chen, J.L., M. Rodell, C.R. Eilson and J.S. Famiglietti (2005): Low degree spherical harmonic influences on Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) water storage estimates. Geophysical Research Letters, Vol. 32, L14405, doi: 10.1029/2005GL022964.
- Cox, C.M., B.F. Chao (2002): Detection of a large-scale Mass Redistribution in the Terrestrial System since 1998. Science, 297, 831.
- Dickey, J.O., S.L. Marcus, O. de Viron, I. Fukumori (2002): Recent Earth Oblateness Variations: Unraveling Climate and Postglacial Rebound Effects. Science, 298, 1975-1977.
- ESA (1999): *Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Mission*. Reports for Mission Selection, SP-1233 (1), ESA Publication Division, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, (web site http://www.esa.int./livingplanet/goce).
- Gerlach, C., L. Földvary, D. Svehla, Th. Gruber, M. Wermuth, N, Sneeuw, B. Fromm-knecht, H. Oberndorfer, Th. Peters, M. Rothacher, R. Rummel, P. Steigenberger (2003): A CHAMP-only gravity field model from kinematic orbits using the energy integral. Geophysical Research Letters 30 (20).
- Gruber, Th., A. Bode, Ch. Reigber, P. Schwintzer, G. Balmino, R. Biancale, J.-M. Lemoine (2000): GRIM5-C1. Combination solution of the global gravity field to degree and order 120, Geophysical Research Letters, Vol. 27, No. 24, 4005-4008.

62 Reinhard Rummel

Johannessen, J.A., G. Balmino, C. LeProvost, R. Rummel, R. Sabadini, H. Sünkel, C.C. Tscherning, P. Visser, P. Woodworth, C.H. Hughes, P. Legrand, N. Sneeuw, F. Perosanz, M. Aguirre-Martinez, H. Rebhan and M.R. Drinkwater (2003): The European gravity field and steady-state ocean circulation explorer satellite mission: its impact on geophysics. Surveys in Geophysics 24: 339-386.

- King-Hele, D. (1992): A Tapestry of Orbits. Cambridge Univ. Press.
- Lemoine, F.G., S.C. Kenyon, J.K. Factor, R.G. Trimmer, N.K. Pavlis, D.S. Chinn, C.M. Cox, S.M. Klosko, S.B. Luthcke, M.H. Torrence, Y.M. Wang, R.G. Williamson, E.C. Pavlis, R.H. Rapp and T.R. Olson (1998): *The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96*.
- Reigber, C., G. Balmino, P. Schwintzer, R. Biancale, A. Bode, J.M. Lemoine, R. Koenig, S. Loyer, H. Neumayer, J.C. Marty, F. Barthelmes, F. Perosanz, S.Y. Zhu (2002): A high quality global gravity field model from CHAMP GPS tracking data and accelerometry (EIGEN-1S). Geophysical Research Letters 29 (14).
- Velicogna, I., J. Wahr, E. Hanna, P. Huybrechts (2005): Short term mass variability in Greenland, from GRACE. Geophysical Research Letters, Vol. 32, L05501, doi: 10.1029/2004GL021948.
- Williamstown Study (1969): *The Terrestrial Environment Solid-Earth and Ocean Physics*. Application of Space and Astronomic Techniques, Cambridge.

Dietrich Spänkuch

Fernerkundung der Erde - Hiobsbotschaften aus dem All

1. Einleitung

Der Anblick unseres Planeten aus dem Weltraum ist, so berichten Kosmound Astronauten ohne Ausnahme, von atemberaubender Schönheit. Dennoch können diese Momentaufnahmen der Erde nicht darüber hinwegtäuschen, dass unser Planet ernsthafte und schwerwiegende Probleme hat. Die Fernerkundung der Erde ist noch nicht einmal 50 Jahre alt, systematisch begann sie eigentlich erst 1972 mit dem Earth Resources Technology Satellite-1 (ERST-1), der später, 1975, in Landsat-1 umbenannt wurde. Und doch reicht diese kurze Zeitspanne bereits für einige unerfreuliche und z.T. beängstigende Nachrichten. Nun kann man natürlich geteilter Meinung sein, was eine Hiobsbotschaft ist. Es gibt zahlreiche negative Umweltveränderungen, wie Abholzung tropischer Regenwälder, Wüstenausdehnung u.a., deren globale Ausmaße erst durch die Fernerkundung mittels Satelliten in erschreckender Weise sichtbar werden. In ihrer Gesamtheit kann man sie sicher als Hiobsbotschaft bezeichnen. Zwei singuläre Fälle, die hier diskutiert werden, waren oder sind für sich allein aber schon eine Hiobsbotschaft. Die Entdekkung des antarktischen Ozonlochs (Beispiel 1) geschah gerade noch rechtzeitig, um wirksame Maßnahmen zur Eindämmung negativer Einwirkungen auf die Umwelt einzuleiten. Ob dies auch beim beobachteten Anstieg des Meeresspiegels gelingen wird, wird die Zukunft zeigen.

2. Das antarktische Ozonloch

Das antarktische Ozonloch – Werte des Gesamtozongehalts unter 200 Dobsoneinheiten (DU)¹ – wurde zuerst nicht von Satelliten festgestellt. Es waren

Zu Ehren des Pioniers der atmosphärischen Ozonforschung, des Briten Sir G.M.B. Dobson (1889–1976) benannte Maßeinheit des Gesamtozongehalts, der sich in einer senkrechten Säule über einen Ort bei Normalbedingungen (1024 hPa und 273 °K) befindet. 1 DU entspricht 0,01mm Schichtdicke Ozon.

Wissenschaftler des British Antarctic Survey (Farman u.a. 1985), die aus ihren Messungen an der antarktischen Station Halley Bay (75°35'S, 29°39'W) auf dieses Phänomen hinwiesen, das seit Ende der 70er Jahre regelmäßig im antarktischen Frühiahr auftritt². Werte unter 200 DU waren nie zuvor nur annähernd gemessen worden³. Die NASA hatte deshalb in ihrer Datenbearbeitung Werte unter 180 DU, weil höchst unwahrscheinlich, als fehlerhafte Daten gekennzeichnet und deshalb nicht weiter bearbeitet (Roan 1989, S. 128). Diese Entscheidung ist durchaus nachvollziehbar, basierten die Satellitenmessungen des Gesamtozongehalts, die seit 1978 mit dem Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) von Nimbus-7, dem ersten Satelliten der NASA zur globalen Umweltüberwachung, vorgenommen wurden, auf Messungen des von der Atmosphäre zurück gestreuten Sonnenlichts im UV-Bereich⁴. In der Polarnacht fielen somit keine Messungen an und zu Beginn des Frühighrs sind die zu messenden Intensitäten in hohen Breiten gering und wegen der schräg stehenden Sonne auch mit größeren Unsicherheiten behaftet. Auch Farman zögerte mit seiner Veröffentlichung ungewöhnlich lange, war doch die Abnahme des Ozongehalts in den Daten mindestens seit 1978 nicht zu übersehen. Auch er zweifelte zunächst an der Richtigkeit seiner Messungen⁵, – die Bodenmessungen beruhen ebenfalls auf Messungen im UV⁶ –, und vielleicht war es erst der Vortrag des Japaners Chubachi (1985), der auf

² Die Station Halley Bay wurde im Rahmen des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957 eingerichtet. Seit dieser Zeit werden an dieser Station fortlaufend Ozonmessungen durchgeführt.

An der japanischen Station Kagoshima (32°N, 131°E) wurden im Dezember/Januar 1960/61 an 9 Tagen Werte unter 200 DU gemessen. Zweifel an einer adäquaten Eichung des Geräts (es wurde 1963 ersetzt) lassen diese Messungen als fraglich erscheinen (Rood 1986). Weltweit wurden in den frühen 60er Jahren relativ niedrige Gesamtozonwerte als Folge einer außerordentlich starken Quasibiennial Oscillation (QBO: annähernd zweijährige Schwingung des zonalen Windes in der unteren und mittleren Atmosphäre der Tropen) registriert (Angell und Korshover 1973).

In der älteren Literatur, so in der ersten geographischen Isoplethendarstellung des atmosphärischen Gesamtozongehalts (Götz 1949) werden Werte von 150 DU in den Tropen und

sphärischen Gesamtozongehalts (Götz 1949) werden Werte von 150 DU in den Tropen und im Jahresgang von Tromsö im Dezember/Januar ebensolche niedrigen Werte angegeben. Sie finden sich verbreitet bis weit in die 70er Jahre in Textbüchern und Monographien, basieren aber auf veralteten Ozonabsorptionskoeffizienten.

TOMS ist ein Fastie-Ebert-Spektrometer mit sechs Spektralkanälen im UV-Bereich von

⁴ TOMS ist ein Fastie-Ebert-Spektrometer mit sechs Spektralkanälen im UV-Bereich von 312,5 bis 380 nm, das senkrecht zur Bahnrichtung des Satelliten gescannt wird und tägliche Messungen des Gesamtozongehalts der von der Sonne beschienenen Atmosphäre bis zu Zenitdistanzen der Sonne von 88° bei einer horizontalen Auflösung von 50 km in Nadirrichtung bis 250 km bei maximalem Scanwinkel liefert.

Roan (S. 124) berichtet, dass Farman noch 1982 einen Fehler des Messgeräts vermutete.

⁶ In der Polarnacht kann nur das Mondlicht an geeigneten Tagen zur Messung des Gesamtozongehalts benutzt werden.

dem Internationalen Ozonsymposium im September 1984 in Halkidiki, Griechenland, über niedrige Ozonwerte um 210 DU an der japanischen Antarktisstation Syowa Station (69° S, 39°35' E)⁷ im antarktischen Frühiahr berichtete, der den letzten Anstoß zu Farman's Veröffentlichung gab. Die Nachbereitung der Satellitenmessungen (Stolarski u.a. 1986) zeigte deutlich. dass die niedrigen Ozonwerte keineswegs ein lokales Phänomen waren und sind sondern im antarktischen Frühjahr kontinentales Ausmaß einnehmen. Es war dieser Befund - von keiner Modellrechnung vorhergesagte extrem niedrige Gesamtozonwerte kontinentalen Ausmaßes in einer entfernten Region -, der die bis dato eher schleppend laufenden internationalen Bemühungen zum Schutze der Ozonschicht in wirksame, konkrete, abrechenbare Schritte vorantrieb. Zwar war im März 1985 einige Wochen vor Farman's Veröffentlichung die Wiener Konvention zum Schutz der Ozonschicht als politische Willenskundgebung verabschiedet worden, das Problem der Gefährdung der Ozonschicht weiter zu verfolgen, bindende Zusagen zur Reduzierung Ozon zerstörender Substanzen gab es aber nicht. Die Wiener Konvention war eine Absichtserklärung der 21 Teilnehmerstaaten, die sich lediglich zu Forschung, systematischer Beobachtung und Informationsaustausch verpflichteten. Die potentiellen Substanzen für eine Gefährdung der Ozonschicht, darunter auch die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), waren nur in einem Anhang aufgeführt (Benedick 1998, S. 45). Dieser ernüchternde Output der Wiener Konvention veranlasste die US Environmental Protection Agency (EPA) gerade wegen der neuen Erkenntnisse des antarktischen Ozonlochs im Januar 1986 zu ihrem Stratospheric Ozone Protection Plan⁸, da die Wiener Konvention ",had failed to agree on any appropriate global control measures" (Roan S. 141ff). Sicher hat das Auffinden des antarktischen Ozonlochs zu einer Beschleunigung der entsprechenden internationalen Verträge zum Schutze der Ozonschicht geführt⁹, es dauerte aber immerhin noch 7 Jahre, bis 1992, dem Kopenhagen Amendment zum Montreal Protokoll, das zu einer wirksamen Reduzierung der atmosphärischen Chlorkonzentration führte¹⁰.

Was aber wäre ohne wirksame internationale Übereinkommen geschehen? Eine weitere Verzögerung um nur 10 Jahre hätte zu einem permanenten

⁷ Auch die japanische Station Syowa wurde zum Internationalen Geophysikalischem Jahr 1957 eingerichtet.

⁸ In einer Serie internationaler Workshops sollten weiterführende Entscheidungen zu FCKW-Emissionen gefunden werden.

⁹ Siehe hierzu Benedick (1998), Spänkuch (2008)

¹⁰ Die kritische Chlorkonzentration für das Auftreten des antarktischen Ozonlochs beträgt 2 ppbv (Prather u.a. 1996, Solomon 1999)

antarktischem Ozonloch im ganzen 21. Jahrhundert und bereits im Jahr 2000 zu einer globalen Ozonabnahme von etwa 10% gegenüber den aufgetretenen 4% im Jahresdurchschnitt geführt (Prather et al. 1996). Nach starken Vulkanausbrüchen wäre es zudem vor allem in mittleren und niederen Breiten zu erheblichen Ozonreduzierungen gekommen (Brasseur et al. 1990, Prather 1992, Tie und Brasseur 1995), die die nach den Eruptionen von Agung 1963, El Chichon 1982 und Pinatubo 1992 über Europa beobachteten Ozonreduktionen von 5% nach Agung und El Chichon und von 8% nach dem Ausbruch des Pinatubo wegen der dann noch höheren atmosphärischen Chlorkonzentration bei ähnlich starken Vulkaneruptionen übertroffen hätten [1] (Angell 1997). Das Alarmsignal des British Antarctic Service, mannigfach verstärkt durch die Nimbus-Satellitenmessungen, schrillte gerade noch fünf vor zwölf (Tab. 1).

- permanentes Ozonloch im antarktischem Frühjahr
- verstärktes Auftreten von Ozonlöchern im arktischen Frühjahr
- globale Ozonabnahme > 10%
- weitere Ozonabnahme > 10% nach starken Vulkaneruptionen für mehrere Jahre

Tab. 1: Ozonentwicklung im 21. Jahrhundert bei Verzögerung um 10 Jahre

3. Anstieg des Meeresspiegels

Aussagen über Meeresspiegeländerungen basierten vor dem Satellitenzeitalter auf geologischen Befunden und seit etwa einhundert Jahren auf Pegelmessungen längs der Küsten. Erst mit dem Raumzeitalter ergab sich die Möglichkeit der globalen Messung des Meeresspiegels und seiner Änderung. Präzise Messungen des Meeresspiegels liegen aber erst seit 1992 vor, als mit dem Start von TOPEX/POSEIDON, einem Gemeinschaftsprojekt der NASA und CNES, das Zeitalter der Satellitenaltimetrie hoher Präzision begann, das mit dem Start von Jason-1 im Jahre 2001 fortgesetzt wurde (Cazenave und Nerem 2004). Nach diesen Messungen stieg der Meeresspiegel im Zeitraum

Bei natürlicher Chlorkonzentration nimmt das stratosphärische Ozon nach Vulkaneruptionen nicht ab sondern zu, da die Ozon zerstörenden Stickoxide (insbesondere N₂O₅) durch heterogene Prozesse an den stratosphärischen Sulfatpartikeln in inaktives HNO₃ überführt werden (Tie und Brasseur). Im Gegensatz hierzu wird bei hohen Chlorkonzentrationen inaktives ClONO₂ an den Aerosolpartikeln in HOCl überführt, das bei Sonneneinstrahlung durch Fotolyse Cl-Radikale erzeugt.

von 1993 bis 2003 im globalen Mittel um 3,1 cm und war damit deutlich höher als aus den Pegelmessungen mit 1 bis 2 cm/Dekade abgeleitet worden war und auch deutlich höher als in den letzten 6000 Jahren (siehe Tab. 2, Abdalati 2007). Neuere Ergebnisse zeigen eine weitere Verstärkung des Anstiegs, der den durch Modelle vorhergesagten Anstieg wesentlich übertrifft (Rahmstorf et al. 2007).

Tab. 2: Globale Meeresspiegeländerungen in verschiedenen Zeit-räumen (nach Abdalati 2007, ergänzt)

Die Meeresspiegelvariationen sind aber keineswegs einheitlich (Cazenave und Nerem). Es gibt wesentlich größere Anstiege, so im westlichen Pazifik und östlichem Indischen Ozean mit Maximalwerten größer als 10 mm/Jahr an der West- und Nordküste Australiens und bei Indonesien, während im östlichen Pazifik und westlichem Indischen Ozean der Meeresspiegel im Zeitraum von 1993 bis 2003 um 5 mm/Jahr gefallen war.

Nun ist es angesichts der kurzen Zeitreihe und in Anbetracht der großen thermischen Trägheit des Ozeans zum gegenwärtigen Zeitpunkt natürlich verfrüht von einer Hiobsbotschaft zu sprechen, zumal die Meeresspiegeländerungen von Jahrzehnt zu Jahrzehnt starken Schwankungen unterliegen können (Cazenave und Nerem). Es kann aber als gesichert angenommen werden, dass der Meeresspiegel in diesem Jahrhundert auf Grund der steigenden Erderwärmung und wegen der bereits erwähnten thermischen Trägheit des Ozeans weiter ansteigen wird. Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesrepublik Globale Umweltveränderungen (WBGU) hat bei Abwägung der Konsequenzen eines Meeresspiegelanstiegs (verstärkte Küstenerosion, höheres Auflaufen von Sturmfluten, Versalzen von Grundwasser in meeresnahen Gebieten, u.a.) eine Leitplanke definiert, die, will man unvertretbar hohe Schäden für Mensch und Natur vermeiden, nicht überschritten werden sollte. Danach sollte der Meeresspiegelanstieg ständig unter 5 mm/Jahr liegen und ein Anstieg um mehr als 1 m generell vermieden werden (WBGU 2006). Aber bereits bei einem Anstieg um 1 m sind die Mündungsgebiete vieler großer Ströme (Mississippi, Po, Nil, Ganges-Brahmaputra, Mekong, u.a.) mit z.T. hoher Bevölkerungsdichte von Überflutung bedroht ¹², zumal in den Deltagebieten dieser Effekt durch natürliche Landsenkung mit Absenkraten bis zu 10mm/Jahr noch weiter verstärkt wird (Ericson et al. 2006). Bei einem Anstieg um 1 m wären mehr als 100 Millionen Menschen unmittelbar betroffen (Douglas und Peltier 2002, Nicholls et al. 2006), in Europa etwa 8 Millionen und in Deutschland etwa 1,5 Millionen¹³ (siehe Tab. 3). Der zweite Parameter der WBGU-Leitplanke (Anstieg >5 mm/Jahr) wurde bereits in einigen Gebieten des Weltmeeres überschritten.

Land	gefährdete Bevölkerung	
	bei 1 m	bei 5 m
Dänemark	155 000	501 000
Deutschland	1 565 000	2 866 000
Niederlande	5 139 000	7 717 000
Polen	345 000	556 000
Belgien	262 000	1 071 000
Frankreich	80 000	276 000
Russland	91 000	156 000
Norwegen	1 000	8 000
Schweden	33 000	177 000
Großbritannien	372 000	1 562 000
Total	8 043 000	14 890 000

Tab. 3: Gefährdete Küsten Europas bei Meeresspiegelanstieg (nach Nicholls u.a. 2006)

Etwa die Hälfte des Anstiegs wird für den Zeitraum 1993 bis 2003 der thermischen Ausdehnung des Meerwassers durch steigende Temperatur zugeschrieben (thermosterischer Effekt) (Antonov u.a. 2005). Dieser Anstieg, der gegenwärtig nur durch direkte hydrographische Messungen bestimmt werden kann, schwankt sowohl beträchtlich von Jahrzehnt zu Jahrzehnt mit Perioden stärkeren Anstiegs in den frühen 70er und Mitte der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts als auch regional. Potenziell kann der Meeresspiegel durch thermische Ausdehnung nur um 1 bis 2 m steigen (Tab. 4), bis 2300 wird nach den Klimaszenarien allein durch die thermische Ausdehnung ein Anstieg zwischen 0,4 und 0,9 m erwartet (WBGU 2006, S. 38).

¹² Sehr gutes Bildmaterial siehe unter http://hamburger-bidungsserver.de/klima/klimafolgen/meeresspiegel/ (gelesen am 16.8.2007)

¹³ Vielfach mehr Menschen werden als Folge globaler Erwärmung durch Wasserknappheit und Malaria betroffen sein (Parry et al. 2001).

Die halosterische Ausdehnung¹⁴ – Volumenänderung des Meerwassers durch Verringerung des Salzgehalts –, induziert z.B. durch Schmelzen von Meereis, wird mit etwa 10% des thermosterischen Effekts im Allgemeinen. als vernachlässigbar angesehen (Abdalati). So trug das spektakuläre Abbrechen des Jahrtausende alten Larsen-B-Eisschelfs vor der antarktischen Halbinsel (WBGU S.35) nur zu einem Anstieg von 0,07 mm/Jahr bei. Bedenklicher ist da schon der nach dem Abbrechen des Eisschelfs bis um das Achtfache beschleunigte Abfluss des Kontinentaleises (Rignot u.a. 2004, Scambos u.a.2004).

	Meeresspiegelanstieg (mm/Jahr)		
Beitrag	1961-2003	1993-2003	potentiell (m)
Thermische Ausdehnung ¹	$0,42 \pm 0,12$	$1,6 \pm 0,5$	1–2
Gletscher und Eiskappen	$0,50 \pm 0,18$	$0,77 \pm 0,22$	~ 0,5
Grönland	0.05 ± 0.12	$0,21 \pm 0,07$	7
Antarktis	$0,14 \pm 0,41$	$0,21 \pm 0,35$	65
Summe alle Beiträge	$1,1 \pm 0,5$	2.8 ± 0.7	~73,5
Beobachtet	$1,8\pm0,5$	$3,1\pm0,7$	
Differenz (beob. – Summe)	0.7 ± 0.7	$0,3 \pm 1,0$	

¹ bezogen auf die Schicht 0 bis 3000 m

Tab. 4: Geschätzte Beiträge zum Meeresspiegelanstieg für 1961 bis 2003 und 1993 bis 2003 (nach Bindoff u.a. 2007) und poten-tielle Beiträge (nach Abdalati 2007, ergänzt)

Tabelle 4 enthält auch die weiteren wesentlichen Beiträge für 1961 bis 2003 und 1993 bis 2003 aus der letzten Einschätzung des IPCC (Bindoff u.a. 2007). Im Zeitraum 1961 bis 2003 war der durch kontinentale Gletscher und Eiskappen bedingte Anstieg mit etwa 5 mm/Jahrzehnt von gleicher Größenordnung wie der durch thermische Expansion bedingte. Beide Anteile haben im letzten Jahrzehnt deutlich zugenommen, der thermosterische Anstieg um mehr als das Dreifache, der durch die kontinentalen Gletscher bedingte um mehr als 50%. Der Beitrag der polaren Eisschilde, obwohl im letzten Jahrzehnt insbesondere in Grönland (um das Vierfache) beträchtlich angewachsen, ist mit gegenwärtig etwa 10 bis 15% nur mäßig. Auch für die nächsten einhundert Jahre wird mit keinem wesentlichen Beitrag der polaren Eisschilde gerechnet (Alley u.a. 2005).

¹⁴ Auch die halosterische Ausdehnung ist räumlich und zeitlich sehr inhomogen.

Allerdings berücksichtigen diese Untersuchungen nicht die eisdynamischen Effekte, die sich gerade in den letzten Jahren in dramatischer Weise verstärkt haben. Die diesbezüglichen Vorhersagen sind daher nur von begrenzter Aussagekraft (Shepherd und Wingham 2007). Die Gefahr eines ständig schrumpfenden und schließlich gänzlich verschwindenden grönländischen Eisschilds ist bei weiterer steigender Erderwärmung durchaus gegeben (Alley u.a.).

IPPC (2007)	0,5-1,2 m, aber keine Berücksichtigung eisdynami-
	scher Prozesse
Rahmstorf (2007)	0,5–1,4 m, halbempirischer Ansatz

Tab. 5: Projizierter Meeresspiegelanstieg bis 2100

Wie und mit welchem Betrag der Meeresspiegel zukünftig ansteigen wird, lässt sich nicht mit Sicherheit voraussagen. Dies hängt wesentlich von der zukünftigen Entwicklung der Emissionsraten der Treibhausgase ab, aber auch von der Reaktion der Eisschilde auf höhere Temperaturen. Rahmstorf (2007) leitete aus den im 20. Jahrhundert beobachteten Änderungen von globaler Temperatur in Erdbodennähe und Meeresspiegelanstieg eine Proportionalitätskonstante von 3,4 mm/Jahr und K ab. Für den geschätzten Temperaturanstieg ergibt sich daraus für das Jahr 2100 ein Wert von 0,5 bis 1,4 m (Tab. 5).

Mechanismus	Anstieg (m)
Thermosterische Ausdehnung	0,4-0,9
Gebirgsgletscher	0,2-0,4
Grönlandeis	0,9–1,8
Westantarktis	1–2
Insgesamt	2,5–5,1

Tab. 6: Geschätzter globaler Meeresspiegelanstieg bis 2300 bei Tem-peraturerhöhung um 3°C (WBGU 2006)

Die thermische Trägheit des Ozeans bedingt, dass auch bei gedrosselten oder sogar auf Null reduzierten Emissionsraten von Treibhausgasen der Meeresspiegel allein durch die thermische Ausdehnung noch über Jahrhunderte weiter ansteigen wird (Meehl u.a. 2005, Wigley 2005), also über die in Tabelle 5 angegebenen Richtwerte hinaus. Der WBGU (2006) schätzt den Anstieg bis zum Jahr 2300 auf 2,5 bis 5,1 m bei einem globalen Temperaturanstieg um 3°C (Tab. 6). Der Meeresspiegelanstieg wird so über Jahrhunderte eine ernste Bedrohung darstellen (Tab. 7).

Anstieg über Niveau 1961–1990 (cm)	Effekt	Betroffene Region
30	Erosion von 57% von Sandstränden	Asien
34	enormer Verlust von Zugvögelhabi-	Ostsee
	taten	Mittelmeer
40	5–22% Verlust küstennaher Feuchtgebiete	weltweit
45	Verlust der Mangrovenwälder	Asien
100	90% Verlust von Sandstränden	Asien
	25–55% Verlust küstennaher Feuchtgebiete	weltweit
300–500	Enormer Verlust von Küstenland und Deltagebieten	weltweit

Tab. 7: Auswirkungen von Meeresspiegelanstieg auf Ökosysteme (nach Warren 2006, gekürzt)
Die Fernerkundung kann die weitere Entwicklung nur verfolgen, die Alarmglocken läuten und damit Druck auf die Entscheidungsträger ausüben.

Literatur

- Alley, R., P.U. Clark, P. Huybrechts und I. Joghuin 2005: Ice-sheets and sea-level changes. Science 310, 456–460
- Abdalati, W. 2007: Ice sheets, glaciers, and rising seas. Internet: http://www.lasea-grant.org/forum/docs/03-20-07/WaleedAbdalati.pdf (gelesen am 16.8.2007)
- Angell, J.K. 1997: Estimated impact of Agung, El Chichon and Pinatubo volcanic eruptions on global and regional total ozone after adjustment fort he QBO. Geophys. Res. Lett. 24, 647–650
- Angell, J.K. und J. Korshover 1973: Quasi-biennial and long-term fluctuations in total ozone. Mon. Weath. Rev. 101, 426–443
- Antonov, J.I., S. Levitus und T.B. Boyen 2005: Thermosteric sea level rise, 1955-2003. Geophys. Res. Lett. 32 (12), L12602, doi:10.1029/2005GL023112
- Benedick, R.E. 1998: Ozone diplomacy. Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass., London, 2nd Ed.
- Bindoff, N.L. et al. 2007: Observations: Oceanic climate change and sea level. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to the 4th Assessment Report of IPPC (Solomon, S u.a. (eds.), Cambridge University Press
- Brasseur G.P., C. Granier und S. Walters 1990: Future changes in stratospheric ozone and the role of heterogeneous chemistry. Nature 348, 626–628
- Cazenave, A. und R.S. Nerem 2004: Present-day sea level change: Observations and causes. Rev. Geophys. 42, RG3001, doi:10.1029/2003RG000139

- Chubachi, S. 1985: A special ozone observation at Syowa Station, Antarctica from February 1982 to January 1983. In Zerefos, CS und Ghazi, A (Ed): Atmospheric ozone, D. Reidel Dordrecht, 285–288
- Douglas, B.C., und R.W. Peltier 2002: The puzzle of global sea-level rise. Physics To-day 55(3), 35–40
- Ericson, J.P., C.J. Vörösmarty, S.C. Dingman, L.G. Ward und M. Meyback 2006: Effective Sea-level rise and deltas: Causes of change and human dimension implications. Global and Planetary Change 50, 63–82
- Farman, J.C., B.G. Gardiner und J.D. Shanklin 1985: Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_v/NO_v interaction. Nature 315, 207–210
- Götz, F.W.P. 1949: Der Stand des Ozonproblems. Ber. Dtsch. Wetterdienst in der US-Zone 11, 7–13
- Meehl, G.A. et al. 2005: How much global warming and sea level rise? Science 307, 1769, doi: 10.1126/science.1106663
- Nicholls, R.J., S.E. Hanson, J.A. Lowe, D.A. Vaughan, Z. Lenton, A. Ganopolski, R.S.J. Tol und A.T. Vafeidis 2006: Metrics for assessing the economic benefits of climate change policies: Sea level rise. Report to the OECD. ENV/EPOC/ GSP(2006)3/FINAL. http://www.oecd.org/dataoecd/19/63/37320819.pdf (gelesen am 5.10.2007)
- Parry, M. et al. 2001: Millions at risk: defining critical climate change threats and targets. Global Environmental Change 11, 181–183
- Prather, M. 1992: Catastrophic loss of stratospheric ozone in dense volcanic clouds. J. Geophys. Res. 97, D9, 10187–10191
- Prather, M., P. Midgley, F.S. Rowland und R. Stolarski 1996:The ozone layer: the road not taken. Nature 381, 551–554
- Rahmstorf, S. 2007: A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. Science 315, 368–370, doi:10.1126/science.1135456
- Rahmstorf, S., A. Cazenave, Ja. Church, J.E. Hansen, R.F. Keeling, D.E. Parker und R.C.J. Sommerville 2007: Recent climate observations compared to projections. Science 316, 709, doi:10.1126/science.1136843
- Rignot, E., G. Casassa, P. Gogineni, W. Krabill, A. Rivera und R. Thomas 2004: Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of Larsen B ice shelf. Geophys. Res. Lett., 31, L18401, doi:10.1029/2004GL020697
- Roan, S.L. 1989: Ozone crisis. The 15-year evolution of a sudden global emergency. Wiley & sons, New York
- Rood, R.B. 1986: Global ozone minima in the historical record. Geophys. Res. Lett. 13, 1244–1247
- Scambos, T.A., J.A. Bohlander, C.A. Shuman und P. Skvarca 2004: Glacier acceleration and thinning after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica. Geopphys. Res. Lett., 31, L18402, doi:10.1029/2004GL020670
- Shepherd, S. und D. Wingham 2007: Recent sea-level contributions of the Antarctic and Greenland ice sheets. Science 315, 1529, doi:10.1126/science.1136776

- Spänkuch, D. 2008: Vom Internationalen Geophysikalischem Jahr (IGY) zum Montreal Protokoll – Atmosphärische Ozonforschung nach dem Internationalen Geophysikalischem Jahr. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät (in Vorbereitung)
- Stolarski, R.S., A.J. Krueger, M.R. Schoeberl, R.D. McPeters, P.A. Newman und J.C. Alpert 1986: Nimbus 7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease. Nature 322, 808–811
- Solomon, S. 1999: Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history. Rev. Geophys. 37, 275–316
- Tie X. und G. Brasseur 1995: The reponse of stratospheric ozone to volcanic eruptions: Sensitivity to atmospheric chlorine loading. Geophys. Res. Lett. 22, 3035–3038
- Warren, R. 2006: Impacts of global climate change at different annual mean global temperature increases. In: Schellnhuber, H.J., W. Cramer, N. Nakicenovic, T. Wigley und G. Yohe (Hrsg.): Avoiding dangerous climate change. Cambridge University Press, 93–131
- WBGU Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen 2006: Die Zukunft der Meere zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten. Berlin: WBGU
- Wigley, T.M.L. 2005: The climate change committment. Science 307, 1766, doi: 10.1126/science.1103934

Olaf Hellmuth

Microphysical Interactions between Cosmic Galactic Rays and Clouds: "Missing Link" in the Climate Discussion? Hypotheses, Indications and the Difficulties of Enquiry.

Part I: The IPCC 2007 perspective

I. Why atmospheric phase transitions are that important?

The understanding of atmospheric phase transitions such as the formation of aerosols, hydrosols and hydrometeors is of crucial importance for the epignosis, diagnosis and prognosis of the spatiotemporal evolution of the Earth's atmosphere. Phase transitions are associated with transformation of energy and matter (e.g., its state of order) in the atmosphere from one quality to another. For example, the condensation of atmospheric water vapour is associated with the formation of small, radiatively active droplets and the release of latent energy¹, which can enhance the kinetic energy in the updraft cores of deep convective cloud systems due to the work of buoyancy forces. In this way, condensation can trigger the formation of severe thunderstorms, heavy rainfalls, flash floods etc. As a consequence, thermodynamic and kinetic processes at microscopic scales can lead, on principle, to hydrothermodynamical effects at scales which are larger by many orders of magnitude, under circumstances associated with disastrous macroscopic aftermaths for population, economy etc.

II. Importance of clouds for weather and climate and their prediction

The most impressive manifestation of atmospheric phase transitions is the formation of clouds, able to be experienced both by their visibility and sometimes also by their audibility in a plethora of beautiful forms and guises. Clouds control Earth's weather and regulate its climate (vide infra) by cooling the atmosphere due to reflecting incoming visible-wavelength solar radiation and warming the surface by trapping outgoing infrared radiation (Baker and Peter, 2008). They produce rain and snow, impacting Earth's weather, land-

76 Olaf Hellmuth

scapes and vegetation zones. Small-scale processes causing large-scale effects of clouds are: (a) Updraughts and downdraughts inside of clouds and turbulent mixing on scales of metres to kilometres, affecting the evolution of nanometre to micrometre particles; (b) Submicrometre aerosol particles of natural and anthropogenic origin and strongly varying composition serving as nuclei for water droplet and ice crystal formation in clouds²; (c) Growth of cloud water droplets or ice crystals by water vapour uptake; (d) Rain formation by falling and collision of cloud droplets, which have reached diameters of tens of micrometres (Baker and Peter, 2008).

Clouds constitute the largest single source of uncertainty in weather and climate prediction (Baker and Peter, 2008). While the Numerical Weather Prediction (NWP) of most weather elements has been considerably improved over the last two decades, enhancement of rain prediction achieved during this period is comparatively low. Moreover, the quantitative precipitation forecast is still of such poor quality, that it can hardly be used for many applications. e.g., hydrology (Hense et al., 2003). This situation happens despite of large progress achieved in process understanding, physical model parameterisation, data assimilation, computer capacity etc. The reasons for that are not yet known and difficult to identify. However, present deficiencies are suspected to include (a) the incomplete modelling of the components of the water cycle, (b) gaps, non-resolved structures and errors in the initial fields, (c) inadequate methods of optimally linking observations with forecast models (assimilation of data into models) and (d) basic problems in our understanding and interpretation of deterministic NWP models (Hense et al., 2003). In view of the little progress in rain prediction over nearly two decades one might ask: How far we really away from the theoretical limits of cloud and rain prediction?

Recently, Lange (2007) discussed the consequences of cross-linking and nonlinearity in complex systems, such as the Earth's atmosphere, for the predictability of future system states. The future of a complex system essentially depends on whether the sum of all destabilising or that of all stabilising feedbacks will dominate the system behaviour. Employing basic principles of system theory by means of deterministic reference models, the author instructively demonstrated, that this question cannot be answered on the base of model simulations. The reasons for that are twofold:

1. Existence of "stochastic chaos": It is caused by (a) the coexistence of a multitude of repelling and attracting fix points (repellors and attractors) in high-dimensional phase spaces, (b) the existence of metastable states of attractors (stability against small perturbations), (c) the increase of the

- number of attractors with increasing degree of system cross-linking, (d) the increase of unpredictability, which attractor currently controls the system evolution, with increasing number of attractors (i. e., increasing probability of random attractor changes);
- 2. Existence of "deterministic chaos": It is a direct consequence of the existence of nonperiodic solutions of the deterministic hydrothermodynamic flow equations, e. g., the weather and climate prediction is based on (known as "butterfly effect"). Thereafter unpredictability can occur, even though the actual state point of a system in the phase space permanently stays within the attracting region of a single attractor and the trajectory of the state point is solely dynamically controlled without any perturbation. Then, the evolution of the system remains unpredictable as determinism could only be exploited, if the initial conditions are known with unendingly accuracy. In reality, (a) the accuracy of the initial condition is limited by the observation error (e.g., detection limits of measuring instruments), and (b) unpredictable subscale fluctuations of the system state near phase transitions (bifurcation points) might become very important for the system future. The mastery of the deterministic chaos is, on principle, impossible due to the uncertainty principle of quantum physics.

With respect to climate prediction the author emphasised, that the question whether the sum of all destabilising or the sum of all stabilising feedbacks will dominate the system behaviour, has not been answered so far.

III. Cloud-mediated homeostasis of Earth's climate

Cloud formation is a key process ensuring the homeostasis³ of Earth's climate over geological times. The application of this concept to atmospheric science was promoted by James Lovelock, who at the end of the 1960's formulated the idea of homeostasis of a fictive planet Gaia represented by the conceptual "daisy world" model (Lovelock, 1991). Lovelock proposed a negative feedback mechanism to explain the relative stability of Earth's climate over geological times, which became generally known as "Gaia" hypothesis⁴. At the end of the 1980's, the Gaia theory was essentially extended by Charlson et al. (1987, CLAW hypothesis). In their postulated negative feedback mechanism, abundant atmospheric sulphate aerosols are hypothesised to play a key role in stabilising Earth's climate. Thereafter, an assumed global warming caused by radiative forcing of "Greenhouse" gases would lead to an increase of the sea surface temperature and consequently, to an increase of dimethyl sulfid emissions (DMS, CH₃SCH₃) from marine phytoplankton (e.g., macroalgae) from

78 Olaf Hellmuth

the ocean into the atmosphere⁵. The gas-phase oxidation of DMS produces sulphur dioxide (SO₂), which further oxidises with the hydroxyl radical (OH) to form sulphuric acid vapour (H₂SO₄). Water vapour and sulphuric acid vapour are key precursor gases for the homogeneous heteromolecular (binary) nucleation of sulphate aerosols over the ocean⁶. Due to condensation and coagulation processes these microscopic particles can grow via intermediate, not yet fully understood stages from thermodynamically stable clusters via ultrafine condensation nuclei (UCN) to non-sea-salt (nss) sulphate aerosols and finally, to cloud condensation nuclei (CCN). An increase of the CCN concentration leads to an enhancement of the number concentration of cloud droplets. A higher cloud droplet concentration causes an enhancement of the cloud reflectivity for given liquid water content. An increased reflectivity of solar radiation by clouds cools the atmosphere and counteracts the initial warming. Via this route, a thermal stabilisation of Earth's climate is accomplished⁷.

Though describing climate self-regulation at the global scale in a physically sound manner, the details of this mechanism are neither fully understood and theoretically worked out nor empirically verified at the process scales, respectively. Subjects of large uncertainties are the genesis of atmospheric phase transitions itself, whereas new particle formation (NPF) by homogeneous and heterogeneous nucleation, respectively, are of special importance, since both processes are necessary conditions for CCN, cloud and rain formation.

The homeostatic climate stabilisation via aerosol formation is neither the only negative feedback mechanism in Earth's geosystem nor it has been claimed to be the primary one.

IV. Helio- and astrophysical perspective on climate change

From a non-anthropocentric point of view on climate change a subject of ongoing interest is the heliophysical component of climate variability, i.e., the impact of solar variability and total solar irradiance (TSI) on Earth's climate. Recently, this heliophysical aspect was supplemented by an astrophysical component. Based on previous works, Svensmark (2007) used the notion "cosmoclimatology" to denote longterm changes of Earth's climate as a result of the alteration of the intensity of galactic cosmic rays (GCRs). The latter are suspected to impact Earth's cloudiness via ion-induced nucleation and formation of aerosols, which serve as building blocks of CCN. The modulation of the GCR influx by the solar magnetic activity is suspected to account for climatic fluctuations on decadal, centennial and millennial timescales. Changes

of the galactic environment of the solar system, associated with the revolution of the Sun around the galactic centre, are predicted to have dramatic climatic consequences, including "Snowball Earth" episodes. By means of a state-of-the-art astrophysical model to describe the position of the Sun along its orbit with respect to the spiral arm pattern of the Milky Way, the cosmoclimatological theory involving ion-induced nucleation gives a physically sound explanation for the match between the spiral-arm encounters and ice-house episodes during the Phanerozoic (Perseus spiral arm: Ordovician to Silur ice-house periods; Norma arm: Carboniferous ice-house; Scutum-Crux spiral arm: Jurassic to Early Cretaceous icehouse periods; Sagittarius-Carina spiral arm: Miocene epoch, leading almost immediately (in geological terms) to Orion spur: Pliocene to Pleistocene epochs) (Svensmark, 2007, Figs. 8 & 9, see references therein). Such a perspective extends the scales of interest from molecular to galactic dimension.

In the presented here part I of the article, the IPCC 2007 perspective on the direct and indirect solar impact on climate change will be reviewed. In the forthcoming part II, I will scrutinise recent studies supporting links between the intra- and extraterrestrial weather, especially empirical findings for the indirect solar effect on Earth's climate, supposed mechanisms and cloud chamber experiments to verify/falsify existing theories.

V. The IPCC 2007 perspective on the Sun's direct and indirect effects on Earth's climate

V. 1 Climate change in the past

Earth's climate has changed on all time scales. The primary driver of past climate variations is the change of Earth's radiation budget, which can be caused by the following three pathways (Jansen et al., 2007, IPCC-WG I, Chapter 6, p. 449–450, FAQ 6.1):

- 1. Variation of the incoming solar radiation (e.g., by changes in the Earth's orbit⁸ or of solar processes):
 - a. Ice ages, occurring in regular cycles, are linked to regular variations in the Earth's orbit around the Sun (Milankovitch cycles⁹). These cycles change the amount of solar radiation received at each latitude in each season.
 - b. Climatic changes can also be caused by variations of the energy output of the Sun. The solar output varies slightly (≈0.1%) over an 11-year cycle (vide infra). Sunspot observations, going back to the 17th centu-

ry, and measurements of isotopes generated by GCR, indicate long-term changes in solar activity. According to our present level of understanding, solar variability and volcanic activity are considered as leading reasons for climate change in the pre-industrial era¹⁰.

- 2. Change of global albedo (i. e., variation of the fraction of reflected solar radiation, e.g., due to changes in cloud cover, atmospheric aerosols, land surface cover).
- 3. Alteration of the longwave energy radiated back to space (e.g., by changes in "Greenhouse" gas concentration).

V. 2 Direct and indirect solar forcing of climate change

Solar forcing of climate change is suspected to be a combination of direct forcing by the total solar irradiance (TSI) changes and indirect effects of UV radiation on the stratosphere and GCR-mediated cloud change.

(a) Direct effect of solar variability

Satellite-based TSI observations show day-to-weak variations associated with the Sun's rotation on its axis, and decadal fluctuations arising from the 11-year solar activity. The TSI levels during the past two solar minima were comparable. The contemporary TSI variability is due to the presence of sunspots (compact, dark features, where radiation is locally depleted) and faculae (extended bright features, were radiation is locally enhanced) on the Sun's disk. Neither model based facular proxy nor measured GCR 10.7 cm flux and the so-called *aa* geomagnetic index since the 1950s exhibit a significant secular trend during activity minima. Changes of surface emissivity by magnetic sunspots and facular regions are the most effective in altering irradiance. Also changes of the solar diameter are suspected to cause secular TSI changes.

TSI reconstructions over the past 400 years assumed the existence of a long-term variability component in addition to the 11-year solar cycle, in which the 17th-century Maunder Minimum TSI was reduced in the range of 0.15% to 0.3% below contemporary solar minima. This long-term temporal evolution was assumed to follow either the smoothed amplitude of the solar activity cycle or the cycle length, respectively, and was motivated by (a) the range of variability in Sun-like stars, (b) the long-term trend in geomagnetic activity and (c) solar modulation of cosmogenic isotopes. However, according to the IPCC 2007 report these arguments, which support a significant long-term TSI trend, could not be confirmed by investigations performed in 2004 and 2005 (Forster et al., 2007, IPCC-WG I, Chapter 2, p. 190, see ref-

erences therein)¹¹. Among others it has been found out, that the relationship between TSI and geomagnetic and cosmogenic indices is probably nonlinear. The "open" magnetic flux (the flux extending into the heliosphere), which modulates geomagnetic activity and cosmogenic isotopes¹², can accumulate on intercycle time scales even when the "closed" magnetic flux, such as in sunspots and faculae, does not. The IPCC 2007 report cites model studies, which suggest a 0.04% increase of the TSI from the Maunder Minimum to present-day cycle minima.

14°C and 16°Be cosmogenic isotope records in tree rings and ice cores indicate solar-related cycles near 90, 200 and 2.300 years. Some evaluation studies of cosmogenic isotopes and sunspot records suggest, that the solar activity during the 12th-century Medieval Solar Maximum was comparable to the present Modern Solar Maximum. A recent study of Solanki et al. (2004) reports on exceptionally high levels of solar activity in the past 70 years, relative to the preceding 8.000 years. Nevertheless, owing to differences among isotopes records, there is still some debate on whether current levels of solar activity can be considered as "exceptionally high" or only "historically high, but not exceptionally so" (Forster et al., 2007, IPCC-WG I, Chapter 2, p. 190).

(b) Indirect effect of solar variability

Variations of the solar UV radiation contribute significantly to TSI changes and creates and modifies the ozone layer in the stratosphere, with an indirect dynamical and radiative influence on the troposphere. Although the UV radiation energy of the spectrum at wavelengths below about 300 nm (absorbed by the atmosphere) amounts only $\approx\!1\%$ of the radiation energy of the Sun, its variation is by at least an order of magnitude higher than the TSI variation (15% of the total irradiance cycle). Probably, there are also effects of TSI variations on the mesosphere and thermosphere. A further contribution to indirect forcing comes from solar wind fluctuations and solar-induced heliospheric modulation of GCR.

Solar cycle changes of the UV radiation alter middle atmospheric ozone concentration, temperatures and winds, including the Quasi-Biennial Oscillation. For example, 11-year cycle signals could be identified in zonally averaged stratospheric temperature, ozone and circulation. Furthermore, a solar-cycle induced increase in global total ozone of 2 to 3% at solar cycle maximum was found, which is accompanied by a temperature response increasing with height (\approx 1 K at z=50 km). Solar forcing is suggested to induce a significant lower stratosphere response, probably caused by temperature changes affecting planetary wave propagation.

During episodes with high solar activity, the magnetic field of the heliosphere reduces the GCR flux in the atmosphere. Solar-induced GCR fluctuations are hypothesised to influence Earth's climate via the following mechanisms:

- 1. The plasma, generated by GCR ionisation in the troposphere, is part of an electric circuit, which extents from the Earth's surface to the ionosphere. Thus, GCR may affect thunderstorm electrification.
- 2. By altering the CCN population and hence microphysical cloud properties (e. g., droplet number concentration), GCR may induce microphysical processes analogous to the indirect effect of tropospheric aerosols.
- 3. Atmospheric cluster ions, generated by GCR, are preferred sites for heterogeneous nucleation of aerosols. In the case of low H₂SO₄ vapour concentration, ion-induced nucleation¹³ may dominate over binary homogeneous nucleation (BHN) of H₂O and H₂SO₄. Furthermore, increased ion-induced nucleation and increased scavenging rates of aerosols are suggested to occur in turbulent regions around clouds. Thus, the presence of GCR-generated ions may influence several microphysical processes.

Several empirical findings show a correlation between globally averaged low-level cloud cover and GCR fluxes, which is hypothesised to result from the changing ionisation of the atmosphere (and subsequent ion-induced nucleation and activation of cloud nuclei) by solar-modulated GCR fluxes (e.g., empirical relation between cloud cover variations during 1984 to 1990 and the solar cycle). The IPCC 2007 report states an ongoing controversial discussion of this issue, which originates from uncertainties concerning the reality of the decadal signal itself, the phasing or anti-phasing with solar activity, and its separate dependence for low, middle and high clouds.

The IPCC 2007 report refers to the following con's: (a) The GCR time series does not correspond to global total cloud cover after 1991 or to global low-level cloud cover after 1994 without unproven de-trending. (b) The correlation is significant with low-level cloud cover based only on infrared (not visible) detection. (c) Multi-decadal (1952 to 1997) time series of cloud cover from ship synoptic reports do not exhibit a relationship to GCR.

On the other hand the report refers to a statistically significant positive correlation between cloud cover over the UK and GCR flux during 1951 to 2000, though contrarily, cloud cover anomalies from 1900 to 1987 over the USA do have a signal at 11 years, which is anti-phased with the GCR flux.

VI. Summary of IPCC 2007 point of view and conclusions

The IPCC 2007 perspective on the direct and indirect solar forcing of climate change can be summarised as follows:

- TSI changes are stated to be not the major cause of the temperature change in the second half of the 20th century "unless those changes can induce unknown large feedbacks in the climate system. The effects of galactic cosmic rays on the atmosphere (via cloud nucleation) and those due to shifts in the solar spectrum towards the ultraviolet (UV) range, at times of high solar activity, are largely unknown. The latter may produce changes in tropospheric circulation via changes in static stability resulting from the interaction of the increased UV radiation with stratospheric ozone. More research is needed before the magnitude of solar effects on climate can be stated with certainty" (Le Treut et al. 2007, IPCC-WG I, Chapter 1, p. 108).
- Empirical results have strengthened the evidence for solar forcing of climate change. The most likely mechanism is considered to be some combination of direct forcing by changes in total solar irradiance, and indirect effects of ultraviolet (UV) radiation on the stratosphere. The indirect effects induced by GCR is considered as "least certain" and subject of ongoing research (Forster et al., 2007, IPCC-WG I, Chapter 2, p. 188).
- Whether solar wind fluctuations or solar-induced heliospheric modulation
 of galactic cosmic rays also contribute indirect forcings "remains ambiguous" (Forster et al., 2007, IPCC-WG I, Chapter 2, p. 192).
- Owing to the difficulty to track the influence of ions in a long chain of complex interacting processes, "quantitative estimated of galactic cosmic-ray induced changes in aerosol and cloud formation have not been reached" (Forster et al., 2007, IPCC-WG I, Chapter 2, p. 192–193).
- The apparent relationship between solar variability and cloud cover may result not only from the solar-modulated GCR flux and solar-induced ozone change, but also from sea surface temperatures altered directly by TSI change and by internal variability due to El Niño-Southern Oscillation. In reality, different direct and indirect physical processes may operate simultaneously (Forster et al., 2007, IPCC-WG I, Chapter 2, p. 193).
- While the level of scientific understanding of solar forcing due to direct TSI change has been declared as "low", the one for GCR influences has been declared as "very low" (Forster et al., 2007, IPCC-WG I, Chapter 2, p. 193).

The IPCC 2007 point of view agrees very well with the conclusions drawn at an interdisciplinary "Workshop on Ion-Aerosol-Cloud Interactions", which was held at CERN, 18–20 April 2001. Here, the quintessence of the "Workshop Summary Panel" discussion, given in form of question-answer dialogue, will be summarised (Wolfendale, 2001):

- 1. Does cosmic ray ionisation play a role in the climate? (This question did not ask whether GCRs do indeed significantly affect the climate, which was supposed to be clearly unanswerable at present.)
 - a. The empirically found solar/GCR-climate correlations are sometimes present and sometimes not. This may reflect the complexity of interactions in Earth's climate system. The climate may have stable states such that a correlation may persist for some decades and then disappear for a while. Interactions with anthropogenic contributions (e.g., sulphur dioxide and its effect on cloud formation) may lead to a yet more complex climate response.
 - b. Correlations do not demonstrate cause and effect. Present data are unable to separate whether the Sun-Earth coupling is via electromagnetic radiation (TSI, UV) and/or energetic GCR (galactic/solar). There is a need to understand the amplification factors, which are required to enhance the GCR impact despite their very small energy input (roughly equivalent to that of starlight) in comparison with the TSI¹⁴.
 - c. To get climate models reproducing temperature records, the solar contribution must be enhanced by a factor 3. Presently, only direct TSI changes are considered. An additional, indirect, solar contribution could either decrease or increase the projections of the anthropogenic effects¹⁵
 - d. To explain the satellite-based solar cycle correlation with low cloud cover both electromagnetic radiation and GCRs remain candidates. The observed solar correlation is confined to low clouds, and the global correlation map of low cloud cover shows no preference for high geomagnetic latitudes. These counter-intuitive findings are deserved to be made reconcilable with the supposed solar effects.

Vote: The distribution of votes on the question was equally divided between "?" and "Yes", with zero votes for "No". GCRs have the potential to affect the climate, but the question of whether they are significant is not yet answered.

2. Is the mechanism "ionisation → aerosol → cloud" microphysically understood?

- a. Theoretical studies of Yu (2001) and D'Auria and Turco (2001) suggest, that ions plays an important role in the creation (ion-induced nucleation) and early growth of UCN from trace vapours such as sulphuric acid. Charges stabilise embryonic clusters. Yu (2001) proposed a physical mechanism to explain why the solar modulation is observed only in low clouds. It was demonstrated, that GCR ionisation can be the limiting factor to aerosol nucleation at low altitudes, whereas at high altitudes, where the ionisation rate is up to a factor 20 larger, other parameters such as the trace gas concentrations become the limiting factor.
- b. The presence of ion-induced nucleation was confirmed by laboratory studies as well as by mass spectrometric aircraft measurements of ions up to large sizes.
- c. Open questions concern (i) the effect of extra UCN, formed by GCR-induced nucleation of trace condensable vapours, on CCN, which seed cloud droplets, (ii) the influence of GCRs on the growth process of other aerosols and on the activation of CCN into droplets¹⁶, (iii) the GCR effect on electro-freezing of super-cooled liquid droplets, (iv) the GCR effect on the global electrical circuit and electric field strength, (v) the GCR effect on the production of trace reactive chemicals (NO, OH), which could affect atmospheric chemistry at certain altitudes.

Vote: There was a 100% "Yes" vote to the question, whether the "ionisation → aerosol" mechanism is understood. The vote to the question, whether the "aerosol → cloud mechanism" is understood, was equally divided between "?" and "No", with zero votes for "Yes". Whether or not GCR-induced extra UCN have a significant effect on CCN is essentially unknown. The experimental and theoretical understanding of ionisation effects on aerosol growth and CCN activation is poor.

- 3. Is the scientific motivation for a cosmic ray influence on cloud cover agreed?
 - a. The GCR-cloud hypothesis is considered as the "first hard clue" on the origin of observed solar-climate correlations. There is a definite hypothesis, which can be tested experimentally: "Are cosmic rays affecting cloud formation?"¹⁷.

Vote: There was a 100% "Yes" vote, that the scientific motivation for GCR impact on clouds is agreed.

4. Would the CLOUD¹⁸ Atmospheric Research Facility using a particle beam, proposed by CERN, satisfy a need?

a. By means of an expansion cloud chamber, well-defined thermodynamic conditions can be produced over large volumes, and by means of a CERN particle beam, GCR conditions throughout the atmosphere can be recreated¹⁹.

- b. The CLOUD facility allows a precise simulation of the conditions inside clouds at all altitudes and latitudes (aerosol nucleation, growth, activation), and to investigate the effects of ionising particle radiation on aerosol and cloud processes (aerosol nucleation, growth, activation).
- c. The following problems can be investigated by laboratory experiments: (i) the impact of ionisation on the freezing of Polar Stratospheric Clouds (PSCs), which is of crucial importance for our understanding of de-nitrification and subsequent ozone loss over the poles; (ii) GCR and Solar Cosmic Ray (SCR) impacts on atmospheric NO production by affecting lightning production; (iii) the observed correlation between the GCR intensity and the frequency of lightning; (iv) the suggested preferential activation of water droplets on negative ions, which may be responsible for charge separation in clouds, and therefore lightning; (v) the observed decrease of rainfall during Forbush decreases as well as increased rainfall during energetic SCR events; (vi) the responsibility of GCRs for fair weather ionisation throughout most of the lower atmosphere and, consequently, for the global electrical circuit and subsequent cloud microphysical effects (electro-freezing, aerosol charging, scavenging of charged aerosols by cloud droplets).

Vote: There was a 100% "Yes" vote to the question.

In view of the "very low level of understanding" of GCR impacts on climate change, as stated by the IPCC 2007 report, the microphysical interactions between cosmic galactic rays and clouds represent a subject of high relevance with respect to both basic research in atmospheric physics and climate prediction. At the same time, cloud chamber/particle beam experiments are a challenging endeavour for the science of engineering. The available indications for indirect solar effects on the Earth's climate, given by observational correlations and supported by theoretical and modelling studies, are less than "Smoking Guns", but definitively more than "Bad Shots". The extension of the scales of interest beyond Orlanski's traditional classification of characteristic time and length scales of atmospheric motions (Orlanski, 1975) toward molecular and galactic scales is a prerequisite to verify/falsify hypothesised

helio- and astrophysical contributions to climate change. The elucidation of possible links between the intra- and extraterrestrial weather opens a new window for atmospheric and geophysical research.

References

- Baker, M. B. and Th. Peter, 2008: Small-scale cloud processes and climate. Nature, 451, 299–300, doi:10.1038/nature06594
 - (http://www.nature.com/nature/journal/v451/n7176/full/nature06594.html#top).
- Burkholder, J. B., Curtius, J., Ravishankara, A. R. and E. R. Lovejoy, 2004: Laboratory studies of the homogeneous nucleation of iodine oxides. Atmos. Chem. Phys., 4, 19–34 (http://www.atmos-chem-phys.net/4/19/2004/acp-4-19-2004.pdf).
- D'Auria, R. and R. P. Turco, 2001: A thermodynamic-kinetic model for ionic cluster formation, growth and nucleation. In: Proceedings of the Workshop on Ion-Aerosol-Cloud Interactions, 18–20 April 2001, ed. by J. Kirkby, European Organisation for Nuclear Research (CERN), Geneva, CERN 2001-007 (http://preprints.cern.ch/cernrep/2001/2001-007/2001-007.html)
- Fastrup, B., Pedersen, E., Lillestol, E., Thorn, E., Bosteels, M., Gonidec, A., Harigel, G., Kirkby, J., Mele, S., Minginette, P., Nicquevert, B., Schinzel, D., Seidl, W., Grundsøe, P., Marsh, N, Polny, J., Svensmark, H., Viisanen, Y., Kurvinen, K., Orava, R., Hämeri, K., Kulmala, M., Laakso, L., Mäkelä, J. M., O'Dowd, C. D., Afrosimov, V., Basaleev, A., Panov, M., Laaksonen, A., Joutsensaari, J., Ermakov, V., Makhmutov, V., Maksumov, O., Pokrevsky, P., Stozhkov, Y., Svirzhevsky, Carslaw, K., Yin, Y., Trautmann, T., Arnold, G., Wohlfrom, K.-H., Hagen, D., Schmitt, J., Whitefield, P., Aplin, K., Harrison, R. G., Bingham, R., Close, F., Gibbins, C., Irving, A., Kellett, B., Lockwood, M., Petersen, D., Szymanski, W. W., Wagner, P. E., Vrtala, A. and CLOUD Collaboration, 2000: A study of the link between cosmic rays and clouds with a cloud chamber at the CERN PS. European Organisation for Nuclear Research (CERN), Geneva, CERN/SPSC 2000-021, SPSC/P317
 - (http://cloud.web.cern.ch/cloud/documents cloud/cloud proposal.pdf).
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D. W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D. C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M. and R. Van Dorland, 2007: Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. and H. L. Miller, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA
 - (http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf).
- Hense, A., Adrian, G., Kottmeier, Ch., Simmer, C. and V. Wulfmeyer, 2003: Priority Program of the German Research Foundation: Quantitative Precipitation Forecast.

- (http://www.meteo.uni-bonn.de/projekte/SPPMeteo/reports/SPPLeitAntrag English.pdf)
- Jansen E., Overpeck, J., Briffa, K. R., Duplessy, J.-C., Joos, F., Masson-Delmotte, V., Olago, D., Otto-Bliesner, B., Peltier, W. R., Rahmstorf, S., Ramesh, R., Raynaud, D., Rind, D., Solomina, O., Villalba, R. and D. Zhang, 2007: Paleoclimata. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. and H. L. Miller, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA
 - (http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter6.pdf)
- Kirkby, J., 1998: Beam measurements of a CLOUD (Cosmic Leaving Outdoor Droplets) Chamber: A particle beam facility to investigate the influence of cosmic rays on clouds. European Organisation for Nuclear Research (CERN), Geneva, CERN-OPEN-2001-028
 - (http://cloud.web.cern.ch/cloud/documents cloud/cloud concept.pdf).
- Kirkby, J., 2001: CLOUD: A particle beam facility to investigate the influence of cosmic rays on clouds. In: Proceedings of the Workshop on Ion-Aerosol-Cloud Interactions, 18–20 April 2001, ed. by J. Kirkby, European Organisation for Nuclear Research (CERN), Geneva, CERN 2001-007
 - (http://preprints.cern.ch/cernrep/2001/2001-007/2001-007.html).
- Lange, H. J., 2007: Wetter und Klima im Phasenraum. (http://hajolange.de/).
- Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson, T. and M. Prather, 2007: Historical overview of climate change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. and H. L. Miller, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA
 - (http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter1.pdf).
- O'Dowd, C. D., Yoon, Y. J., Junkerman, W., Aalto, P., Kulmala, M., Lihavainen, H. And Y. Viisanen, 2007: Airborne measurements of nucleation mode particles I: coastal nucleation and growth rates. Atmos. Chem. Phys., 7, 1491–1501 (http://www.atmos-chem-phys.net/7/1491/2007/acp-7-1491-2007.pdf).
- Orlanski, I., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. Bull. Amer. Meteor. Soc., 56, 529–530.
- Parker, E. N., 2000: Summary and perspectives. In: Proceedings of the First Solar & Space Weather Euroconference. The Solar Cycle and Terrestrial Climate, Santa Cruz de Tenerife, Spain, ESA SP-463 (2000).
- Pechtl, S., Lovejoy, E. R., Burkholder, J. B. and R. von Glasow, 2006: Modeling the possible role of iodine oxides in the atmospheric new particle formation. Atmos.

- Chem. Phys., 6, 505–523 (http://www.atmos-chem-phys.net/6/505/2006/acp-6-505-2006.pdf).
- Solanki, S. K., Usoskin, I. G., Kromer, B., Schüssler, M. and J. Beer, 2008: Unusual activitity of the Sun during recent decades compared to the previous 11.000 years. Nature, 431, 1084–1087.
- Wingenter, O. W., Haase, K. B., Zeigler, M., Blake, D. R., Rowland, F. S., Sive, B. C., Paulino, A., Thyrhaug, R., Larsen, A., Schulz, K., Meyerhöfer, M. and U. Riebesell, 2007: Unexpected consequences of increasing CO₂ and ocean acidity on marine production of DMS and CH₂CII: potential climate impacts. Geophys. Res. Lett., 34, L05710, doi:10.1029/2006GL028139.
- Wolfendale, A., 2001: Conclusions of the Workshop on Ion-Aerosol-Cloud Interactions. In: Proceedings of the Workshop on Ion-Aerosol-Cloud Interactions, 18–20 April 2001, ed. by J. Kirkby, European Organisation for Nuclear Research (CERN), Geneva, CERN 2001-007 (http://preprints.cern.ch/cernrep/2001/2001-007/2001-007.html).
- Yu, F., 2001: Cosmis rays, particle formation, natural variability of global cloudiness, and climate implications. In: Proceedings of the Workshop on Ion-Aerosol-Cloud Interactions, 18–20 April 2001, ed. by J. Kirkby, European Organisation for Nuclear Research (CERN), Geneva, CERN 2001-007 (http://preprints.cern.ch/cernrep/2001/2001-007/2001-007.html)

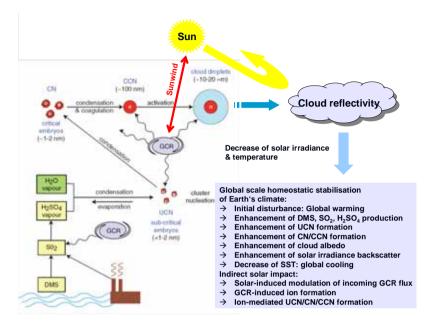


Fig. 1 Nucleation of ultrafine condensation nuclei (UCN) from water vapour (H_2O) and trace sulphuric acid vapour (H_2SO_4) , followed by aerosol growth into condensation nuclei (CN) and cloud condensation nuclei (CCN), which can activate into cloud droplets. The precursor of H_2SO_4 is sulphur dioxide (SO_2) , produced anthropogenically or, in the remote marine boundary layer (MBL), predominantly from dimethyl sulphide (DMS) released from plankton. The scheme shows the homeostatic principle at the global scale, which is hypothesised to stabilise Earth's climate $(Gaia\ theory)$. The processes, which may be affected by cosmic galactic rays (GCRs) are indicated by wavy arrows. Charged aerosols are expected to have an enhanced growth rate and reduced evaporation relative to neutral aerosols. GCRs may also affect the activation of CCN in droplets. (taken from Kirkby, 2001, p. 40, Fig. 35 with some modifications).

Notes

1. A phase transition is a system response to a supersaturated state. For illustration, let us consider a homo-molecular vapour with volume concentration of molecules c (number of molecules per unit volume) and mean free path λ, defined as the average distance travelled by a molecule between collisions with other molecules (intermolecular distance). The length scale λ is proportional to the mean speed of the vapour molecules v, which increases with temperature. The maximum number of molecules, which can be maintained in the vapour phase, depends on the temperature (corresponding to the saturation vapour pressure). When the number of molecules per unit volume exceeds this maximum value (e.g., by emission or production of vapour molecules), the system tries to reduce its specific volume (i.e., the volume occupied by one molecule ω=1/c) by a transition from the vapour to the liquid phase. The formation of the new liquid macro-phase performs via nucleation of molecule clusters (called embryo's) in the parturient mother phase. The decrease of ω is associated with a gain of latent energy, corresponding to the decrease of λ due to the phase transition.

This energy gain is proportional to the volume of the new embryo (volume term of formation energy). However, to separate the embryo from the mother phase an interfacial area must be formed, which requires work against the intermolecular surface forces. The specific energy to form a surface of unit area is the specific interfacial energy or surface tension. The energy consumption to build up the interface is proportional to the embryonic surface area (surface term of formation energy). The total work of cluster formation is the sum of both the volume and the surface term of formation energy. For sub-saturation, the cluster formation work is monotonously increasing with cluster size, i.e., the emission of vapour monomers from the clusters (shrinking) is energetically more favourable than monomer aggregation by the cluster (growth). For super-saturation, at first the formation work continuously increases with cluster size until a maximum, which is reached at a critical cluster size. From there, the formation energy monotonously decreases with increasing cluster size, because the volume term starts to dominate over the surface term. The formation energy of sub-critical clusters decreases with decreasing cluster size, hence cluster shrinking is energetically more favourable than cluster growth, consequently sub-critical clusters disappear. The formation energy of super-critical clusters decreases with increasing cluster size, hence cluster growth is energetically more favourable than cluster shrinking, i.e., super-critical clusters can grow without limitation.

The energy required to form a cluster of critical size is of great importance for the determination of the nucleation rate, i.e., the rate of formation of critical clusters per unit time and per unit volume of the ambient phase. Owing to thermal fluctuations, sub-critical clusters can exceed the critical size and become super-critical, whereas the probability to overcome the energy barrier decreases with the distance of the actual size from the critical size and vice versa. The probability of near-critical clusters to jump the critical size is correspondingly high. One can see, that phase transition is a clever way of nature to convert latent heat, stored in the supersaturated state (e.g., by solar-induced water vapour evaporation from the Earth's surface), into sensible heat at the molecular scale by changing the state of order (low order of vapour, high order of droplets).

- High concentrations of aerosols can increase the brightness of clouds and their ability to reflect solar radiation. An increased aerosol concentration alters large-scale patterns in cloud lifetimes and precipitation.
- Homeostasis is an universal concept in physics, chemistry, biology, cybernetics, system theory, economics and social science, psychology etc. So far as known, the notion "homeostasis" was created by the physiologist Claude Bernard and published in 1865.
- 4. Gaia is the name of the goddess of Earth in the Hellenistic mythology. In Hesiod's Theogony (700 B.C.) the creation of Gaia was thought as the transition from chaos to cosmos. William Golding and James Lovelock used this name as a synonym for a self-regulating geophysical and biophysical mechanism on a global scale. According to this hypothesis, temperature, oxidation state, acidity as well as different physicochemical parameters of rocks and waters remain constant at each time due to homeostatic interactions maintained by massive feedback processes. These feedback processes are initiated by the "living world", whereas the equilibrium conditions are changing dynamically with the evolution of Earth's live (not of single creatures).
- Coccolithophorids such as *Emiliania huxleyi* and other marine microorganisms, including diatoms, produce dimethyl sulphide (DMS). Dimethyl sulphide is produced from dimethylsulfoniopropionate (DMSP) by (a) enzymatic cleavage of DMSP, (b) by viral infection of

E. huxleyi (some viral populations show dramatic CO₂ response) and (c) due to grazing of phytoplankton by microzooplankton (Wingenter et al., 2007, cf. references therein).

6. New particle formation (NPF) via nucleation over the ocean is still poorly understood. Over the last years it has been suspected, that new particles form via homogeneous nucleation of water vapour, sulphuric acid vapour and ammonia. There exists some evidence, that DMS-derived sulphuric acid is involved in NPF. However, modelling studies have shown, that while nucleation of sulphuric acid can occur, the concentration of sulphuric acid is too low to explain nucleated, thermodynamically stable clusters to grow to detectable sizes larger than 3 nm (O'Dowd et al., 2007). Field observations show a correlation of NPF with both solar flux and low tide. The identification of iodine oxides in particles and laboratory studies suggest, that UV photolysis of alkyl iodides (particularly CH₂I₂, emitted by macroalgae) in presence of ozone with subsequent homogeneous nucleation of OIO (iodide oxide) is responsible for NPF in the marine boundary layer (MBL). The following reaction mechanism is proposed to explain NPF in the MBL:

$$CH_2I_2 + h\nu \rightarrow CH_2I + I(1)$$

$$I + O_3 \rightarrow IO + O_2 \tag{2}$$

$$IO + IO \rightarrow OIO + I$$
 (3)

$$OIO + OIO \leftrightarrow I_2O_4$$
 (4)

$$I_2O_4 + OIO \leftrightarrow \leftrightarrow ,, particle$$
 (5)

Reaction (5) represents a sequence of multiple OIO addition steps leading to the formation of a stable iodine oxide cluster (polymerisation). In this way, NPF results from single component homogeneous nucleation of OIO (Burkholder et al., 2004). It is suspected, that inhomogeneous sources of iodine oxides, i.e., "hot spots" with elevated iodine species emissions, are responsible for aerosol production in the coastal and open ocean marine boundary layer (Pechtl et al., 2006).

Atomic iodine (I), released by photolysis of molecular iodine (I₂) and chloroiodomethane (CH₂CII) in the MBL, can very efficiently catalytically destroy O₃ (Wingenter et al., 2007, cf. references therein):

$$I + O_3 \rightarrow IO + O_2 \tag{6}$$

$$IO + HO_2 \rightarrow HOI + O_2$$
 (7)

 $HOI + hv \rightarrow HO + I(8)$

$$O_3 + HO_2 \rightarrow HO + 2O_2(9)$$

An increase of atmospheric CO₂ alters the seawater carbonate equilibria by shifting inorganic carbon away from carbonate (CO₃²⁻) towards more bicarbonate (HCO₃⁻) and increased ocean acidity:

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow HCO_3^- + H^+$$
 (1)

$$CO_3^{2-} + H^+ \leftrightarrow HCO_3^-$$
 (2)

An increase of atmospheric CO_2 will result in a pH drop of surface seawater, an increase in hydronium (H⁺) concentration and a fall in $CO_3^{2^-}$ levels. Some phytoplankton taxonomic groups favour CO_2 as their inorganic carbon source, while others consume mostly HCO_3^{-} . If increasing atmospheric CO_2 leads to greater DMS production, then this may contribute to the homeostasis of Earth's atmosphere (Wingenter et al., 2007, cf. references therein).

8. Over the time period from the past 800 kyr to the next 200 kyr, the obliquity (tilt) of the

Earth axis varies between 22.05° and 24.50° with a strong quasi-periodicity around 41 kyr. Changes of the obliquity impact the inter-seasonal variation of insolation as well as the annual mean insolation changes. As the obliquity impacts the annual mean insolation with opposite effects in low vs. high latitudes, there is no effect in global average insolation. The eccentricity of the Earth's orbit around the Sun has quasi-periodicities at 400 and around 100 kyr. Changes of the eccentricity modulate the Sun-Earth distance and have limited impacts on global and annual mean insolation. Nevertheless, variations of the eccentricity have an impact on the intra-annual changes of the Sun-Earth distance. In this way, a significant modulation of seasonal and latitudinal effects, induced by obliquity and climatic precession, is accomplished. The general precession of the equinoxes and the longitude of the perihelion causes periodic shifts of the position of solstices and equinoxes on the orbit relative to the perihelion. These shifts modulate the seasonal cycle of insolation with periodicities of about 19 and 23 kyr. As a result, changes in the position of the seasons on the orbit strongly modulate the latitudinal and seasonal distribution of insolation. During periods with low eccentricity (about 400 kyr and during the next 100 kyr), precession-induced changes of seasonal insolation are lower than during periods with larger eccentricity (Jansen et al., 2007, IPCC-WG I, Chapter 6, p. 445, Box 6.1 Orbital forcing).

- 9. According to Milankovitch's theory, ice ages are triggered by minima in summer insolation (insolation drops below a critical threshold) near 65°N, which enables winter snowfalls to persist all year and forming northern hemisphsric glacial ice sheets by snow accumulation. The onset of the last ice age about 116 kyrs corresponds to a 65°N mid-June insolation about 40 Wm⁻² lower than today (Jansen et al., 2007, IPCC-WG I, Chapter 6, p. 445, Box 6.1 Orbital forcing). The next large reduction on northern summer insolation is expected to start in 30.000 years.
- 10. Between 1902 and 1957, the absolute value of the total solar irradiance (TSI) varied between 1322 and 1464 Wm⁻². The current estimate of the TSI is 1365 Wm⁻². Higher TSI values are associated with more solar faculae. Satellite missions revealed, that at the maximum of the 11-year solar activity cycle, the TSI is by about 0.1% larger than at the minimum. The TSI assumes its highest values when sunspots are at their maximum. Between 1672 and 1699 a low solar activity (sunspots) was observed, denoted as the Maunder Minimum. This time interval falls into the climate period of the Little Ice Age (from about 1350 to 1850).
 - There is increasingly reliable evidence of the influence of solar cycle TSI variations on atmospheric temperatures and circulations, particularly in the higher atmosphere. From numerical simulations it was concluded, that TSI changes could cause surface temperature changes of the order of a few tenths of a degree Celsius. Satellite data in combination with historically recorded sunspot number, records of cosmogenic isotopes and characteristics of other Sun-like stars indicate quasi-periodic TSI changes of 0.24 to 0.30% on the centennial time scale (Le Treut et al. 2007, IPCC-WG I, Chapter 1, p. 107–108, see references therein).
- 11. One problem concerns the evaluation and interpretation of stellar data. By recent reassessment of such data it was not possible to separate low emission in non-cycling stars (Maunder-minimum type) from higher emission in cycling stars. Furthermore, the current Sun is thought to have "typical" (rather than high) activity relative to other stars. Another problem is the possibility of long-term instrumental drifts in historical indices of geomagnetic activity.
- The open flux is well correlated with cosmogenic isotopes, which are modulated by heliospheric processes.

13. The favour of ion-induced nucleation compared to homogeneous nucleation results from two effects: Firstly, ion clusters represent nucleation sites for heterogeneous nucleation. A part of their surface serve automatically as a part of the interface area, required to separate the new embryo from the ambient mother phase. Thus, the surface formation energy is considerably decreased, if the vapour condenses on a pre-existing particle surface. Secondly, the work of Coulomb attraction forces act in the same direction as the volume term of formation energy, i.e., it decreases considerably the work required to form a cluster of critical size.

- 14. There are numerous examples in physics of large energy amplification factors. For example, nuclear chain reactions are released by a few initial neutrons (Wolfendale, 2001).
- 15. An increased solar attribution during the last century could indicate a steeper anthropogenic rise in recent decades.
- 16. If GCRs are able to modify the CCN number concentration in certain regions of the atmosphere, this may affect both cloud lifetime and albedo.
- 17. Wolfendale (2001) summarised the motivation to get deeper insight in the GCR-cloud mechanism by controlled experiments in a convincing statement: "If our only tool is correlation, we may continue another two centuries and still not be able to understand the underlying mechanism."
- 18. CLOUD is an acronym for Cosmic Leaving OUtdoor Droplets.
- 19. Theoretical studies of, e.g., Yu (2001) and D'Auria and Turco (2001) have shown, that ionisation effects are highly non-linear. Thus, experiments must reproduce ionisation rates and ionisation densities close to natural GCRs. Such conditions cannot be achieved with radioactive sources. A CERN pion beam closely duplicates natural GCRs and provides a precisely controlled and delivered particle ionisation inside the active volumes of the experiments.

Sigmund Jähn

Deutsche Beiträge zur bemannten Raumfahrt Erinnerungen an Hermann Oberth

In Deutschland war es Hermann Oberth, der sich am Anfang des vorigen Jahrhunderts wissenschaftlich mit den Voraussetzungen und Möglichkeiten der Raumfahrt befasste. Sein Buch, "Die Rakete zu den Planetenräumen" war keine Phantasterei, sondern enthielt die mathematischen Grundlagen für die Schaffung von Raketen und Raumschiffen und wurde zum Standardwerk in der Anfangszeit der Raumfahrtentwicklung in Deutschland.

In den 1920er und 1930er Jahren entstanden in Deutschland auf dieser Grundlage Vereine zur Förderung der Raumfahrt.

Nach der Machtergreifung der Nationalsozialisten wurde die militärische Bedeutung von Raketen als perspektivische Fernwaffe erkannt. Unter der Leitung von Wernher von Braun, einem Schüler Oberths, wurden in Peenemünde Raketen (V-2) für Kriegszwecke gebaut. Sofort nach dem 2. Weltkrieg griffen die Sieger nach diesen Raketen und den deutschen Fachleuten um eigene militärische Fernraketen zu entwickeln. Deutschland war von der Raumfahrtentwicklung zunächst ausgeschaltet.

Den Wettlauf zwischen der Sowjetunion und den USA auf diesem Gebiet entschied am 4. Oktober 1957 der kleine Sputnik. Eine Interkontinentalrakete konnte eine militärische oder zivile Nutzlast auf eine Umlaufbahn um die Erde bringen. Am 12. April 1961 flog dann Juri Gagarin als erster Mensch einmal um die Erde

Nach dem 2. Weltkrieg wurden die beiden deutschen Staaten in die Raumfahrtprogramme der jeweiligen Blöcke eingebunden. Während die Bundesrepublik der ESA beitrat, wurde die DDR Mitglied im Programm Interkosmos. Beide Staaten leisteten einen angemessenen wissenschaftlichen Beitrag; zunächst bei Geräteentwicklungen für die unbemannte Raumfahrt. Bei Carl Zeiss Jena wurde die Multispektralkamera MKF-6 entwickelt und gebaut – und 1975 zum ersten Mal in einem bemannten sowjetischen Raumschiff eingesetzt.

96 Sigmund Jähn

Im Sommer 1976 machte die sowjetische Regierung den Vorschlag, im Rahmen des Interkosmos-Programms Kosmonauten aus den beteiligten Ländern auszubilden. Technische Basis dafür war die im Bau befindliche neue Raumstation SALUT 6. Zum wissenschaftlichen Programm des DDR-Kosmonauten (Raumflug vom 26. August bis 3. September 1978) gehörten umfangreiche Aufgabenstellungen zur Fernerkundung der Erde. In der alten Bundesrepublik war die Entwicklung ähnlich. Ulf Merbold erfüllte als erster westeuropäischer Astronaut 1985 ein umfangreiches wissenschaftliches Programm auf dem Komplex SPACE SHUTTLE/SPACELAB.

Nach 1990 gab es mehrere gemeinsame bemannte Raumflüge deutscher Raumfahrer auf der Grundlage von Abkommen sowohl mit der NASA als auch mit der Russischen Raumfahrtagentur. Gegenwärtig sind die Aktivitäten der Bundesrepublik Deutschland auf dem Gebiet der bemannten Raumfahrt in die Europäische Weltraumagentur ESA integriert.

Die Internationale Raumstation ist noch im Ausbau begriffen. Mit der Wiederaufnahme des Flugprogramms nach dem Verlust eines Space Shuttle arbeitete Thomas Reiter, der erfahrenste Astronaut der ESA, vom Juli bis Dezember 2006 in der Raumstation. Zwei wichtige Beiträge der Europäer, das Transportmodul ATV und das wissenschaftliche Modul COLUMBUS, könnten noch in diesem Jahr zur ISS gestartet werden.

Winfried Papenfuß

Der Beitrag des Instituts für Luftfahrtmedizin Königsbrück zur raumfahrtmedizinischen Forschung

Meine sehr verehrten Damen und Herren!

Wenn man sich die Vortragsthemen der heutigen Veranstaltung Ihrer ehrwürdigen Sozietät anschaut, dann mag es kleinlich anmuten, an vergleichsweise bescheidene Anfänge deutscher raumfahrtmedizinischer Forschung erinnern zu wollen. Aber ohne Anfänge keine Fortsetzung.

Unter den irdischen Siedlungen Sachsens gibt es zwei, deren Namen untrennbar mit den Anfängen deutscher Beiträge zur Raumfahrtmedizin verbunden sind. Das ist natürlich Rautenkranz, und das ist das Städtchen Königsbrück, nördlich von Dresden gelegen, seit 1961 Heimat des Instituts für Luftfahrtmedizin.

Welche Rolle spielte das Institut in der Raumfahrtmedizin?

- hier begann die medizinisch-psychologische Auswahl der ersten deutschen Kandidaten für einen Raumflug;
- hier wurde ein Teil der ersten medizinischen und psychologischen Experimente für diesen Flug vorbereitet und
- hier wurde nach dem Flug August/September 1978 systematisch an raumfahrtmedizinischen Projekten gearbeitet.

Die Kandidatenauswahl startete am 3. August 1976 mit der so genannten ambulanten medizinischen Etappe. Langjährige Erfahrung in der flugmedizinischen Begutachtung – jährlich 4500 bis 5000 Expertisen – prädestinierten das Institut für diese Aufgabe. Sie wurde im November 1976 mit der Auswahl von vier Kandidaten abgeschlossen.

Die medizinisch-psychologische Auswahl wurde von Dr. Hans Haase geleitet. In seinen Händen lag auch die medizinische Betreuung der Kandidaten während der weiteren Flugvorbereitung. Er kann für sich in Anspruch nehmen, der erste deutsche Arzt zu sein, unter dessen medizinischer Betreuung ein Kosmonaut erfolgreich den Flug absolvierte. Ihm ist es auch zu danken,

dass die Methodik des medizinisch-psychologischen Auswahlverfahrens in der Folgezeit unter Berücksich-tigung nationaler Bedingungen neu gestaltet wurde, und als komplettes Programm anwendbar vorlag.

Bereits im Vorfeld des Fluges wurde der medizinisch-psychologische Teil des orbitalen Forschungsprogramms konfiguriert und dann 1976 bis 1978 in konkrete Experimente für den Flug Bykowskij/Jähn überführt.

Bekanntlich umfasste dieses Programm der Besatzung von Sojus 31/Salut 6 Kowaljonok, Iwantschenkow, Bykowskij, Jähn sieben medizinische bzw. psychologische Experimente, die von Sojus 31 in den Komplex gebracht wurden. Davon wurden durch das Institut für Luftfahrtmedizin die Experimente

- Audio
- Zeit
- Sprache und
- Befragung, dieses gemeinsam mit anderen Interkosmosländern, vorbereitet und zur Flugreife gebracht.

"Audio" diente der Hörschwellenbestimmung in verschiedenen Frequenzbereichen. Der VEB Präcitronik Dresden hatte dafür das Gerät "Elbe" gebaut.

Mit "Zeit" wurden Veränderungen in der Zeitwahrnehmung unter Flugbedingungen erfasst.

Im Experiment "Sprache" wurden Frequenz- und Amplitudencharakteristika der Sprache zur Beurteilung der emotionalen Anspannung analysiert. Zwo-sechsundzwanzig soll noch heute die Lieblingszahl von Sigmund Jähn sein.

Das Experiment "Befragung" diente der Erfassung der Zustände Monotonie, psychische Sättigung, arbeitsbedingte Ermüdung und der Beurteilung des Stressverhaltens.

Man kann diesen Experimenten auch heute noch Aufmerksamkeit entgegen bringen, wenn man in Rechnung stellt, dass es damals doch um recht einfach anmutende, aber im Grunde fundamentale Fragen ging. Zum Beispiel:

- Wie verhalten sich verschiedene Basisparameter des Herz-Kreislauf- Systems und der äußeren Atmung oder
- wie k\u00f6nnen Sinnesmodalit\u00e4ten in der Schwerelosigkeit modifiziert werden?

Fraglos erhielt die Mitarbeit des Instituts in der "Ständigen Arbeitsgruppe Kosmische Biologie und Medizin" durch den Flug einen erheblichen Auftrieb. Die Ergebnisse der Experimente mussten ausgewertet werden, die schon erwähnte Auswahl- und Vorbereitungsmethodik war zu erarbeiten und

neue Experimente waren vorzubereiten und in verschiedenen Flugprogrammen zu etablieren.

Es war von großem Vorteil, dass das Institut zeitlich parallel grundlegend modernisiert wurde:

- eine 10-Meter-Hochleistungszentrifuge für Humanuntersuchungen bis 10g und für Materialprüfungen bis 40g sowie ein Unterduck-/Dekompressionskammerkomplex wurden errichtet (B. Ullrich)
- Leistungsfähige psychophysiologische Messplätze, vorwiegend zur Untersuchung der operationellen Zuverlässigkeit (H. Kammel, J. Friedrich, M. Handt), wurden geschaffen.

Damit waren, im europäischen Maßstab gesehen, einzigartige technische und methodische Voraussetzungen für eine solide Mitarbeit des Instituts an raumfahrtmedizinischen Programmen sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene entstanden.

Auf diesen Grundlagen wurde die raumfahrtmedizinische Forschung besonders in der zweiten Hälfte der achtziger Jahre unter maßgeblicher Beteiligung von Hans Haase und korrigierender Mitwirkung von Sigmund Jähn in solide Entwicklungsbahnen gelenkt.

Eine Richtung betraf die Weiterentwicklung der Experimente von 1978 für die Bedingungen von Langzeitflügen. Dafür zwei Beispiele:

"Audio" wurde zur Erfassung von akustischen Begleitbedingungen mit einem Präzisionsschallpegelmesser kombiniert, entwickelt vom VEB Robotron Messelektronik Dresden unter wissenschaftlicher Leitung von Dr. Rudolf Mocker. Hörschwellenveränderungen konnten im Vor-Nach-Vergleich sauber erfasst werden.

Die langjährigen Erfahrungen des Instituts in der Analyse der Sprachgrundfrequenz im Interesse der operationellen Zuverlässigkeit (J. Friedrich, H. Vaic) waren die Grundlage für die Entwicklung einer entsprechenden Apparatur durch das Zentrum für wissenschaftlichen Gerätebau der AdW und zur Installation im Raumflugzentrum der UdSSR. Die Analysemethode erhielt eine hohe Wertschätzung des Anwenders, weil sie einen wertvollen Beitrag zur Flugsicherheit leistete.

Eine zweite Richtung betraf die Entwicklung neuer Experimente bzw. Untersuchungsmethoden für den kosmischen Einsatz und für Simulationsbedingungen. Auch hier nur zwei Beispiele:

Für das Experiment "Oxitest" entwickelte Dr. Haase in Zusammenarbeit mit dem Technisch-physikalischen Gerätebau Dresden Methodik und Gerät zur Messung des Sauerstoffpartialdrucks im Kapillarblut von Kosmonauten während Langzeitflügen. Die bei einer Besatzung der Orbitalstation "MIR" durchgeführten Messungen ergaben ein Absinken des pO2 während des Fluges um 12 bis 30 % gegenüber den Vorflugwerten.

Die dritte entwickelte Arbeitsrichtung basierte auf den neuen technischen Voraussetzungen des Instituts. Sie beinhaltet Antiorthostase- und +Gz-Toleranz-Untersuchungen sowie die Beteiligung an Hypokinesie-Studien bezüglich der Wirkungen dieser Faktoren auf das kardiorespiratorische System.

Zu allen drei Arbeitsrichtungen pflegte das Institut eine intensive Zusammenarbeit, u.a. mit

- · dem IMBP in Moskau.
- dem Flugmedizinischen Institut in Warschau,
- dem Institut f
 ür Pathophysiologie an der Charite unter Leitung des ewig jungen Nestors der deutschen Raumfahrtmedizin, Prof. Karl Hecht und
- dem Institut für Kosmosforschung der AdW.

Soweit, meine sehr verehrten Damen und Herren, mein kurzer Rückblick, mit dem ich auch heute noch allen, die in diesen Anfangsgründen der Raumfahrtmedizin in der DDR mitgewirkt haben, danken möchte.

Und Ihnen danke ich dafür, dass Sie diesem Bericht eines Zeitzeugen, zu dem mich Herr Kautzleben berufen hat, Aufmerksamkeit entgegenbringen konnten.

Maria von Schönermark, Hans Peter Röser, René Laufer

50 Jahre Raumfahrt – vom Sputnik zum universitären Kleinsatelliten

1. Beginn des Raumfahrtzeitalters

Am 4. Oktober 1957 ließen die Signale von Sputnik 1 die Welt aufhorchen. Ob sie nun mit Erstaunen, Begeisterung oder Erschrecken aufgenommen worden sind – allen wurde bewusst, dass ein uralter Menschheitstraum sich zu verwirklichen begann und das Zeitalter der Entdeckung, Erforschung und Nutzung des Weltraums eröffnet war. Von nun an kamen neue und faszinierende Meldungen Schlag auf Schlag. Die Technik entwickelte sich in unvorstellbarem Tempo, angetrieben vom politischen Geist jener Zeit, der gebot, Stärke und Überlegenheit zu demonstrieren: Die Raketentechnik wurde in Ost und West erfolgreich vorangetrieben. Es begann ein Wettlauf, welche Großmacht den ersten Menschen erfolgreich ins All zuschicken vermochte und die erste Landung auf dem Erdmond verwirklichen konnte. Die ersten Helden im All haben bis an ihre physischen Grenzen trainiert und ungeheueren Mut bewiesen. Ihnen war es vergönnt, erstmalig große Teile unserer Erde oder gar eine ganze Hemisphäre auf einen Blick zu erfassen.

Bereits 1958 wurden amerikanische und sowjetische Raumsonden zum Mond gestartet, leider versagte in der Anfangsphase noch oft der Start, aber schon 1959 konnten verschiedene Sonden am Mond vorbei fliegen. 1966 erreichten Sonden beider Nationen eine Umlaufbahn um den Mond. Wenn auch die schnelle Entwicklung der Raketen- und Satellitentechnik in erster Linie durch das Prestigedenken der Mächtigen der Politik und die militärischen Überwachungsmöglichkeiten, die sich beiden Großmächten bot, gefördert wurde, so entwickelten doch bereits vor dem Start des Sputnik und verstärkt danach Wissenschaftler und Ingenieure viele Vorstellungen und neue Ideen zur Nutzung der Raumfahrttechnik für die Kommunikation und Navigation, zur Erforschung und Bestandsaufnahme der Erde und ihrer Atmosphäre und zur Erweiterung unseres Wissens im Bereich der Astronomie und Planetenerkundung.

Bereits die Schwächung der Signale von Sputnik-1 wurde für eine erste Abschätzung der Dichte der oberen Atmosphäre genutzt. Jeder neue Satellit trug zur Erweiterung unseres Wissens bei. Mit dem am 31. Januar 1958 gestarteten Explorer-1 wurde der Van-Allen-Strahlungsgürtel entdeckt.

Am ersten April 1960 umrundete TIROS-1 (Television Infrared Observation Satellite) auf einer nahezu zirkularen Umlaufbahn die Erde: er war der erste Satellit, der mit einer Videokamera Wolkenbilder aufnahm und im MHz-Bereich zur Erde sendete – ab 1963 mit TIROS-8 – sogar in Echtzeit. Eine neue Ära für die Meteorologie speziell und für die Erdbeobachtung im Allgemeinen hatte begonnen! Entsprechend ihrem Gewicht müssen diese ersten Kommunikations- und Wettersatelliten durchaus zu den Kleinsatelliten gezählt werden. So lag das Gewicht der TIROS-Satelliten (TIROS 1 bis 10) zwischen 120 kg und 148 kg, ebenso lagen die Gewichte der TOS-Serie (= TIROS Operational Satellite) zwischen 145 und 300 kg. Die TOS-Satelliten gewährleisteten bereits regelmäßige und zuverlässige Informationen über die Atmosphäre, die es möglich machten, Satellitendaten als Arbeitsgrundlage im Ablauf der meteorologischen Vorhersage fest zu verankern. 1970 wurde NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) gegründet, um den operationellen Dienst zu sichern und zu verbessern. NOAA-1, der erste Satellit dieser auf einem polaren sonnensynchronen Orbit umlaufenden Serie. der Dezember 1970 gestartet wurde, hatte noch ein Gewicht von 352 kg. Zur besseren Überwachung der Erde und ihrer Atmosphäre wuchs die Zahl hochwertiger Sensoren auf den meteorologischen Satelliten ständig an. METOP, mit dem EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) den Morgenumlauf eines NOAA-Satelliten seit 15. Mai 2007 operationell übernommen hat, wiegt 4,1 t! Seine wissenschaftlichen Daten gehen im Umfang und an Qualität aber weit über die der Anfänge hinaus und werden die Güte und den Vorhersagezeitraum der Wetterprognosen sowie die detaillierte Zustandsaufnahme der Atmosphäre weiter verbessern.

Heutige Kommunikationssatelliten, wie beispielsweise Intelsat-6, die mit einer Masse von etwa 4,5 t gestartet werden, sind für eine Lebensdauer von 10 bis 15 Jahre berechnet, dienen zum Betreiben dreier TV-Kanäle und ermöglichen bis zu 120 000 Telefonverbindungen. Die Sendeleistung beträgt 2600 W.

Die Satelliten zur Erforschung der Erde und ihrer Atmosphäre nahmen mit der Zeit an Masse und Volumen ebenfalls beträchtlich zu. Für die Erdbeobachtung wurden immer komplexere Missionen angestrebt mit zahlreichen Messinstrumenten. Der im März 2002 gestartete ENVISAT (Environmental

Satellite) der ESA (European Space Agency) trägt 10 Instrumente, deren Masse einschließlich der Interface-Hardware 2150 kg erreicht. Die Abmessungen von ENVISAT im Orbit betragen 26 m x 10 m x 5 m und sein Startgewicht war 8140 kg (einschließlich 319 kg Hydrazin)!

2. Kleinsatelliten

Kleinsatelliten werden nicht einheitlich klassifiziert, im Allgemeinen geht man davon aus, dass ihre Gesamtmasse (einschließlich des mitgeführten Treibstoffes) kleiner als 500 kg (manchmal auch < 1000 kg) beträgt. Somit zählen Sputnik I und auch Sputnik II, der die Hündin Laika an Bord hatte, durchaus in die Familie der Kleinsatelliten. Sputnik III, gestartet am 15. Mai 1958, war mit 1395 kg bereits kein Kleinsatellit mehr. Er führte schon 12 wissenschaftliche Messinstrumente mit sich, deren Daten jedoch wegen des defekten Bandrekorders nicht aufgezeichnet werden konnten.

Wenn auch, wie oben beschrieben, zunächst das Hauptgewicht auf der Entwicklung schubstärkerer Raketen und größerer und schwerer Satelliten lag, so wurden doch vom Beginn des Weltraumzeitalters an immer wieder auch Kleinsatelliten in den erdnahen Orbit gebracht und leichte Sonden zum Mond oder zu interplanetaren Missionen auf die Reise geschickt (Abb. 1).

In der Sowjetunion und in den USA sind eine Reihe von Kleinsatelliten gestartet wurden. Die Mitteilungen dazu sind jedoch spärlich und erschweren eine Übersicht. Ein Grund dafür liegt in dem hohen Anteil an militärischen Kleinsatelliten in dieser Zeit.

Eine große Rolle im Bereich der Kleinsatelliten spielten und spielen die Amateurfunksatelliten, die OSCAR- (Orbital Satellite Carrying Amateur Radio) Satelliten. Der erste OSCAR-Satellit wurde am 12. Dezember 1961 mit einem AirForce-Satelliten huckepack ins All befördert. Sein Gewicht betrug 4,5 kg, seine Sendeleistung 140 mW.

Telstar-1 war der erste kommerziell gestartete Kleinsatellit. Dieser erste Kommunikationssatellit wurde als Gemeinschaftsprojekt der NASA und amerikanischen und westeuropäischen Telekommunikationsunternehmen am 10. Juli 1962 gestartet.

Die erste Mondsonde und erste Raumsonde überhaupt, die das Schwerefeld der Erde verließ, war Lunik-1 (= Luna-1 = мечта = Wunschtraum) mit einer Masse von 361,3 kg. Sie startete von Baikonur am 2. Januar 1959; wegen zu hoher Geschwindigkeit verfehlte sie den Mond, sammelte aber beim Vorbeiflug wertvolle Daten für künftige Missionen. Zwei Monate später flog Pioneer 4 mit 6 kg in 60 000 km Entfernung am Mond vorbei und überwand

anschließend ebenfalls die Erdschwerkraft. Mit seiner Hilfe wurde der 2. Van-Allen-Gürtel entdeckt.

Als wohl erste interplanetare Mission ist Mariner 1 (202 kg) in die Geschichte eingegangen. Sie wurde am 22. Juli 1962 mit einer Atlas Agena B von Cape Canaveral aus gestartet mit dem Ziel, an der Venus vorbei zu fliegen und Daten über die Venusatmosphäre zu sammeln.

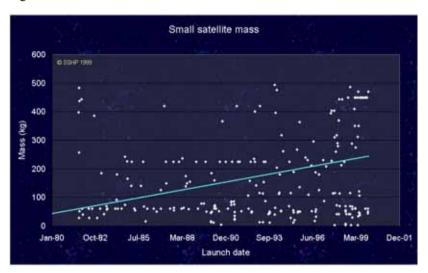
Der erste erfolgreich gestartete Kleinsatellit (52 kg) einer Universität war UoSAT-1 (University of Surrey Satellite), ein Radio-Amateursatellit, der spätere Oscar 9. Mit ihm konnte gezeigt werden, dass eine Universität in der Lage ist, Satelliten mit technisch und wissenschaftlich anspruchvollen Aufgaben in den Orbit zu bringen. Es war der erste Satellit, der einen Mikroprozessor an Bord hatte.

Mit Beginn der achtziger Jahre wuchs die Zahl der Kleinsatelliten rasch an (Abb. 1). Die Entwicklung hochleistungsfähiger kompakter Computerchips, die Einführung der CCD-Technik, die Entwicklung von Nanotechnologie und Mikroelektronik und damit die mögliche Minimierung der Sensoren bezüglich Größe, Masse und Energieverbrauch, sowie das GPS (Global Positioning System) machten diese Entwicklung möglich. Ungeachtet der Tatsache, dass die großen Satelliten insbesondere im Bereich der Kommunikation und Erdbeobachtung durchaus notwendig sind (das Radiometer an Bord des MSG (Meteosat second generation im geostationären Orbit) wiegt allein 270 kg), können einige Vorteile von Kleinsatelliten genannt werden. Da Kleinsatelliten eine wesentlich kürzere Entwicklungszeit als die großen und komplexen Satelliten haben, lassen sich neueste technische Entwicklungen viel leichter implementieren. Das Einfrieren der Spezifikationen geschieht viel später als bei sehr großen Satelliten. Ein kleines Entwicklungsteam steht in sehr engem Kontakt und arbeitet, da das Ziel für jeden überschaubar ist, meist mit sehr hohem Engagement. Für ein so kleines Team kann auch die Dokumentationspflicht etwas reduziert werden. Designänderungen können kurzfristig realisiert werden. Des Weiteren sind die Startkosten für Kleinsatelliten niedriger. Es können kleinere Startraketen benutzt werden, eventuell Umrüstungen aus militärischen Trägern, oder es können Huckepack-Starts vereinbart und ausgehandelt werden. Diese Gedanken haben zu der NASA-Losung "Faster, Better, Smaller, Cheaper" in den 90er Jahren geführt und die Aufmerksamkeit stärker auf die Möglichkeiten von Kleinsatelliten gelenkt.

In diesem Zusammenhang ist es interessant, dass von der IAA (International Academy of Astronautics) eine andere Definition für Kleinsatelliten versucht wurde: Eine Mission mit Kleinsatelliten sollte ungewöhnliche und

unkonventionelle Lösungen verfolgen, sie sollte versuchen, eine Lücke oder Nische in der Forschung zu füllen, die mit großen Satelliten noch nicht gelöst wurde, und sollte in kurzer Zeit verwirklicht werden können. Wenn sich diese Definition auch nicht durchgesetzt hat, so beschreibt sie dennoch typische Besonderheiten von Kleinsatellitenmissionen, die diese so attraktiv machen.

Für universitäre Kleinsatelliten ist zusätzlich noch erwähnenswert, dass Universitäten eine größere Risikobereitschaft akzeptieren können als es der Industrie oder den Raumfahrtagenturen möglich ist. So werden oft handelsübliche und damit preiswerte Bauteile, die im Universitätslabor auf Weltraumtauglichkeit getestet werden, eingesetzt. Nicht zuletzt erlauben der Bau und die Nutzung universitärer Kleinsatelliten eine hohe innovative Forschung, die sich zwangsläufig in der Lehre widerspiegelt. Die Studenten sind durch ihr Interesse am Erfolg des Satelliten, den sie mit entwerfen oder bauen können, hoch motiviert, entfalten frühzeitig Kreativität und haben so hervorragende Berufschancen.



Die Abbildung zeigt, daß die Zahl der Kleinsatelliten insgesamt zugenommen hat, im Bereich von 100 kg bis 500 kg ebenso wie im Bereich von 1 kg bis 100 kg

Abb. 1: http://centaur.sstl.co.uk/SSHP/charts/SmallsatChart10.gif

Abbildung 1 zeigt die Zunahme der Starts von Kleinsatelliten zwischen 1981 und 2001. Darüber hinaus geht aus der Fachliteratur hervor, daß in den 80er Jahren militärische Betreiber den größten Anteil aller Kleinsatelliten zum

Start brachten.. Ab Mitte der 90iger Jahre wächst die zivile Nutzung von Kleinsatelliten an; zu Ende der 90iger Jahre werden Kleinsatelliten vor allem durch den kommerziellen Sektor gestartet. Von den Anwendungen her beurteilt, wurde und wird die überwiegende Zahl der Kleinsatelliten für Kommunikationszwecke eingesetzt.

3. Stuttgarter Kleinsatellitenprogramm

2002 wurde am Institut für Raumfahrtsysteme der Universität Stuttgart ein Stuttgarter Kleinsatellitenprogramm ins Leben gerufen. Dieses Programm dient gleichermaßen der Lehre und Forschung; Studenten, akademische Einrichtungen und Industrieunternehmen arbeiten gemeinsam an den wissenschaftlichen Zielstellungen der einzelnen Missionen, an deren Entwurf und Bau. Der Abschluss dieses Programms soll der Flug einer Sonde zum Mond (Lunar Mission BW1) sein. Die Kleinsatelliten – als Vorläufer dieser Mondsonde – sollen zumindest teilweise Komponenten testen, die für Lunar Mission BW1 unabdingbar sind.

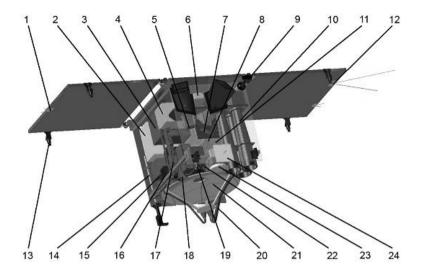
3.1 Flying Laptop

3.1.1 Neue Technologien auf dem Flying Laptop

Der erste Satellit (mit dem Namen "Flying Laptop") dieses Programms wird gegenwärtig gebaut und soll durch einen Huckepack-Start mit der indischen Rakete PSLV (Polar Satellite Launch Vehicle) in einen sonnensynchronen niedrigen Erdorbit (500 bis 900 km Höhe) gebracht werden. Der "Flying Laptop" wird in erster Linie dem Test neuer Technologien dienen und so die Mondmission vorbereiten. Zum anderen sollen diese innovativen Technologien aber auch zur Demonstration neuer Erdbeobachtungsmethoden eingesetzt werden.

Der "Flying Laptop" ist etwa würfelförmig mit Kantenlängen von 60 cm x 70 cm x 80 cm und wiegt etwa 120 kg. Eine genaue Lageregelung wird durch eine Dreiachsenstabilisation gewährleistet. Abbildung 2 zeigt eine schematische Übersicht zum Aufbau des Satelliten.

Zu den zu erprobenden neuen Technologien auf dem "Flying Laptop" zählen der auf einem Field Programmable Gate Array (FPGA) basierende On-Board-Computer, ein neues Lageregelungssystem, dreischichtige GainP2/GAAs/Ge-Solarzellen, ein Ka-Band-System und ein neuer Entfaltungsmechanismus für die Solarpaneele.



- 1 S-Band Antenne (Low Gain)
- 2 Kommunikationselektronik
- 3 Ka-Band Elektronik
- 4 On-Broad Computer
- 5 Sternenkameras
- 6 Magnetometer
- 7 Reaktionsräder
- 8 Energie-Kontroll-Elektronik
- 9 Sonnensensoren
- 10 optisches Kamerasystem
- 11 faseroptische Kreisel
- 12 VHF-Antenne
- 13 Entfaltungsmechanismus
- 14 Magnetspulen
- 15 ultrastabiler Oszillator
- 16 thermische Kamera
- 17 Wanderfeldröhre
- 18 Ka-Band (Low Power)
- 19 Panoramakamera
- 20 Feed Hörner
- 21 Cassegrainsstem
- 22 Li-Ion Batterie
- 23 S-Band Antenne (High Gain)
- 24 UHF Antenne

Abb. 2: Die Hauptkomponenten des "Flying Laptop"

Der On-board Computer kommt ohne Prozessor aus. Er besteht aus "Vor Ort programmierbaren Logikbausteinen" (FPGAs), durch deren Konfiguration digitale Schaltungen realisierbar sind. Verwendet wird ein kommerzieller FPGA-chip (Xilinx Virtex-II Pro) mit ungefähr vier Millionen Gattern (das sind Schaltungen, die elementare Operationen der Boolschen Algebra ausführen) und einer maximalen Taktfrequenz von 200 MHz.

Das FPGA-System ist mit einem 4 MB synchronen statischen RAM ausgestattet, das es ermöglicht, maximal 160 Millionen Pixel/sec zu verarbeiten. Das 2 x 128 MB Double Data Rate-RAM (DDR RAM) wird für klassische Software eingesetzt und kann zum Ablegen großer Datenbanken dienen. Ein FPGA ist sehr einfach rekonfigurierbar. Das hat zum Namen "Flying Laptop" des Kleinsatelliten geführt, denn die große Flexibilität des on-board-Computersystems kann auch genutzt werden, um den Kleinsatelliten an Firmen zu vermieten, denen es darum geht, ihre Software für eine bestimmte Zeit im Weltall zu testen. Von einer Software zu einer anderen kann in Echtzeit umgeschaltet werden.

Zur Dreiachsenstabilisierung besitzt der Satellit vier Reaktionsräder, die tetraederförmig angeordnet sind, und drei Magnetspulen zur Entsättigung der Reaktionsräder. Für die Messung der Lage und Bewegung werden fünf Sensortypen eingesetzt: zwei Magnetometer, mehrere Sonnensensoren, vier faseroptische Kreisel, eine Sternkamera mit zwei Sensorköpfen und ein GPS-Navigationssystem bestehend aus drei Empfängern. Letzteres ist besonders erwähnenswert. Es besteht aus drei Phoenix GPS Empfängern, deren Firmware vom DLR/GSOC für den Weltraumeinsatz modifiziert wurde und die für die genaue Orbit- und Lagebestimmung mit einem stabilen 10 MHz Oszillator verbunden sind. Die Genauigkeit für die Pointierung wird durch die Sternenkamera u-Advanced Stellar Compass der Technischen Universität Dänemark bestimmt, deren Messgenauigkeit im Bereich von 1-2 Bogensekunden (1σ, senkrecht zur opt. Achse) liegt bei Drehraten unter 0.025°/s und 2 Hz Abtastrate. Für die Telemetrie und das Telekommando ist der "Flying Laptop" mit UHF (Low gain) und S-Band (low and high gain) Antennen ausgestattet. Zur Vorbereitung des Fluges zum Mond wird zusätzlich eine Wanderfeldröhre (Travelling wave tube) zur Verstärkung eines Ka-Band Signals getestet. Sie erreicht im Sendebetrieb eine Sendeleistung von 57 W. Damit ist eine Datenübertragung mit 500 Mbit/s möglich. Neben der hohen Datenübertragungsrate ist ein weiterer Vorteil der Nutzung des Ka-Bandes, dass kleinere Bodenantennen zur Telekommunikation ausreichen. Als Antenne für

die Ka-Band Kommunikation dient der Cassegrain-Primärspiegel, der neben dieser Aufgabe auch als Teleskop für die thermische Kamera genutzt wird.

Zum Aufladen der Batterien besitzt der "Flying Laptop" drei Solarpaneele; eines davon ist fest mit dem Satellitenkörper verbunden, die beiden anderen sind entfaltbar. Im Wesentlichen werden triple-junction Solarzellen GAGET1 (MoAg) mit einem Wirkungsgrad von 25% verwendet. In einem Ring mit 16 Zellen sollen die Leistungsfähigkeit und Alterung von GaINP/GaAs/Ge Solarzellen auf Ge-Substrat mit einem Wirkungsgrad von 28% unter Weltraumbedingungen getestet werden. Zur Entfaltung der Solarpaneele wurde ein neuer Mechanismus, der auf einem Schmelzdraht beruht, entwickelt. Dieser hat gegenüber herkömmlicher Pyrotechnik den Vorteil, geringere Schocks und damit eine geringere Störbewegung des Satelliten hervorzurufen.

3.1.2 Nutzlast

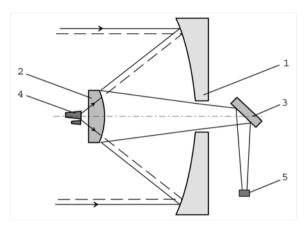
Zur Nutzlast des "Flying Laptop" zählen 3 Kameras (s. Tabelle 1), jeweils im grünen, roten und infraroten Spektralbereich, eine Kamera für den thermalen Bereich und eine panchromatische Kamera. Die Eigenschaften aller Kameras werden getestet, um die Mondmission vorzubereiten.

Halbwertsbreiten der Filter	
Grün	530 nm – 580 nm
Rot	620 nm – 670 nm
Nahes Infrarot	820 nm – 870 nm
Ground Sample Distance	25 m (bei 700 km)
Schwadbreite	25 km
Digitalisierung	12 bit
Energieverbrauch	~ 5 W
Größe	100 x 90 x 400 mm
Masse	~ 4 kg

Tab. 1: Parameter der Kameras im sichtbaren und nahen infraroten Bereich

Auf dem "Flying Laptop" wird auch eine thermische Kamera eingesetzt und für zukünftige Wärmekartierungen des Mondes getestet. Um für den Kleinsatelliten eine Platz sparende Lösung zu erreichen, kommen dem Hauptspiegel des Cassegrain-Systems zwei Aufgaben zu: Zum einen dient der konkavparabolische Spiegel als Reflektor für das Ka-Band-System (gestrichelte

Kurve in Abb. 3), zum anderen als Primärspiegel für die Bündelung der Strahlen des thermalen Bereichs. Diese gelangen dann über den Sekundärspiegel auf den Umlenkspiegel, der durch die Trennfilter die Strahlung des thermischen Bereichs auf die Kamera leitet.

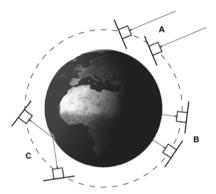


- 1 Hauptspiegel (Durchmesser 50 cm)
- 2 Sekundärspiegel
- 3 Strahlteiler
- 4 Feedhörner
- 5 Thermische Kamera

Abb. 3: Cassegrain System

3.1.3 Ausgewählte Aspekte der Erderkundung mit dem "Flying Laptop"

Einige neue Technologien auf dem "Flying Laptop" sollen auch genutzt werden, um neue Methoden der Erdbeobachtung zu demonstrieren. Dazu gehören die von der Beobachterposition abhängige Reflexion des Untergrundes im sichtbaren und nahen infraroten Bereich sowie eine neue Methode zur Bestimmung der Regenrate. Beide Methoden erfordern als Beobachtungsmodus den so genannten Target-Pointing Modus (Fall C in Abb. 4). Dabei wird der Satellit durch das Lageregelungssystem so ausgerichtet, dass er während eines gesamten Überfluges ein Bodentarget aus verschiedenen Richtungen beobachtet. Dieser Beobachtungsmodus erfordert eine sehr genaue Lageregelung des Satelliten. Das Lageregelungssystem des "Flying Laptops" kann die Anforderungen an den Target-Pointing-Modus gut erfüllen.



A: Inertial-Pointing-Modus B: Nadir-Pointing-Modus

C: Target-Pointing-Modus

Abb. 4: Drei Lagemodi des "Flying Laptop" für die Bildaufnahmen

3.1.3.1 Messung des bi-direktionalen Reflektanzfaktors (BRF) des Systems "Erde - Atmosphäre" im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich Modellierungen ([1], [2]) und Auswertungen ([3], [4]) von Satellitendaten haben gezeigt, dass geophysikalische und geochemische Produkte aus Fernerkundungsdaten wesentlich erfolgreicher und mit geringerer Unsicherheit abgeleitet werden können, wenn die Strahlung des zu untersuchenden Bodentargets sowohl in verschiedenen Spektralbereichen als auch unter verschiedenen Beobachtungswinkeln gemessen wird.

Die winkelabhängigen Reflexionseigenschaften einer Oberfläche werden mathematisch durch die bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF) beschrieben:

$$f(\lambda, \theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) = \frac{L(\lambda, \theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v)}{E(\lambda, \theta_s, \varphi_s)}$$
 Gl. (1)

In Gl. (1) bedeuten f die BRDF [sr⁻¹], L die spektrale Strahldichte, die in die Richtung ν reflektiert wird, λ die Wellenlänge, E die einfallende direkte, spektrale solare Strahlungsflussdichte, θ_s und ϕ_s Zenit- und Azimutwinkel der Sonnenposition und θ_{ν} und ϕ_{ν} Zenit- und Azimutwinkel der Beobachterposition.

Graphisch dargestellt oder als Zahlenwert angegeben wird im allgemeinen der bidirektionale Reflektanzfaktor BRF = πf , der dimensionslos ist (unter der Annahme, dass die BRDF einer idealen Lambertschen Fläche $1/\pi$ ist).

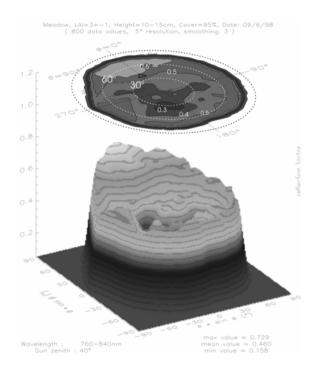


Abb. 5: Bi-direktionaler Reflektanzfaktor einer Weide im nahen Infrarot [5]

Abbildung 5 zeigt als Beispiel den aus Messungen in 7 m Höhe über einer Weide abgeleiteten bi-direktionalen Reflektanzfaktor. Die Messung erfolgte im nahen infraroten Spektralbereich, die Sonne stand 50° über dem Horizont. Im unteren Teil der Abbildung 5 findet man eine dreidimensionale Darstellung des BRF, im oberen Teil die Auftragung der BRF in Polarkoordinaten, wobei die Länge des Radiusvektors die Beobachterzenitdistanz darstellt und der Winkel den Azimut des Beobachters; das

Dreieck bezeichnet die Sonnenposition. Es zeigen sich sehr deutliche Unterschiede der Reflexion in den einzelnen Richtungen; für Vegetation ist typisch, dass die höchsten Werte der winkelabhängigen Reflexion im Rückwärtsstreubereich auftreten.

Der bi-direktionale Reflektanzfaktor von Untergrundarten kann vom Satelliten aus nicht direkt gemessen werden, weil die dazwischen liegende Atmosphäre infolge der anisotropen Streuung der Sonnenstrahlung an den Luftmolekülen und dem Aerosol den BRF des Untergrundes verändert.

Durch Modelle und Strahlungstransportrechnungen oder zusätzliche Messungen kann versucht werden, den Einfluss der Atmosphäre zu erfassen und den BRF des Untergrundes abzuleiten. Das Institut für Raumfahrtsysteme der Universität Stuttgart plant solche zusätzlichen Messungen in unterschiedlichen Etagen der Atmosphäre.

3.1.3.2 Nutzung des Ka-Bandes und Ku-Bandes zur Demonstration einer neuen Methode zur Regenmessung

Es existieren verschiedene Arbeiten ([6], [7]), die aufzeigen, dass die Differenz der Schwächung geeignet gewählter Frequenzen (vor allem im Bereich des Ka- und Ku-Bandes) beim Durchgang durch Regen linear mit der Regenrate verbunden ist und weitgehend unabhängig von Tropfenform und Tropfenspektrum. Die Gültigkeit dieses Postulats ist während des EU-Mantissa-Projekts durch die Messung urbaner Regenraten mittels horizontaler Links bereits erfolgreich bestätigt worden ([8], [9]). Daraus ist die Idee entstanden, auch mittels des "Flying Laptops" durch zusätzliche Ausrüstung des Kleinsatelliten mit einem Ku-Band Sender diese Methode im Target-Pointing Mode

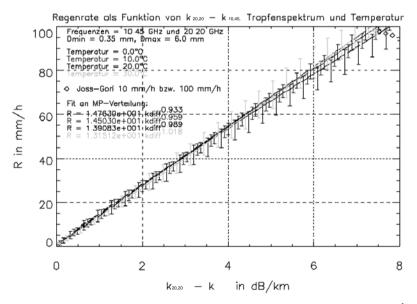


Abb. 6: Differenz der Einweg-Dämpfungskoeffizienten (20,20 GHz–10,45 GHz) in dB km⁻¹ als Funktion der Niederschlagsrate in mm h⁻¹ unter Variation der Tropfengröβenverteilung (Fehlerbalkendarstellung) und der Temperatur

zu demonstrieren und die Fehlerquote festzustellen. Im Falle einer erfolgreichen Demonstration ergäbe sich unter Nutzung dieser Methode die Möglichkeit, die Regenrate kostengünstig, engmaschig und global unter Nutzung der Frequenzen der Fernsehsatelliten zu bestimmen. Dankenswerterweise wurden vom Institut für Meteorologie und Klimaforschung der Universität Karlsruhe erste Rechnungen zu dieser Frage ausgeführt und später dem IRS das Rechenprogramm zur Berechnung der strahlintegrierten Dämpfung (PIA: path integrated attenuation) zur Verfügung gestellt [10]. Zur Vorbereitung der Demonstration mit dem "Flying Laptop" wurden verschiedene Rechnungen für die ausgewählten Frequenzen von 20,20 GHz und 10,45 GHz durchgeführt, variiert wurde die Tropfengrößenverteilung und die Temperatur.

Die Abbildung 6 demonstriert einen guten linearen Zusammenhang zwischen Regenrate und den Differenzen der Schwächungskoeffizienten zwischen Ka- und Ku-Band. Dieser Zusammenhang ist weitgehend unabhängig von der Tropfengrößenverteilung und bildet die Grundlage des zu demonstrierenden neuen Verfahrens der Regenmessung. In [6] wurde auch gezeigt, dass die lineare Beziehung zwischen Regenrate und der Schwächungsdifferenz von Ka- und Ku-band kaum von der Tropfengestalt abhängt.

Große Unsicherheiten treten allerdings in den Schmelzzonen auf, diese sind abhängig vom Schmelzgrad und von der vertikalen Mächtigkeit der Schmelzschicht. Hier fehlen verlässliche Werte, mit denen gerechnet werden kann. Nur Messungen können weiter helfen. Hierfür ist es sehr vorteilhaft, dass der "Flying Laptop" im Target-Pointing-Modus messen kann und dadurch verschieden lange Wege durch die Atmosphäre realisiert werden können. Zur näheren Untersuchung wäre der Einsatz eines polarimetrischen Radars sehr hilfreich

4. Vorbereitung der Lunar Mission BW1

4.1 Der Satellit Perseus

Auf dem Satellitenbus des "Flying Laptops" wird ein weiterer Satellit des Stuttgarter Kleinsatellitenprogramms, Perseus, basieren. Der Satellit mit etwa einer Masse von 150 kg wird ebenfalls – wie der "Flying Laptop" – in eine niedrige Erdumlaufbahn gebracht. Dort sollen zunächst zwei elektrische Triebwerke getestet werden, die notwendig sind, um die Mondsonde Lunar Mission BW1 vom Geotransfer-Orbit (GTO) in eine niedrige Mondumlaufbahn zu bringen. Zum einem handelt es sich hierbei um ein Cluster von instationären magnetoplasmadynamischen Triebwerken, die mit einem Festtreib-

stoff (Teflon) arbeiten und eine Austrittsgeschwindigkeit von je etwa 12 000 m/s und einen mittleren Schub von etwa je 1mN erreichen [11]. Zum anderen wird ein thermisches Lichtbogentriebwerk mit einer Austrittsgeschwindigkeit von etwa 5000 m/s und einem ungefähren Schub von 100 mN gegenwärtig im Labor getestet [12]. Als Treibstoff dient hier Ammoniak.

Nach Beendigung der Testphase für die Antriebe soll Perseus der Messung der UV-Strahlung ausgewählter astronomischer Objekte dienen, in Zusammenarbeit mit dem Institut für Astronomie und Astrophysik der Universität Tübingen. Dazu ist die Ausrüstung mit einem UV-Spektrometer, das im Bereich von 130–180 nm empfindlich ist, geplant.

4.2 Die Mondsonde Lunar Mission BW1

Die Mondsonde wird etwa 200 kg wiegen und von kubischer Gestalt mit der Kantenlänge von 1m sein. Sie ist dreiachsenstabilisiert und verfügt über 6 m² Solarpanele und Li-Ion-Batterien, um die notwendige elektrische Leistung von 1 kW zu gewährleisten. Weiterhin ist die Sonde mit einer 1 m Antenne ausgerüstet für das Ka-Band-Kommunikationssystem, als back-up dient ein S-Band-System. Auch der Bordrechner der Mondsonde wird ein FPGA sein.

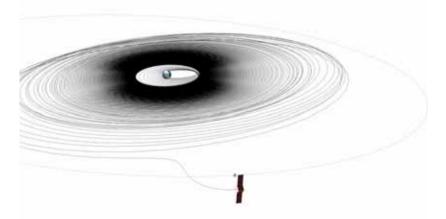


Abb. 7: Lunar Mission BW1: Aussetzen der Sonde im GTO, Ausweitung des Orbits über den vanAllen Gürtel, Erreichen des Gravitationseinflusses des Mondes, Einschwenken in einen hoch elliptischen Mondorbit, Übergang in einen niedrigen zirkularen Mondumlauf mit hoher Inklination, Messphase: Fernerkundung der Mondoberfläche, Kontrollierter Aufprall auf der
Mondoberfläche. Der schubstärkere Antrieb, das Lichtbogentriebwerk, das mit Ammoniak arbeitet, wird hauptsächlich für den Durchgang durch den van-Allen-Gürtel, zum Einschwenken in
den hoch elliptischen Mondorbits und zum kontrollierten Aufschlagen eingesetzt. Zur Richtungs-

änderung in der Umlaufbahn werden wegen der höheren Ausstoßgeschwindigkeiten vor allem die magneto-plasma-dynamischen Triebwerke dienen.

Mit den beiden Triebwerken, die sich zurzeit im Labortest befinden, werden 24 Monate Reisezeit bis zur Ankunft im niedrigen Mondorbit benötigt. Während dieser Zeit können aber bereits einige wissenschaftliche Experimente durchgeführt werden. Zur Diskussion stehen Untersuchungen von Staubpartikeln, die Beobachtung von NEOs (Near Earth Objects), Strahlungsmessungen sowie die nähere Untersuchung der Librationspunkte L4 und L5. Nach einem Announcement of Opportunity, das für 2008 geplant ist, soll eine endgültige Entscheidung getroffen werden.

Das Gleiche gilt für die Messphase, für einen Zeitraum von etwa 6 Monaten in einer Umlaufbahn von etwa 100 km über der Mondoberfläche. Hier können beispielsweise die Kameras im VIS/NIR-Bereich genutzt werden, die eine GSD (Ground sample distance) von 10 m erreichen, oder die thermische Kamera mit einer GSD von 20 m. Des Weiteren kann die Panoramakamera mit einer Schwadbreite von 30 km und einer GSD von mindestens 50 m eingesetzt werden. Aber auch andere Experimente wie Staubmessungen, Polarisationsmessungen, Blitzdetektion oder Nutzung des Ka-Bandes in Reflexionsexperimenten sind in der Diskussion [13].

5. Schlussfolgerung

Durch die technische Entwicklung und Miniaturisierung auf vielen Gebieten erlaubt die Entsendung von Kleinsatelliten heute, anspruchsvolle Aufgaben der Technik und wissenschaftlichen Forschung zu lösen. So ist es 50 Jahre nach dem Start von Sputnik 1 möglich, eine universitäre Sonde zum Mond zu schicken, die die Vertrauenswürdigkeit neuer Technologien testet und zur Lösung wissenschaftlicher Fragen beitragen kann.

Literatur

- [1] Spectra-Surface Processes and Ecosystem Changes Through Response Analysis ESA SP-1257(5), September 2001
- [2] Menetti, M., From observational objectives to the SPECTRA mission concept, 2nd SPECTRA Workshop, Oct. 2003
- [3] Knyazikhin Y., et.al, Analysis of the MISR LAI/FPAR product for spatial and temporal coverage, accuracy and consistency, Remote Sensing of Env. 107, 334–347, 2007
- [4] Su, L. et al., Support vector machines for recognition of semi-arid vegetation types using MISR multi-angle imagery, Remote Sensing of Env. 107, 299–311, 2007

- [5] Schönermark, M. v., Geiger, B., Röser, H.P (ed.), Reflection Properties of Vegetation and Soil with a BRDF Data base, Berlin 2004
- [6] Hardaker, P.J., Holt, A.R., Goddard, J.W.F, Comparing model and measured rainfall rates obtained from a combination of remotely sensed and in situ observations, Radio science 32 5, 1785–1796, 1997
- [7] Rahimi, A. R., Holt, A. R., Upton, G. J. G. and Cummings, R. J. (2003) The Use of Dual-Frequency Microwave Links for Measuring Path-Averaged Rainfall. Journal of Geophysical Research, 108 (D15): art. No. 4467.
- [8] Rahimi, A. R., Holt, A. R., Upton, G. J. G., Kramer, S., Redder, A. and Verworn, H-R., Attenuation calibration of an X-band weather radar using a microwave link, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 23 (3), 395–405, 2006
- [9] Upton, G. J. G., Holt, A. R., Cummings, R. J., Rahimi, A. R. and Goddard, J. W. F. (2005) Microwave links: the future for urban rainfall measurement? Atmospheric Research, http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.10.009
- [10]Blahak, U., Analyse des Extinktionseffekts bei Niederschlagsmessungen mit einem C-Band Radar anhand von Simulation und Messung, Diss. an der Fakultät für Physik der Universität Karlsruhe (TH), 2004
- [11] Nawaz, A., Bauder, U., Böhrk, H., Herdrich, G., Auweter-Kurtz, M., Electrostatic Probe and Camera Measurements for Modeling the IMPD SIMPLEX, AIAA-2007-75328, Joint Propulsion Conference "007, July 8–11 Cincinnati, Ohio, USA
- [12] Bock, D., Auweter-Kurtz, M., Kurtz, H., Roeser, H.-P., Experimental Investigation on Thermal Arcjet Thruster Development for a Science Mission to the Moon, IAC-06-C4.403, 57th International Astronautical Congress, Oct. 2–6, 2006, Valencia, Spain
- [13] Laufer, R., Roeser, H.-P., the Lunar Mission BW1 Project Team, Lunar Mission BW1 – An Academic Low-Cost Small Lunar Exploration Satellite, IAC-07-A3.I.A.03, 58th International Astronautical Congress, September, 24–28, 2007, Hyderabad, India, 2007

Jörg Albertz, Stephan Gehrke, Hartmut Lehmann

Topographische Karten der Mars-Oberfläche

1. Es begann in Berlin – Ein Blick in die Geschichte

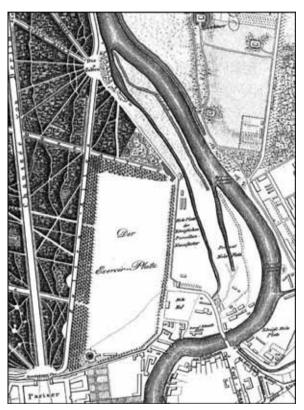


Bild 1. Der "Geburtsort" der Mars-Kartographie in Berlin, die in der Karte von 1833 links von der Bildmitte sichtbare Privatsternwarte von Wilhelm Beer am Rande des Berliner Tiergartens. Am Ort dieser Sternwarte steht heute der Südflügel des Bundeskanzleramtes.

Die erste Karte der Mars-Oberfläche entstand in Berlin. Anfang des 19. Jahrhunderts besaß die bedeutende jüdische Familie Beer eine Villa am Rande des Tiergartens (Becker 1990), nicht weit vor dem Brandenburger Tor (Bild 1).



Bild 2. Wilhelm Beer, 1797 bis 1850, Kaufmann, Bankier, Politiker und Astronom, hat 1841 Rufe als Astronom nach Paris und Pulkovo abgelehnt

Der älteste Sohn Wilhelm Beer (Bild 2) wurde unter dem Einfluss seines Freundes Johann Heinrich Mädler (Bild 3) zu einem begeisterten Astronomen. Er ließ auf seiner Villa im Tiergarten ein privates Observatorium errichten, von dem aus die beiden ab 1828 über ein Jahrzehnt lang astronomische Beobachtungen betrieben. Es entstand eine Mondkarte in vier Blättern, die ab 1834 veröffentlicht wurde und großes Lob erfuhr. Im Mittelpunkt stand weiterhin der faszinierende Planet Mars, der etwa alle zwei Jahre in Opposition steht. Eine solche günstige Beobachtungsgelegenheit war im September 1830, und den beiden gelang es tatsächlich, beobachtbare Flecke

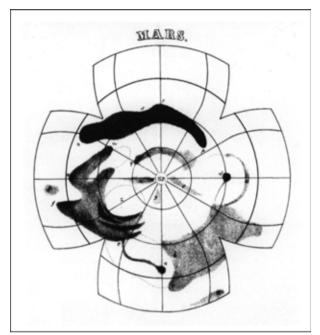


als "integrierende Teile der Marsoberfläche", also als feste topographische Strukturen

Bild 3. Johann Heinrich Mädler, 1794 bis 1874, Lehrer und Astronom, wurde 1840 Direktor der Sternwarte und Professor an der Universität in Dorpat (Estland)

zu verifizieren (Blunck 1997). Sie übertrugen ihre Beobachtungen auf eine Kugel von etwa 8 cm Durchmesser und zeigten diesen ersten jemals gefertigten Mars-Globus in einer Sitzung der *Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin* am 6. November 1830. Der Globus war auch mit einem Gradnetz versehen. Als Markierung für einen Bezugsmeridian hatten Beer und Mädler einen dunklen Fleck gewählt, den sie mit dem Buchstaben "a" kennzeichneten. Diese Festlegung gilt – mit Verfeinerungen, die inzwischen möglich und erforderlich geworden sind – bis heute. Eine aus den Beobachtungen vom September 1830 abgeleitete Karte der Südhalbkugel des Planeten bis zum nördlichen Wendekreis wurde dann erstmals 1831 veröffentlicht (Bild 4).

Mit Hilfe der Fixpunkte auf der Planetenoberfläche war es Beer und Mädler auch möglich, die Rotationsperiode des Planeten Mars zu bestimmen. Das erste Ergebnis von 1830 wich vom tatsächlichen Wert um nur 13 s ab.



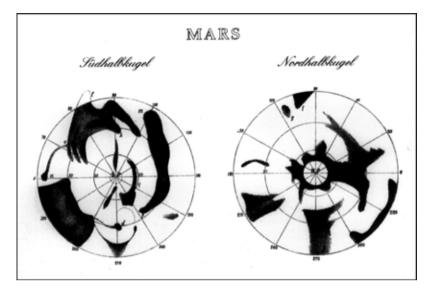
Bei den Beobachtungen während der späteren Oppositionsstellungen konnten die Messungen noch deutlich verbessert werden.

Bild 4. Erste Karte der Südhalbkugel des Mars nach Beobachtungen vom September 1830, erstmalige Kennzeichnung des Nullmeridians (Fleck a)

In den Folgejahren haben Beer und Mädler ihre Beobachtungen vor allem auf der Nordhalbkugel ergänzt und 1839 die erste Kartierung der gesamten Oberfläche erstellt (Bild 5).

2. "Kartographie" mit dem Fernrohr

Über viele Jahrzehnte hinweg war die Beobachtung und Kartierung der Mars-Oberfläche nur mit Fernrohren möglich. Viele Fachleute und Laien widmeten sich der Erforschung des Planeten und zeichneten immer wieder neue Karten seiner Oberfläche. Die Ergebnisse dieser Bemühungen sind äußerst vielfältig und machen deutlich, dass den Fernrohrbeobachtungen einfach Grenzen gesetzt sind. So wurde teils mehr der subjektive visuelle Eindruck durch den jeweiligen Beobachter und seine Interpretation festgehalten als objektive Information dargestellt.



Besonders wichtig – und auch populär – wurden die Beobachtungen von Giovanni Schiaparelli (1835–1910), dem Leiter der Mailänder Sternwarte. Er

Bild 5. Die erste Karte der gesamten Mars-Oberfläche, von Beer und Mädler erarbeitet nach den Beobachtungen 1830 bis 1839, veröffentlicht 1841

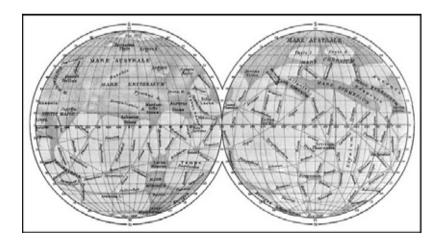


Bild 6. Eine Mars-Karte von Schiaparelli von 1888 mit vielen »canali«, in ihr sind die Beobachtungen 1877 bis 1888 zusammengefasst

hat nicht nur die jahreszeitlichen Veränderungen genau studiert, sondern auch linienhafte Erscheinungen erkannt, die er "canali" nannte, ohne sich auf deren wahre Natur festzulegen (Bild 6). Der Phantasie waren danach keine Grenzen gesetzt. Diese "Mars-Kanäle" haben Aufsehen erregt, die Öffentlichkeit enorm fasziniert und zu vielerlei Spekulationen Anlass gegeben. Ein astronomischer Laie, Percival Lowell (1855–1916), war sogar so euphorisch, dass er zur weiteren Erforschung der Kanäle ein eigenes Observatorium in Arizona errichtete.



Bild 7. Blatt der vierteiligen »Carte de Mars« im Maßstab 1:64 Millionen von Antoniadi nach Beobachtungen in Meudon von 1909 bis 1928, 1930 veröffentlicht

Das Ende der Mars-Kanäle wurde 1909 durch Eugène Michael Antoniadi (1870–1944) eingeläutet. Er fand durch eigene Beobachtungen, dass das geometrische Kanalnetzwerk eine optische Täuschung ist. Statt dessen zeigte ihm der große Refraktor von Meudon (bei Paris) Myriaden von marmorierten unregelmäßigen Feldern von Objekten.

Im Übrigen fertigte Antoniadi in jahrzehntelanger Arbeit eine Mars-Karte in drei Blättern in Mercator-Projektion und einem Blatt der Polregionen in stereographischer Projektion. Dieses von ihm selbst gezeichnete und 1930 zum Abschluss gebrachte Kartenwerk (Bild 7) gilt als die detailreichste Kartierung vor der Erforschung des Planeten durch Raumsonden.

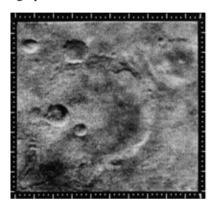
Bei aller Vielfalt der kartographischen Darstellungen der Mars-Oberfläche während der vielen Jahre der Fernrohrbeobachtungen verdienen einige Gemeinsamkeiten festgehalten zu werden. Gewisse Grundstrukturen in den Oberflächenmerkmalen, die offenbar auf Albedo-Unterschiede zurückzuführen sind, kehren immer wieder. Dazu gehört auch der von Beer und Mädler beobachtete Fleck, den sie mit »a« bezeichnet und zur Festlegung eines Nullmeridians gewählt haben. Dann hat sich nach der anfänglich völlig unkoordinierten Namensgebung eine gewisse Einheitlichkeit in der Bezeichnung von beobachteten Strukturen herausgebildet. Zu der Entstehung einer allgemein akzeptierten Nomenklatur hat Schiaparelli wesentlich beigetragen.

Es sei noch erwähnt, dass die meisten Karten mit dem Südpol oben gezeichnet wurden, was mit der Bildumkehr in den astronomischen Fernrohren zu erklären ist. Zu der heute üblichen Darstellung mit Norden nach oben ist man erst später übergegangen. Was die Benennung der Meridiane betrifft, so wurde sie sehr verschieden gehandhabt. Oft zählte man vom Nullmeridian nach Osten und nach Westen bis 180°, vielfach aber auch in einer Richtung durchgehend bis 360°.

3. Raumsonden zum Mars

Nach Jahrzehnten der weitgehenden Stagnation leitete der Beginn der Raumfahrt eine neue Ära der Mars-Kartographie ein. Von 1960 an haben sowohl die Sowjetunion als auch die USA versucht, Raumsonden zum Mars auf den Weg zu bringen, um bei Vorbeiflügen am Planeten Bilddaten aufzunehmen und zur Erde zu übertragen. Bei diesen Versuchen gab es viele Fehlschläge, aber im Laufe der Jahre konnten schrittweise auch große Erfolge erzielt werden.

Die ersten Bilder der Mars-Oberfläche konnten 1965 von Mariner 4 aufgenommen und empfangen werden (Bild 8). Es waren 21 Bilder mit einer Auflösung von 200 mal 200 Pixel. Sie zeigten erstmals eine Fülle von Kratern und anderen morphologischen Formen auf der Oberfläche des Planeten. Schließlich konnten mit Mariner 9 in den Jahren 1971/72 rund 7000 Bilder gewonnen werden, die das Grundmaterial für umfangreiche geodätisch-kartographische Arbeiten bildeten.



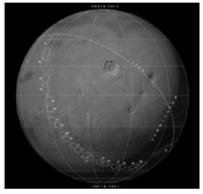


Bild 8. Mit Mariner 4 konnten 1965 die ersten Bilder der Mars-Oberfläche gewonnen werden. Links das Bild Nr. 11, rechts die Lage der 21 Bilder auf dem Planeten

Es mussten spezielle Verfahrensweisen entwickelt werden, um auf dem Mars ein geodätisches Punktnetz zu erstellen. Dies geschah bei der Rand Corporation unter der Leitung von Merton (Mert) E. Davies (1917–2001). In 762 Bildern wurden 11678 Punktmessungen durchgeführt und ausgewertet. Bis 1974 konnte damit ein Festpunktfeld mit 2061 Punkten abgeleitet werden (Bild 9).



Bild 9. Das 1974 aus Mariner 9-Bildern abgeleitete Punktfeld auf der Mars-Oberfläche

Voraussetzung für die Schaffung eines Punktnetzes war die Festlegung eines Nullmeridians. Er wurde durch den kleinen Krater Airy-0 (innerhalb des größeren Kraters Airy) definiert. Dies stellt eine Verfeinerung der schon 1830 mit dem unscharfen Fleck »a« getroffenen Festlegung eines Referenzmeridians durch Beer und Mädler dar. Der Name "Airy" erinnert an den Direktor der Sternwarte in Greenwich, George B. Airy (1801–1892), nach dessen Vorstellungen der Nullmeridian der Erde festgelegt worden ist.

Der nächste große Schritt in der Erkundung des Planeten waren die Missionen Viking 1 und 2 in den Jahren 1976 bis 1980. Beide Sonden haben den Planeten mehrere Jahre umkreist und dabei etwa 55 000 Bilder aufgenommen. Dabei konnte praktisch die ganze Mars-Oberfläche in Auflösungen von 150 bis 300 m aufgezeichnet werden. Die Auswertung des vielfältigen Bildmaterial in verschiedener Hinsicht ist eine enorme Aufgabe, die auch heute noch nicht als abgeschlossen gilt.

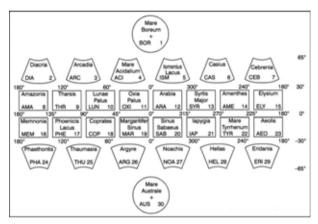
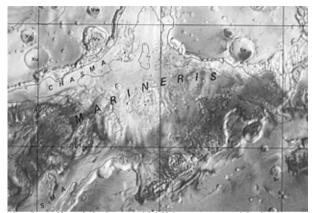


Bild 10. Übersicht über die Blätter des Mars-Kartenwerks im Maßstab 1:5 Millionen (Atlas of Mars 5 M) herausgegeben vom US Geological Survey

Das Punktnetz auf dem Planeten wurde verbessert und verdichtet. Bis 1990 wurden über 9000 Festpunkte geschaffen. In großem Rahmen wurden kartographische Produkte gewonnen, der Mittelpunkt dieser Aktivitäten liegt beim USGS in Flagstaff (Arizona). Wichtige Ergebnisse sind vor allem die Schummerungskarten (Shaded Relief Maps), die flächendeckend hergestellt wurden. Im Maßstab 1:15 Millionen sind es drei Blätter, in 1:5 Millionen wird der Planet in 30 Blättern abgedeckt (Bild 10 und 11). Für Teile der Mars-Oberfläche wurden auch Karten verschiedener Art in größeren Maßstäben erstellt.



Dabei wurden jeweils winkeltreue Abbildungen gewählt, in Aquatornähe die Mercator-Projektion, in mittleren Breiten Lamberts winkeltreue Kegelprojektion und in Polnähe die Stereographische Projektion.

Bild 11. Ausschnitt aus einer Schummerungskarte im Maßstab 1:5 Millionen (Teil von Valles Marineris)

Unter den zahlreichen weiteren Mars-Missionen der jüngeren Zeit ist eine von großer praktischer Bedeutung auch für die Kartographie. Der 1996 gestartete "Mars Global Surveyor" trug unter anderem das "Mars Orbiter Laser Altimeter" (MOLA). Mit diesem System konnten bis 2001 etwa 640 Millionen Höhenpunkte auf der Mars-Oberfläche gemessen werden. Durch Interpolation ließ sich ein globales Digitales Geländemodell erzeugen, welches hervorragend als Referenz für die weiteren photogrammetrischen und kartographischen Arbeiten geeignet ist (Bild 12).

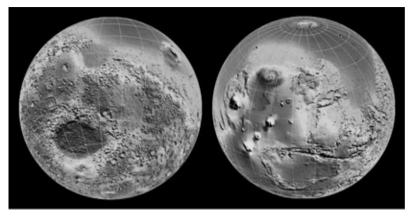


Bild 12. Höhenmodell des Planeten Mars nach Daten von MOLA (im Original farbig)

4. HRSC auf Mars Express

Die verschiedenartigen Sensorsysteme, die bislang zur Erkundung des Mars eingesetzt wurden, haben schon viele spektakuläre Ergebnisse erbracht. Aus der Sicht von Photogrammetrie und Kartographie fehlte ihnen aber ein wichtiges Merkmal, nämlich die Stereofähigkeit. Dieser Mangel sollte mit der "High Resolution Stereo Camera" (HRSC) behoben werden.

Der Einstieg in eine neue Ära der Mars-Kartographie wurde von der (ESA) mit der Raumsonde European Space Agency getan. Seit Januar 2004 umkreist diese den Roten Planeten. Unter den Experimenten an Bord nimmt die "High Resolution Stereo Camera" (HRSC), eine herausragende Stellung ein (Neukum et al. 2004). Das Kamerasystem ist als erstes unter Beachtung von photogrammetrischen und kartographischen Gesichtspunkten konzipiert worden. Die HRSC liefert dreidimensionale, multispektrale Bilddaten der Mars-Oberfläche, welche die Ableitung präziser Geländemodelle und die Erstellung eines großmaßstäbigen Kartenwerkes ermöglichen.

Die Leitung des gesamten Kamera-Projektes *HRSC on Mars Express* liegt bei Gerhard Neukum (Freie Universität Berlin) als *Principal Investigator*. Außer ihm sind über 40 Wissenschaftler verschiedener Disziplinen aus 10 Ländern als Co-Investigatoren mit einer Vielzahl von Mitarbeitern beteiligt.

4.1 Die "High Resolution Stereo Camera"

Die HRSC war ursprünglich als ein deutscher Beitrag zu der russischen Raumfahrtmission Mars '96 entwickelt worden. Nach dem Scheitern dieser Mission im November 1996 wurde die Kamera mit großem Erfolg in Flugzeugmissionen eingesetzt (Wewel et al. 1998). Die am 2. Juni 2003 gestartete Mission Mars Express trug ein technisch etwas verändertes Kamerasystem zum Mars und brachte es in eine Umlaufbahn, von der aus die HRSC seit Januar 2004 Bilddaten der Mars-Oberfläche aufnimmt.

Die HRSC ist eine zeilenweise arbeitende Kamera, die für multispektrale und stereosko-pische Aufnahme von Bilddaten konzipiert ist (*Stereo Colour Scanner*). In der Bildebene des Objektivs mit 175 mm Brennweite sind neun CCD-Zeilensensoren parallel zueinander jedoch quer zur Flugrichtung angeordnet. Die Datenaufnahme erfolgt nach dem Scanner-Prinzip, d.h. durch die Anordnung der Sensorzeilen wird während der Vorwärtsbewegung der Raumsonde ein Geländestreifen Zeile für Zeile aufgenommen. Jede Stelle der Mars-Oberfläche wird dabei unter neun verschiedenen Blickwinkeln erfasst (Bild 13). Für die stereophotogrammetrische Auswertung geeignete panchromatische Bilddaten werden unter den Neigungswinkeln +18,9°, +12,8°, 0°, -12,8° und -18,9° aufgezeichnet. Die vier weiteren Kanäle beobachten die Mars-Oberfläche unter anderen Neigungen in den Spektralbereichen Blau, Grün, Rot und Nahes Infrarot. Jede Bildzeile hat 5184 aktive Pixel.

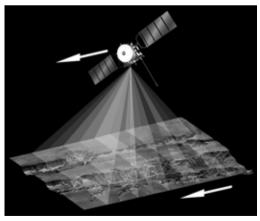


Bild 13. Schema der Datenaufnahme mit der HRSC in 9 Zeilen unter verschiedenen Neigungswinkeln

4.2 Datenaufnahme

Die Aufnahme eines Streifens der Marsoberfläche ist schematisch in Abbildung 13 dargestellt. Die Aufnahmemöglichkeiten werden durch die stark elliptische Bahn von Mars Express geprägt. Die Flughöhe über der Planetenoberfläche schwankt zwischen etwa 260 km im marsnächsten Punkt (Perizentrum) und etwa 11 000 km. Die höchste Bodenauflösung liegt um 10 bis 12 m und in einer Bildzeile wird dann ein fast 60 km breiter Geländestreifen aufgezeichnet. Bei zunehmendem Abstand vom Perizentrum nimmt die Bodenauflösung ab und die Streifenbreite wächst entsprechend an. Die Länge eines Bildstreifens hängt u.a. von der Datenspeicher- und Übertragungskapazität ab, beträgt jedoch mindestens 300 km. Die Möglichkeiten der Datengewinnung werden außerdem von den jahreszeitlich wechselnden Beleuchtungsverhältnissen und den atmosphärischen Bedingungen (z.B. Staubstürme) beeinflusst.

Während der Aufnahme müssen die Bilddaten der HRSC komprimiert und an Bord zwischengespeichert werden. Zur Reduktion der Datenmengen können verschiedene Aufnahmemodi gefahren werden. Häufig wird der nadirwärts gerichtete Kanal mit voller Auflösung aufgezeichnet, während die anderen Kanäle mit etwas niedrigerer Auflösung betrieben werden. Die Übertragung der gespeicherten Daten zu Bodenstationen erfolgt während der marsfernen Phasen der Umlaufbahn in Abstimmung mit den Erfordernissen der anderen wissenschaftlichen Experimente.

4.3 Verarbeitung der HRSC-Bilddaten

Zur photogrammetrischen Prozessierung der HRSC-Daten wurde ein komplexes Verarbeitungssystem aufgebaut (Scholten et al. 2005). In diesem System wirken das DLR, die Freie Universität Berlin (Neukum) sowie die Arbeitsgruppen der Co-Investigatoren zusammen. Die Abbildung 14 gibt einen schematischen Überblick. Daraus wird deutlich, dass die Verarbeitung stufenweise erfolgt und zu Ergebnissen verschiedener Art und unterschiedlicher Genauigkeit führt.

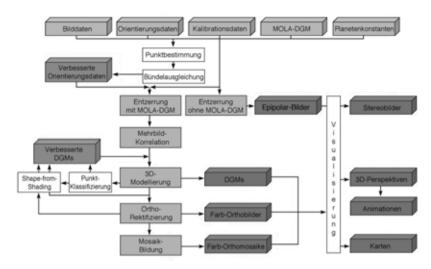


Bild 14. Schematische Übersicht über den Verfahrensablauf in der Prozessierung der HRSC-Daten vom Mars

Als geometrische Referenz dienen die von der *Internationalen Astronomischen Union* (IAU) zuletzt angenommenen Planetenkonstanten (Seidelmann et al. 2002), die für den Mars ein Rotationsellipsoid mit den Halbachsen 3396,19 km und 3376,20 km festlegen. Eine wichtige Grundlage ist außerdem das aus den Messungen des *Mars Orbiter Laser Altimeter* (MOLA) abgeleitete Oberflächenmodell des Planeten, welches als Initial-Topographie für die HRSC-Datenverarbeitung dient. Zur schrittweisen Verfeinerung der Ergebnisse werden u.a. Methoden der photogrammetrischen Bündeltriangulation sowie Shape-from-Shading-Verfahren eingesetzt. Die hochaufgelösten Bilddaten der HRSC mit fünf Stereokanälen ermöglichen die genaue Punktbestimmung durch Mehrfachkorrelation und damit die Gewinnung qualitativ hochwertiger Digitaler Geländemodelle (Gwinner et al. 2005). Damit werden anschließend farbige Orthobilder und Bildmosaike abgeleitet, die vielfältige wissenschaftliche Interpretationen sowie die Schaffung eines neuen topographischen Kartenwerks ermöglichen.

5. "Die Topographic Image Map Mars 1:200 000"

Das kartographische Hauptprodukt ist die "Topographic Image Map Mars 1:200 000", das erste großmaßstäbige topographische Kartenwerk des Pla-

neten (Lehmann et al. 2005). Wichtige Vorarbeiten dazu waren bereits während der Vorbereitung der gescheiterten Mission Mars '96 geleistet worden. Eine internationale Arbeitsgruppe hatte sich intensiv mit der Gestaltung eines neuen großmaßstäbigen Kartenwerks befasst, das auch die Grundlage für die künftige Mars-Forschung bilden sollte. Als Ergebnis wurde die "Topographic Image Map Mars 1:200 000" definiert (Lehmann et al. 1996). Das damals erarbeitete Grundkonzept für ein neues Mars-Kartenwerk ist nach wie vor gültig, es wurde aber aufgrund neuer Erkenntnisse – z.B. Definitionen der Referenzsysteme – aktualisiert. Im Folgenden werden die Grundlagen zur Gestaltung der topographischen und thematischen Karten erläutert.

5.1 Bezugssysteme

Die Lagekoordinaten auf dem Mars beziehen sich auf das durch die *Internationale Astronomische Union* (IAU) festgelegte Rotationsellipsoid. Entsprechend den internationalen Festlegungen bilden planetozentrische Breiten in Kombination mit östlich positiv gezählten Längen das laterale Referenzsystem auf der Mars-Oberfläche. Planetographische Breiten mit westlich positiv gezählten Längen können zusätzlich benutzt werden. Als Längenbezug dient der durch den Krater Airy-0 festgelegte Meridian. Für den Höhenbezug auf dem Mars ist eine Äquipotentialfläche des Schwerefeldes, das so genannte Areoid, definiert (Seidelmann et al. 2004).

5.2 Kartenprojektionen

Während bei den meisten der in kleineren Maßstäben erstellten Karten konforme Projektionen (Mercator, Lambertsche Kegelprojektion bzw. Stereographische Projektion) Anwendung fanden, wurden für die "Topographic Image Map Mars 1:200 000" flächentreue Abbildungen gewählt. Der größte Teil der Planetenoberfläche, der Bereich zwischen 85° nördlicher und 85° südlicher Breite, wird in der *Sinusoidalprojektion* kartiert. Die polnahen Gebiete werden in der *Flächentreuen Lambertschen Azimutalprojektion* wiedergegeben. Dabei wird jedes Kartenblatt auf einen eigenen, in der Blattmitte liegenden Meridian bezogen. Aufgrund dieser individuellen Projektionsparameter treten in dem großen Maßstab lediglich marginale Verzerrungen in einem Kartenblatt auf. Die Unterschiede zwischen den flächentreuen und den gewohnten konformen Kartenblättern sind daher gering. Dennoch bietet das Kartenwerk die beispielsweise für wissenschaftliche Interpretationen nützliche Eigenschaft der Flächentreue.

5.3 Blattschnitt

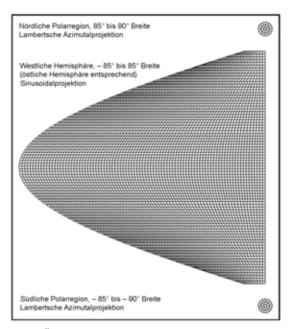


Bild 15. Schematische Übersicht über die Blatteinteiling der "Topographic Image Map Mars 1:200 000"

Jedes Kartenblatt deckt in der Breite 2° ab. Die Längenausdehnung in Grad nimmt zu den Polen hin zu, wird also schrittweise der Meridiankonvergenz angepasst. Deshalb wächst sie von 2° am Äquator bis 360° an den Polen. Durch diese Festlegungen werden alle Karten ungefähr gleich groß. Insgesamt wird die Mars-Oberfläche in 10 372 einzelne Kartenblätter eingeteilt (Bild 15).

Diese Definitionen sind so gewählt, dass das Blattschnittsystem auch die Basis für weitere Kartenprodukte bilden kann. Karten der Maßstäbe 1:100 000 und 1:50 000 lassen sich – ähnlich wie im System der amtlichen topographischen Kartenwerke in Deutschland – aus dem Maßstab 1:200 000 systematisch ableiten. Bei Bedarf können nach den gleichen Abbildungsgesetzen auch Kartenblätter ausgewählter Regionen oder anderer Maßstäbe erstellt werden. Dank dieser Flexibilität wird das neue Kartenwerk auch die Grundlage für die zukünftige Mars-Kartographie bilden.

5.4 Kartenrandangaben

Die einzelnen Blätter des Kartenwerkes werden oben mit einem Index versehen, zu dem der Kartentyp, die Blattbezeichnung bzw. Blattnummer sowie ein eindeutiger topographischer Name gehören.

In der Planetenkartographie folgt man allgemein den "Map Sheet Designation Codes" nach Greeley & Batson (1990). Eine solche Kennung für ein Kartenblatt der "Topographic Image Map Mars 1:200 000" besteht aus vier Elementen, die den Planeten, den Maßstab, das Blattzentrum und den Kartentyp beschreiben. Falls vorhanden, werden die Kartenblätter zusätzlich mit dem Namen einer abgebildeten Oberflächenform versehen.

In der Legende werden die grundlegenden Eigenschaften sowie Karteninhalte erläutert. Im Einzelnen betrifft dies die Parameter der Kartenprojektion, des Referenzellipsoids, des Areoids (Höhenbezug) sowie die Gradnetze als Repräsentation der beiden lateralen Referenzsysteme des Mars. Weiterhin werden Informationen zu den verwendeten Bilddaten und Geländemodellen gegeben. Eine Nebenkarte gibt die Lage des Kartenfeldes in Bezug zum Standardkartenwerk an.

6. Das Software-Paket PIMap: "Planetary Image Mapper"

Zur Herstellung des neuen Mars-Kartenwerks wurde an der Technischen Universität Berlin das kartographische Software-Paket "Planetary Image Mapper" (PIMap) entwickelt. Mit PIMap kann der Karteninhalt generiert und zum digitalen Kartenblatt zusammengestellt werden. Dieses enthält das Orthobildmosaik, Höhenlinien, Gitternetze, Randlinien, Kartentitel, Blattbezeichnung und typische Legendenelemente (Gehrke & Neukum 2005).

Die Herstellung der topographischen Bildkarten der Mars-Oberfläche erfolgt mit diesem Software-Paket weitgehend automatisch. Grundsätzlich können mit PIMap alle Arten von Gradabteilungskarten, wie sie in der Planetenkartographie nahezu ausschließlich gebräuchlich sind, generiert werden.

Sämtliche Eigenschaften, Form und Inhalte einer zu erstellenden Karte sind in der Steuerdatei zusammengefasst; je nach Karteninhalt müssen weitere Daten zur Verfügung stehen. An Hand dessen werden in PIMap die entsprechenden Elemente generiert und in das Kartenblatt eingepasst. Ergebnis ist eine PDF-Datei, welche sämtliche Vektor- und Rasterdaten dieses Blattes enthält. Von besonderer Bedeutung ist die nachträgliche Editierbarkeit der einzelnen Objekte, so dass die automatisch generierte Karte mit kommerzieller Software (z.B. Adobe Illustrator, Macromedia Freehand, Corel Draw)

kontrolliert bzw. weiter bearbeitet werden kann. Die Nachbearbeitung ist unter anderem für die endgültige Platzierung der topographischen Namen von Bedeutung, die in bestimmten Fällen noch der betreffenden Oberflächenform, z.B. einem Talverlauf, anzupassen sind.

Die wichtigsten Funktionen und der Datenfluss werden anschließend skizziert (Bild 16).





Bild 16. Datenfluss bei der Kartenherstellung mit PIMap. Links: Automatische Verarbeitung. Rechts: Interaktive Verbesserung

6.1 Funktionsumfang und Steuerung

Den Mittelpunkt der Software PIMap bildet die Steuerdatei, in der sämtliche für den Programmablauf benötigten Parameter anzugeben sowie Eigenschaften, Form und Inhalte des zu erstellenden Kartenblatts festzulegen sind. Abhängig vom gewünschten Karteninhalt müssen weitere Eingangsdateien zur Verfügung stehen. Insgesamt können zur Kartenerstellung die folgenden Daten verarbeitet werden:

- Steuerdatei (obligatorisch)
- Orthobildmosaik
- Digitales Geländemodell (DGM)
- · Topographisches Namensgut
- Landeplätze von Missionen
- Kartenwerks-Definitionen

Ausgehend von diesen Eingabedaten werden in PIMap die entsprechenden Inhalte generiert und in das Kartenblatt eingepasst. Ergebnis ist eine PDF-Datei, welche sämtliche Vektor- und Rasterdaten dieses Blattes enthält. PIMap

ermöglicht die kartographische Abbildung von ein- und zweiachsigen Bezugskörpern. Eingangskoordinaten können dabei planetozentrische oder planetographische ellipsoidische Breiten mit östlich oder westlich positiven Längen in beliebiger Kombination sein. Neben den üblichen Zylinder-, Kegel- und Azimutalprojektionen ist die Sinusoidalprojektion als Grundlage der "Topographic Image Map Mars 1:200 000" integriert.

6.2 Kartenfeld und Gitternetze

Mit PIMap lassen sich alle in der Planetenkartographie gebräuchlichen Gradabteilungskarten in beliebiger Lage und Größe erstellen (vgl. Greyley & Batson 1990). Durch die Festlegungen der Länge und Breite des Blattzentrums, der Blattausdehnungen und des Kartenmaßstabs wird das Kartenfeld eindeutig bestimmt. Sowohl die Kartenfeldrandlinie (Blattschnitt) als auch die dargestellten Gitternetze können auf beliebigen Kombinationen der ellipsoidischen Breiten- und Längensysteme basieren.

PIMap bietet die Möglichkeit, theoretisch beliebig viele Gitternetze mit ihren Darstellungseigenschaften zu definieren. Dies erlaubt die Integration verschiedener Koordinatensysteme in ein Kartenblatt.

Über mehrere geeignete Gitternetz-Definitionen lässt sich weiterhin ein und dasselbe Koordinatensystem differenziert repräsentieren – z.B. durch ein grobmaschiges Raster von Gitterlinien, ergänzt durch enger gestaffelte Gitterkreuze und/oder Randstriche; analog ist auch die Beschriftung selektiv steuerbar. Auf diese Weise wird vermieden, dass Netzlinien das Kartenfeld dominieren. Zugleich erleichtern aber Gitterkreuze die Orientierung und das Abgreifen von Koordinaten.

6.3 Einpassen der Bilddaten

Die Bildgrundlage einer Karte wird in PIMap aus einem Orthophotomosaik erstellt, wie es als Ergebnis der photogrammetrischen Prozessierung beim DLR (vgl. Scholten et al. 2005) vorliegt.

Bei der Einpassung der Bilddaten werden Projektion und Maßstab dem Kartenfeld angepasst. So lassen sich beliebige Datensätze, die in ihrer Lage und Auflösung den jeweiligen Ansprüchen genügen, ohne vorherige Transformationen direkt in das zu erstellende Kartenblatt integrieren. Das notwendige Resampling kann entweder nach nächster Nachbarschaft oder bilinear erfolgen.

6.4 Ableitung von Höhenlinien

Höhenlinien zur Repräsentation der Geländeoberfläche werden in PIMap aus einem gegebenen Digitalen Geländemodell (DGM) abgeleitet. Während die Lage der berechneten Höhenlinien automatisch den Projektionsparametern des Kartenblatts angepasst wird, ist das Höhenbezugssystem durch das DGM vorgegeben. Für die Ableitung der Höhenlinien werden im gegebenen quadratischen DGM-Raster Punkte identischer Höhen (im benutzerdefinierten Höhenlevel) berechnet. Dies erfolgt maschenweise im Uhrzeigersinn, so dass innerhalb der betreffenden Maschen Linienabschnitte als Punktepaare (Einund Austritt der Linie) vorliegen. An Hand der Topologie der Maschen werden aus diesen Punktepaaren schließlich zusammenhängende Höhenlinien gebildet.

Für die automatische Beschriftung wird die betreffende Höhenlinie in Abhängigkeit von der Schriftbreite unterbrochen und die Höhenlinienzahl in Linienrichtung platziert. Die Schrift lässt sich dabei wahlweise nach Lesbarkeit von unten/rechts oder in Anlehnung an deutsche Zeichenvorschriften mit dem Fuß talwärts ausrichten. Die dazu erforderliche Richtung des Gefälles (orthogonal zur Höhenlinie) wird bei der Punktepaarberechnung mit bestimmt. Damit können dann auch kurze, unbeschriftete Höhenlinien in Kesselformen identifiziert und zur eindeutigen Kennung mit einem Kesselpfeil versehen werden (Bild 17).

Bei der Gestaltung des Höhenlinienbildes bietet PIMap die Möglichkeit, verschiedene Äquidistanzen mit ihren Geltungsbereichen, Linien- und Schrifteigenschaften festzulegen, so dass Zähllinien, Haupt- und Hilfshöhenlinien unterschieden werden können. Durch die Beschränkung auf bestimmte Höhenschichten lassen sich z.B. steile Kraterwände und tiefer gelegene, vergleichsweise ebene Kraterböden mit entsprechend angepassten, unterschiedlichen Äquidistanzen darstellen, um so ein kartographisch ansprechendes Höhenlinienbild zu generieren.

Es versteht sich von selbst, dass die Qualität der in PIMap abgeleiteten Höhenlinien direkt vom gegebenen DGM abhängig ist. Eventuell auftretende Ungenauigkeiten müssen nachträglich korrigiert oder betroffene Linienabschnitte interaktiv überarbeitet werden.

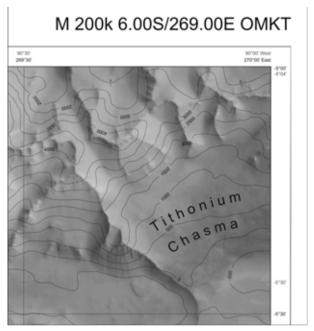


Bild 17. Verkleinerter Ausschnitt einer Karte 1:200 000 mit Höhenlinien, Höhenzahlen und Blattbezeichnung

6.5 Topographische Namen

Benannte planetare Oberflächenformen ('features') können mit PIMap automatisch beschriftet werden. Einen umfassenden Datensatz der topographischen Namen auf allen Himmelskörpern stellt der USGS innerhalb des "Gazetteer of Planetary Nomenclature" bereit; hier sind für jedes Feature neben seinem Namen das Zentrum sowie die Ausdehnung in Länge und Breite, die Größe (Durchmesser) und der jeweilige Featuretyp gegeben. An Hand dieser Daten wird ermittelt, ob ein Feature in dem zu erstellenden Kartenblatt liegt (bzw. teilweise in dasselbe hineinreicht) und gegebenenfalls die Beschriftung platziert. Dabei erlaubt PIMap individuelle Schriftdefinitionen in Abhängigkeit von Featuretyp und -größe. Oberflächenformen unterhalb bestimmter Mindestgrößen (z.B. in globalen Karten) oder einzelne Typen (üblicherweise Albedo-Features) können auch unbeschriftet bleiben.

Weiterhin sollten Beschriftungen keine relevanten Bildinhalte verdecken und beispielsweise Talverläufen folgen. Beides kann allein aus den gegebenen Daten nicht realisiert werden und bedarf einer interaktiven Nachbearbeitung, insbesondere auch unter Berücksichtigung der zu Grunde liegenden Bilddaten. Dabei können Beschriftungen dem jeweiligen Objektverlauf angepasst werden.

6.6 Kartentitel und Blattbezeichnung

Kartengattung (Titel des Kartenwerks), Blattname und -bezeichnung werden in PIMap nach den Benutzervorgaben platziert. Die Bezeichnung planetarer Kartenblätter besteht aus den "Sheet Designator Terms" nach Greyley & Batson (1990), d.h. Kodierungen des Himmelskörpers, des Kartenmaßstabs, der Breite und Länge des Blattzentrums sowie des Kartentyps; diese werden automatisch generiert und zusammengestellt. Topographische (T) Karten auf der Basis eines farbigen (K) Orthophotomosaiks (OM), wie sie mit PIMap generiert werden können, haben beispielsweise die Typenkodierung OMKT (Bild 17).

6.7 Gestaltung des Kartenrandes

Innerhalb des Kartenrandes können mit PIMap verschiedene Legenden-Blöcke generiert werden, die Informationen über die Projektionsparameter und dargestellten Koordinatensysteme, den Kartenmaßstab sowie über die Eigenschaften der zu Grunde liegenden Bild- und DGM-Daten geben.

Außerdem kann automatisch eine Blattübersicht erstellt werden, welche die Hauptkarte im Kontext ihrer Nachbarblätter zeigt. Zusätzlich – z.B. für die globale Einordnung großmaßstäbiger Karten – ist die Lageangabe bezüglich eines übergeordneten Kartenwerks zweckmäßig; sie wird aus dieser entsprechenden Kartenwerksdefinition abgeleitet.

7. Fazit und Ausblick

Mit dem System PIMap liegt ein kartographisches Softwarepaket vor, das sämtliche Inhalte einer planetaren topographischen Bildkarte erstmals gemeinsam automatisch generiert und/oder in das Blatt einpasst. Das Ergebnis ist eine digitale Karte, die – mit wenigen interaktiven Abschlussarbeiten – ein qualitativ hochwertiges Produkt darstellt. Der Einsatz zur Kartenherstellung innerhalb der Mission *Mars Express* unterstreicht die Leistungsfähigkeit von PIMap.

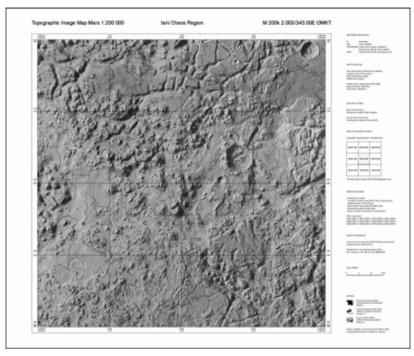


Bild 18. Stark verkleinertes Beispiel für ein Standardblatt des Kartenwerks "Topographic Image Map Mars 1:200 000", das Blatt "M 200k 2.00S/343.00E OMKT, Iani Chaos Region" (im Original farbig).

Schon während der Entwicklungszeit von PIMap sind an der Technischen Universität Berlin in Zusammenarbeit mit dem Institut für Planetenforschung des DLR Berlin-Adlershof eine Reihe von Karten hergestellt worden. Dies betrifft verschiedene Regionen des Planeten Mars sowie verschiedene Blattschnitte und verschiedene Maßstäbe (bis 1:50 000). Die Abbildung 18 zeigt als Beispiel ein Standardblatt der "Topographic Image Map Mars 1:200 000" in Äquatornähe (also in Sinusoidalprojektion).

Das neue Kartenwerk ist auch hervorragend als topographische Basis für thematische Kartierungen geeignet, wie sie zur Darstellung der Ergebnisse der Mars-Forschung gebraucht werden. Die Flexibilität von PIMap ermöglicht die individuelle Herstellung von Sonderkarten interessanter Zielgebiete. Dabei müssen die thematischen Informationen – bestehend aus linearen Vektordaten (Grenz-, Form-, Struktur- oder Isolinien), flächenbasierten Raster-

oder Vektordaten (z.B. geologische Formationen) und Signaturen – harmonisch in die topographische Basis integriert werden. Die Kombination derartig heterogener Inhalte stellt eine Herausforderung an die Kartengestaltung dar. Die Integration thematischer Daten in eine Basiskarte ist nur zu einem geringen Teil automatisierbar. Die thematische Kartierung ist ein individueller Prozess, der von dem jeweiligen Bearbeitungsgebiet und insbesondere von der Art der darzustellenden Thematik abhängig ist. Dies erfordert auch eine intensive Zusammenarbeit zwischen den die thematischen Informationen vorgebenden Fachleuten und der Kartographie.

Die erarbeiteten Beispiele veranschaulichen einerseits die Leistungsfähigkeit der HRSC und der Datenverarbeitung beim DLR, machen andererseits aber auch die Flexibilität der kartographischen Software PIMap deutlich. In diesem Zusammenhang darf nicht unerwähnt bleiben, dass sich das System PIMap, das prinzipiell für alle Planeten und Monde eingesetzt werden kann, auch bereits bei der Herstellung einzelner Karten von Saturn-Monden und anderen Himmelskörpern bewährt hat.

8. Literatur

- Albertz, J., Gehrke, S., Wählisch, M. et al.: *Digital Cartography with HRSC on Mars Express*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXV, Part B4, Istanbul 2004, 869-874.
- Albertz, J., Gehrke, S., Lehmann, H. et al.: Precise Topographic and Thematic Maps of Planet Mars. Proceedings XXII International Cartographic Conference (ICC), La Coruña 2005.
- Albertz, J. et al.: HRSC *Die 'High Resolution Stereo Camera' auf Mars Express*. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, 2005, Heft 5, S. 361-364..
- Becker, Heinz: *Die Beer'sche Villa im Tiergarten Porträt eines Berliner Wohnhauses*. In: Berlin in Geschichte und Gegenwart. Jahrbuch des Landesarchivs Berlin 1990. Berlin 1990, S. 61-86.
- Blunck, Jürgen; Lothar Zögner: *Der Rote Planet im Kartenbild*. Staatsbibliothek zu Berlin. Ausstellungskataloge, Neue Folge 7, 1991, 132 S.
- Blunck, Jürgen: Wilhelm Beer Genius der Astronomie und Ökonomie 1797-1850. Staatsbibliothek zu Berlin. Ausstellungskataloge, Neue Folge 20, 1997, 156 S.
- Gehrke, S.; Neukum, G.: *Das kartographische Softwarepaket "Planetary Image Mapper" (PIMap)*. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation (PFG), 2005, Heft 5, S. 417-422.
- Greeley, Ronald; Batson, Raymond M.: *Planetary Mapping*. Cambridge University Press, Cambridge 1990, 296 S.

- Gwinner, K., Scholten, F., Giese, B. et al.: *Hochauflösende Digitale Geländemodelle auf der Grundlage von Mars Express HRSC-Daten.* Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, 2005, Heft 5, S. 387-394.
- Lehmann, Hartmut, et. al.: *Groβmaßstäbige topographische und thematische Mars-Karten*. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation. 2005. Heft 5. S. 423-428.
- Lehmann Hartmut, et al.: Mapping a Whole Planet The New Topographic Image Map Series 1:200,000 for Planet Mars. International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Vienna, 1996, Part 4.
- Neukum, Gerhard, et al.: *The High Resolution Stereo Camera of Mars Express*. ESA Special Publication SP-1240, 2004.
- Scholten, F., et. al.: Von Rohdaten aus dem Mars Express Orbit zu Digitalen Geländemodellen und Orthobildern – Operationelle Verarbeitung von HRSC-Daten. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, 2005, Heft 5, S. 365-372.
- Seidelmann, P. K. et al.: Report of the IAU/IAG Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements of the Planets and Satellites, 2000. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 82 (2002) 83-110.
- Seidelmann, P. K. et al.: Report of the IAU/IAG Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements. 2003. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2004.
- Wewel, F.; Scholten, F. et al.: Digitale Luftbildaufnahme mit der HRSC Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, 1998, Heft 5, S. 317-332.
- United States Geological Survey (USGS): Gazetteer of Planetary Nomenclature. planetarynames.wr.usgs.gov (Juni 2006)
- United States Geological Survey (USGS): PDS MAP-A-PLANET. pdsmaps.wr.usgs.gov. (Juni 2006)

Danksagung

Das Softwarepaket PIMap wurde im Rahmen des Projekts *High Resolution Stereo Camera (HRSC) on Mars Express Orbiter* entwickelt. Das Vorhaben wurde durch das *Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt* aus Mitteln des *Bundesministeriums für Bildung und Forschung* gefördert.

Die Autoren danken dem HRSC-Team, inbesondere den Mitarbeitern des Instituts für Planetenforschung des DLR, für die langjährige konstruktive Zusammenarbeit.

Ruth Titz-Weider, Heike Rauer et. al.

Auf der Suche nach Planeten um andere Sonnen

Einleitung

Schon seit dem Altertum haben Menschen ihre Vorstellungen zu anderen möglichen Welten, auf denen es Leben gibt, entwickelt. Methoden zur Entdeckung von Planeten um andere Sterne schlug Otto von Struve in den 50er Jahren des vergangenen Jahrhunderts vor (O. Struve 1952).

Im Jahr 1995 wurde schließlich der erste Planet um einen sonnenähnlichen Stern entdeckt: 51 Pegasi b (M. Mayor, D. Queloz 1995). Das war eine Sensation, wenn man auch aus statistischen Erwägungen und aus der Kenntnis der Entwicklung unseres Sonnensystems und der Galaxie andere Planetensysteme erwartet hatte. Neben dem Nachweis der Existenz des ersten extrasolaren Planetensystems sind seine Bahnparameter und seine Masse erstaunlich. Der Planet kreist in rund 4 Tagen in einem Abstand von 0.052 AE¹¹ einmal um seinen Zentralstern. In unserem Sonnensystem läge diese Bahn innerhalb der Merkurbahn. Die Masse dieses ersten extrasolaren Planeten entspricht wenigstens der Hälfte der Jupitermasse.

So wirft bereits die Entdeckung dieses ersten Planeten grundsätzliche Fragen auf: Wo entstehen Planeten? Wie sieht ein typisches Planetensystem aus? Ist unser Sonnensystem ein Sonderfall?

Wieviele extrasolare Planeten gibt es?

Bis heute, Oktober 2007, kennt man mehr als 260 extrasolare Planeten. ²² Die Mehrzahl von ihnen sind jupitergroße Planeten, die sehr dicht um ihren Zentralstern kreisen. Das ist eine Anordnung, die wir in unserem Sonnensystem

¹ Eine astronomische Einheit (AE) ist die mittlere Entfernung zwischen Erde und Sonne und entspricht 149,6 Millionen km.

² Den aktuellen Stand und Angaben zu Masse und Bahnparamter der entdeckten extrasolaren Planeten findet man online in der "Enzyklopädie der extrasolaren Planeten" von Jean-Marie Schneider: exoplanet.eu

nicht kennen. Hier befinden sich die Gasriesen im Abstand von 5,2 AE (Jupiter) und 9,5 AE (Saturn) und haben sich nach bisher vorherrschender Theorie über die Entstehung unseres Sonnensystems in diesem Abstand gebildet. Die Bahnparameter dieser extrasolaren Planeten decken einen großen Bereich ab. Die große Halbachse der entdeckten Planeten liegt zwischen 0.02 AE und 270 AE. Es gibt fast kreisförmige Bahnen wie in unserem Sonnensystem, aber auch sehr stark elliptische, auf denen der Planet einer ständig sich verändernden Einstrahlung seines Zentralsterns unterworfen ist.

Die jupitergroßen Planeten mit kleinem Bahnradius werden von ihrem Zentralstern stark erhitzt, entsprechend bezeichnet man sie als "heiße Jupiter". In Analogie dazu gibt es auch die "heißen Neptune". Die Darstellung der Planetenmasse gegen die große Halbachse zeigt den Schwerpunkt der bisher entdeckten Planeten bei schweren Objekten im nahen Abstand zum Zentralstern. Ziel zukünftiger Forschung ist es, die "freien" Bereiche zu füllen, vor allen Dingen terrestrische Planeten zu finden.

Wie findet man extrasolare Planeten?

Die Methode, mit der bisher die meisten Exoplaneten entdeckt wurden, ist die Radialgeschwindigkeitsmethode. Bei dieser Methode untersucht man die Spektrallinien eines Sternes nach periodischen Veränderungen in der Wellenlänge (Dopplereffekt). Der Dopplereffekt kann durch einen Planeten verursacht werden, der den Stern umkreist und ihn zu einer Bewegung um den gemeinsamen Schwerpunkt zwingt. Mit dieser Methode kann man nur eine untere Grenze der Planetenmasse angeben.

Die Transitmethode ist eine photometrische Meßmethode: Die Anwesenheit eines Planeten führt zu regelmäßigen Verdunkelungen, wenn der Planet zwischen Stern und Beobachter vorbeizieht. Diese Abnahme der Sternintensität beträgt ein Prozent für das System Sonne und Jupiter. Mit der Transitmethode kann man kleinere Planeten als mit der Radialgeschwindigkeitsmethode entdecken, man ist allerdings auf die richtige geometrische Konstellation von Stern, Planet und Beobachter angewiesen. Beide Methoden zusammen ermöglichen die Bestimmung der Planetenmasse.

Andere Methode zur Suche nach extrasolaren Planeten sind die astrometrische Methode – man mißt die Bewegung des Sterns am Himmel –, die Gravitationslinsenmethode und schließlich die direkte Abbildung bei weit entfernten, jungen Planeten.

BEST

Systematische Langzeitbeobachtungen zum Aufspüren neuer Planeten sind bisher nur vom Boden aus durchgeführt worden. Eines der weltweit laufenden Suchprogramme ist BEST (Berliner Exoplaneten Suchteleskop, H. Rauer et al 2004) mit Teleskopen in Südfrankreich und Chile. Leider hat BEST noch keinen extrasolaren Planeten gefunden. Allerdings lag der Schwerpunkt der Beobachtungen mit BEST in den letzten Jahren in der Unterstützung der Satellitenmission COROT. Es wurde nach variablen Sternen in den Zielfeldern gesucht, bevor diese von COROT vermessen werden. Auf diese Weise konnten viele neue variable Sterne entdeckt und die Zielfelder damit charakterisiert werden.

COROT

Das erste Teleskop, das vom Satelliten aus nach extrasolaren Planeten sucht, ist COROT (The CoRoT Mission 2006). Das Akronym steht für Convection, Rotation and Planetary Transits. Seit Beginn letzten Jahres mißt COROT in seinem polaren Orbit Sternenfelder mit rund 12000 Sternen. Mit COROT sind zum ersten Mal kontinuierliche Meßperioden von 150 Tagen möglich, um Planeten mit der Transitmethode nachzuweisen. An diesem von der französischen Raumfahrtagentur CNES geführten Satellitenprojekt sind neben Frankreich, Belgien, Brasilien, Italien, Österreich, Spanien und der ESA auch Deutschland beteiligt. Der deutsche Beitrag besteht in der Entwicklung eines Programmpakets, das an Bord des Satelliten für die präzise Ausrichtung des Teleskops, die Reduzierung der Meß- und Betriebsdaten und deren Versand zur Bodenstation sorgt. Diese Software wurde am Standort Adlershof des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt entwickelt. Die Instrumente erfüllen die in sie gesetzten Erwartungen und die erste Beobachtungsperiode von 150 Tagen wurde im Oktober erfolgreich beendet. Die Empfindlichkeit und zeitlichen Randbedingungen von COROT erlauben die Entdeckung von terrestrischen Planeten mit dem zwei- bis vierfachen Erdradius mit Umlaufzeiten von rund 50 Tagen (Super-Erden) und werden mit Spannung erwartet. Im Mai 2007 hat COROT seinen ersten Planeten entdeckt. Es umkreist in 1,5 Tagen seinen Zentralstern und seine Masse liegt zwischen 1,5 bis 1,8 Jupitermassen.

Könnte auf diesen Planeten Leben, wie wir es kennen, existieren?

Leben in der Form, die wir kennen, braucht eine Energiequelle, Kohlenstoffchemie und flüssiges Wasser. Ob sich solches Leben auf anderen Planeten entwickeln kann oder konnte, können wir bis heute nicht sagen. Ein Blick auf unser eigenes Sonnensystem zeigt, dass es nur kleine Parameterbereiche sind, die die Entwicklung zulassen (habitable Zone): Venus ist zu heiß und hat einen viel zu hohen Oberflächendruck. Mars dagegen ist zu kalt und hat eine zu dünne Atmosphäre. Bei neu entdeckten terrestrischen Planeten muß man Fragen nach der Habitabilität sorgfältig untersuchen: Um welchen Typ Stern kreist der Planet? Hat dieser Planet eine Atmosphäre? Welche Entwicklungszeit des Sterns liegt vor? Eine der wichtigsten Fragen ist die nach der Existenz, der Zusammensetzung und der Entwicklung einer Atmosphäre, die ganz wesentlich die Temperatur und den Druck bestimmt und damit z.B. die Existenz von flüssigem Wasser ermöglicht. Spektralmessungen der Atmosphären geben Hinweise auf biogene Moleküle. Der Nachweis von Ozon läßt z.B. auf die Existenz von molekularem Sauerstoff schließen, der notwendig ist für die Form des Lebens, die wir es kennen.

Wie können wir mehr über diese Planeten herausfinden?

Zukünftige Projekte sind auf die Suche nach extrasolaren terrestrischen Planeten gerichtet (KEPLER-Mission der Nasa)³³ und auf die Untersuchung der Atmosphären dieser noch zu entdeckenden Planeten (DARWIN, ein Vorschlag im Cosmic Vision Programm der ESA⁴⁴).

Literatur

O. Struve, The Observatory, 1952, 72, 199.

M. Mayor, D. Queloz, Nature 1995, 378, 355

 H. Rauer et al, The Berlin Exoplanet Search Telescope System, ASP, 2004, 116, 38-45
 The CoRoT Mission, Pre-Launch Status, Stellar Seismology and Planet Finding, ESA-SP-1306, 2006

³ kepler.nasa.gov

⁴ www.esa.int/science/darwin

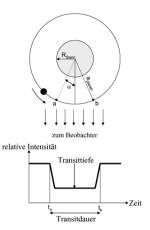
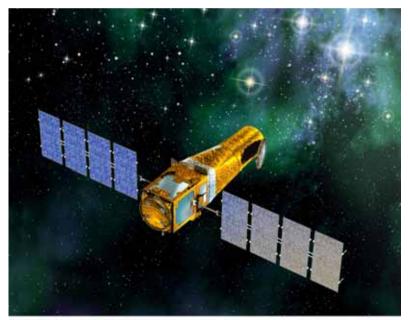


Bild 1. Darstellung der Transitmethode Quelle: R. Titz-Weider, Physik in unserer Zeit, 6/2006 (37)



© CNES - Octobre 2005/flus. D. Ducros

Bild 2. Künstlerische Darstellung des CoRoT-Satelliten Quelle: CNES Oct 2005/illus. D. Ducros

Heinz Kautzleben

Das Koordinierungskomitee Interkosmos (1967–1990)
– Claus Grote, Mitglied der Leibniz-Sozietät, zu seinem 80.
Geburtstag –
Beteiligung der DDR an der Erforschung und Nutzung des Weltraumes für friedliche Zwecke¹

Einleitung

Das Kolloquium der Leibniz-Sozietät am 29.09.2007 ist ihre akademietypische Wortmeldung zum diesjährigen großen Jubiläum der Weltraumforschung wie auch zur Weltraumwoche in diesem Jahr.

Die wissenschaftliche Welt würdigt den 4. Oktober 1957 als den Tag, an dem die Weltraumforschung begann. An diesem Tage gelang es der Menschheit erstmals, und zwar im Rahmen des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957/58, mit "Sputnik 1" – gestartet durch die Raketentruppen der UdSSR – einen frei fliegenden Flugkörper auf eine geschlossene Umlaufbahn um die Erde zu bringen und die von diesem ausgesendeten Funksignale in allen Teilen der Erdoberfläche zu empfangen. "Weltraumforschung" (engl.: Space Research, russ.: Kosmitscheskije Issledovanije) steht seitdem als Sammelbezeichnung für alle Forschungen, bei denen Flugkörper auf Umlaufbahnen um die Erde oder auf Bahnen vom Planeten Erde weg in den Weltraum als Sonden, Träger von Messgeräten oder als Forschungslaboratorien genutzt werden.

Die USA folgten der Sowjetunion am 1. Februar 1958 mit dem Start ihres ersten Flugkörpers in den Weltraum, des Forschungssatelliten "Explorer 1", durch die Raketentruppen der US Army. Der damit einsetzende Wettlauf der beiden Großmächte in den Weltraum rief sofort die Vereinten Nationen zu in-

¹ Für den Druck in den "Sitzungsberichten der Leibniz-Sozietät" angefertigte Fassung der Präsentation, die am 29.09.2007 im Kolloquium "50 Jahre Weltraumforschung. Erforschung und Überwachung der Erde und des Weltraumes gestützt auf die Mittel der Raumfahrt" dargeboten wurde.

150 Heinz Kautzleben

tensiven diplomatischen Verhandlungen auf den Plan: Alle Nationen waren sich schnell darin einig, dass der Wettlauf in geordneten, friedlichen Bahnen erfolgen müsse. Die internationale Staatengemeinschaft forderte, dass der Weltraum frei von nationalen Rivalitäten gehalten werden muss und von allen Nationen, die es vermögen, zur Erforschung und Nutzung für friedliche Zwecke genutzt werden kann. Das wichtigste Ergebnis war der völkerrechtlich verbindliche Vertrag "Treaty on Principles Governing the Activities in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and other Celestial Bodies". Als Vertragssubjekte wurden ausschließlich die souveränen Staaten anerkannt. Der Weltraumvertrag trat am 10. Oktober 1967 in Kraft. Die überragende Bedeutung der Ereignisse am 04.10.1957 und am 10.10.1967 war und ist für die UNO Anlass, in jedem Jahr die Woche zwischen den beiden Jubiläen als "World Space Week" zu würdigen.

Im Kolloquium können und wollen wir nicht daran vorbeigehen, dass sich im Jahr 2007 auch zum 40. Mal der Beschluss des Ministerrates der DDR vom 17.08.1967 über die Beteiligung der DDR an der Erforschung und Nutzung des Kosmos zu friedlichen Zwecken im Rahmen der Zusammenarbeit der sozialistischen Länder jährt. Es war selbstverständlich, dass in der DDR für "Weltraum" die in der Sowjetunion übliche Bezeichnung "Kosmos" verwendet wurde. Dieser Beschluss markiert den Beginn der Zusammenarbeit im Programm, das allein auf die Mittel der sowjetischen Raumfahrt gestützt war, mit dem aus dem sowjetischen Sprachgebrauch übernommenen, sofort verständlichen Kunstwort "Interkosmos" als Kurzbezeichnung.

Durch diesen Beschluss wurden sowohl die inhaltliche Konzeption für die Beteiligung der DDR mit den zu verfolgenden Hauptrichtungen bestätigt wie auch die grundsätzlichen organisatorischen Festlegungen getroffen. Zu diesen Festlegungen gehörte in erster Linie, dass als nationales Koordinierungsorgan der DDR ein Komitee (mit Sitz in der Hauptstadt Berlin) zu bilden sei. Es erhielt die Kurzbezeichnung "Koordinierungskomitee Interkoskosmos". Das Komitee koordinierte im Auftrage der Regierung alle wissenschaftlichen Aktivitäten der DDR zur Erforschung und Nutzung des Weltraumes für friedliche Zwecke. Ihm gehörten Vertreter aller an diesen Arbeiten interessierten Ministerien und zentralen Organe an; sie standen im Range von stellvertretenden Ministern. Den Vorsitzenden des Komitees stellte das zentrale Organ gestellt, dem von der Regierung die Hauptverantwortung für die Kosmos-Aktivitäten übertragen worden war. Das waren in den Jahren von 1967 bis 1974 das Ministerium für Wissenschaft und Technik, ab 1974 bis zum Ende der DDR die Akademie der Wissenschaften der DDR. Das Komitee

fungierte als bevollmächtigte Vertretung der DDR bezüglich der Beteiligung am Programm Interkosmos, fungierte aber vielfach auch als Gremium zur Vorbereitung der Beteiligung an weiteren Programmen und Abkommen zur Erforschung und Nutzung des Weltraumes. Dem Koordinierungskomitee wurde ein Wissenschaftlicher Beirat (Kurzbezeichnung: Beirat Interkosmos) zugeordnet, dem die führenden Wissenschaftler aus allen beteiligten Institutionen der DDR angehörten. Der Vorsitzende des Beirates wurde von Anfang an von der Akademie der Wissenschaften gestellt; er war in dieser Funktion zugleich auch der erste Stellvertreter des Vorsitzenden des Koordinierungskomitees.²

Zeitgleich mit der Übernahme der Hauptverantwortung für die Kosmos-Aktivitäten der DDR durch die Akademie der Wissenschaften der DDR wurde zum Vorsitzenden des Koordinierungskomitees Interkosmos Claus Grote berufen. Er hat diese höchstverantwortliche wissenschaftsleitende und wissenschaftspolitische Aufgabe bis zum Ende der DDR erfüllt. Die Berufung war eng damit verbunden, dass er im Juni 1972 zum Generalsekretär der Akademie gewählt worden war und diese Funktion bis zum Juni 1990 innehatte.

Claus Grote wurde 1972 zum Korrespondierenden, 1974 zum Ordentlichen Mitglied der Akademie gewählt. Er gehört zu den aktiven Mitgliedern der Akademie, die 1992/1993 durch die Gründung des privatrechtlichen Vereins Leibniz-Sozietät dafür gesorgt haben, dass unsere 1700 auf Initiative von Leibniz 1700 gegründete Gelehrtengesellschaft mit Sitz in Berlin die Wirren der "Wende" überstand, weiterhin besteht und aktiv ist. Er hat am 8. August 2007 sein 80. Lebensjahr vollendet. Das Kolloquium zur Weltraumforschung am 29.09.2007 ist der Leibniz-Sozietät willkommener Anlass, das Wirken ihres langjährigen verdienstvollen Mitgliedes, insbesondere für die Beteiligung an der Erforschung und Nutzung des Weltraumes für friedliche Zwecke, zu würdigen.

Die Präsentation im Kolloquium beruht hauptsächlich auf den Erinnerungen und Erfahrungen des Autors aus seiner Teilnahme an der geophysikali-

Als Vorsitzender des Beirates fungierten von 1957 bis 1974 Ernst August Lauter (Ordentliches Mitglied der Akademie seit 1964), von 1974 bis 1988 Heinz Stiller (Korrespondierendes Mitglied der Akademie seit 1971, Ordentliches Mitglied ab 1974) und von 1988 bis 1990 Heinz Kautzleben (Korrespondierendes Mitglied seit 1979, Ordentliches Mitglied ab 1987).

152 Heinz Kautzleben

schen und der Weltraumforschung seit 1957.³ Die Aussagen wurden soweit möglich an Archivmaterialien und Publikationen geprüft.⁴ Die Präsentation bietet eine kurze Übersicht über die vielfältigen, umfangreichen Weltraumaktivitäten der DDR; angesprochen werden einige Aspekte, die auch aus heutiger Sicht noch hervorzuheben sind.

Die Beteiligung der DDR – vier Phasen

Die DDR hat sich zu keiner Zeit an der Nutzung der Raumfahrt, von Raketen, Satelliten und Raumsonden, für nicht-zivile Zwecke, insbesondere für militärische Zwecke, beteiligt. Ihre Beteiligung an der Nutzung der Raumfahrt für die Erforschung und Nutzung des Weltraumes zu friedlichen Zwecken kann man in vier Phasen einteilen:

Phase A: von 1957 bis 1967

Sie begann damit, dass einzelne Einrichtungen und Bürger der DDR auf Einladung des Astronomischen Rates der Akademie der Wissenschaften der UdSSR und zumeist mit einfachen astronomischen Kameras, die vom Rat geliefert wurden, sich an den astronomischen Beobachtungen zur Bahnverfolgung der ersten sowjetischen Satelliten beteiligten. Ebenfalls wurde sofort damit begonnen, die frei empfangbaren Funksignale der sowjetischen und bald auch der US-amerikanischen Satelliten zu empfangen und wissenschaftlich zu analysieren. In dieser Phase wuchsen in zahlreichen Institutionen der DDR kontinuierlich das Interesse und das Bedürfnis, sich mit eigenen Expe-

4 Ein umfangreiche Darstellung und den Einstieg in eine Fülle von Archivunterlagen findet man in der Dissertation von Katharina Hein-Weingarten: Das Institut für Kosmosforschung der Akademie der Wissenschaften der DDR. Ein Beitrag zur Erforschung der Wissenschaftspolitik der DDR am Beispiel der Weltraumforschung von 1957 bis 1991. Berlin, Duncker und Humblot, 2000.

Der Autor war von Februar 1957 bis Juni 1991 forschend und wissenschaftsleitend in Forschungsinstituten der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin bzw. AdW der DDR tätig. Er begann im Geomagnetischen Institut mit Arbeiten zum geomagnetischen Außenfeld und zur Vermessung des permanenten Feldes. Ab 1968 förderte er im Geodätischen Institut und weiter im 1969 neu gebildeten Zentralinstitut für Physik der Erde der AdW (ZIPE), in dem das Geodätische Institut aufgegangen war, die Entwicklung der Satellitengeodäsie. Als Direktor des ZIPE ab 1973 war er weiterhin verantwortlich für den Aufund Ausbau der Fernerkundung der DDR mit aerokosmischen Mitteln im Rahmen der Zusammenarbeit der sozialistischen Länder. 1984 wurde er zusätzlich zum Leiter des Forschungsbereiches Geo- und Kosmoswissenschaften der Akademie berufen. Unter Beibehaltung dieser Funktion gab er 1989 die Funktion des ZIPE-Direktors ab und wurde zum Direktor des Institutes für Kosmosforschung (IKF) berufen. Er war Mitglied des Beirates Interkosmos ab 1973, des Koordinierungskomitees Interkosmos ab 1978. Seit der Versetzung in den Ruhestand befasst er sich im Rahmen der Leibniz-Sozietät e.V. vorrangig mit wissenschaftshistorischen Studien zur Entwicklung der Geo- und Kosmoswissenschaften.

rimenten und dann auch routinemäßig an der Nutzung der Raumfahrt zur Erforschung und Nutzung des Weltraumes für friedliche Zwecke zu beteiligen. Konkrete Möglichkeiten dazu erhielt die DDR durch das Angebot der UdSSR im November 1965, die sowjetische Raumfahrt im Rahmen der Zusammenarbeit der sozialistischen Länder zu nutzen. Die Verhandlungen auf Regierungsebene führten dann im Jahre 1967 zu entsprechenden internationalen Vereinbarungen und zu den schon erwähnten nationalen Beschlüssen.

Phase B: von 1967 bis 1973

Der eingangs erwähnte Beschluss des Ministerrates vom 17.08.1967 bezeichnet den offiziellen Startschuss für die Beteiligung der DDR an der "aktiven" Weltraumforschung. Die ersten Experimente wurden – mit beachtlichem Erfolg – auf den Gebieten Kosmische Physik⁵ und Kosmische Meteorologie durchgeführt. Die Kontakte im Rahmen von "Interkosmos" auf dem Gebiet Kosmisches Nachrichtenwesen dienten vor allem der Vorbereitung zum Beitritt der DDR zum Abkommen "Intersputnik"⁶. Das Ende dieser Phase und den Übergang zur nächsten ab etwa 1973 markieren mehrere Ereignisse und Vorgänge: a) 1972 schlug die sowjetische Seite vor, das Programm Interkosmos wesentlich zu erweitern – die Erweiterung in Schlagworten: Erforschung von Erdmond und Planeten, Fernerkundung der Erde mit aerokosmischen Mitteln, Kosmische Medizin. Der Vorschlag wurde von allen Teilnehmerländern (in der DDR nach z. T. heftigen innerstaatlichen Auseinandersetzungen) akzeptiert. b) Die Reform der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu

- 5 Im Sprachgebrauch von "Interkosmos" umfasste das Gebiet "Kosmische Physik" alle Arbeiten, die unter Nutzung von Mitteln der Raumfahrt zur Erforschung der Bedingungen, Strukturen und Vorgänge im Weltraum oberhalb des Maximums der F2-Schicht der Ionosphäre, einschließlich aller dort vorhandenen Himmelskörper, mittels in-situ-Messungen durchgeführt werden sollten. Hinzu gerechnet wurden alle Messungen der elektromagnetischen und der Partikelstrahlung an Bord der Raumflugkörper, insbesondere der von der Sonne, aber auch von astrophysikalischen Objekten und aus dem Weltraum außerhalb des Sonnensystems. Der Ständigen Arbeitsgruppe Kosmische Physik wurden auch die Entwicklung und Fertigung der dazu benötigten kosmostauglichen Geräte zugeordnet. Als Leiteinrichtung in der DDR für die Arbeiten in dieser Richtung fungierten von 1967 bis 1972 das Zentralinstitut für solar-terrestrische Physik der Akademie (ZISTP), ab 1973 das Institut für Elektronik (IE) bzw. Institut für Kosmosforschung der Akademie (IKF).
- "Intersputnik" war das internationale System und die Organisation für kosmische Nachrichtenverbindung unter Nutzung der sowjetischen Nachrichtensatelliten. Das multinationale Regierungsabkommen wurde am 01.07.1971 in Moskau unterzeichnet. Der Organisation gehörten die Mitgliedsstaaten des Rates für gegenseitige Wirtschaftshilfe an, sie stand aber auch Staaten offen, die nicht dem RGW angehörten. Die Verantwortung für "Intersputnik" oblag in der DDR dem Minister für Post- und Fernmeldewesen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für das Regierungsabkommen Intersputnik waren eng mit den Arbeiten im Rahmen der Arbeitsgruppe Kosmisches Nachrichtenwesen im Programm Interkosmos verknüpft.

154 Heinz Kautzleben

Berlin, die ihre Stellung als nationale Akademie der Wissenschaften der DDR ab 1972 auch in ihrem Namen zum Ausdruck brachte, und ihre Umwandlung zum führenden leistungsfähigen Zentrum der Wissenschaften der DDR neigten sich dem Ende zu. c) Die DDR wurde weltweit diplomatisch anerkannt und 1973 Mitglied der UNO und ihrer Spezialorganisationen, darunter auch Mitglied im UN Committee on Peaceful Use of Outer Space (COPUOS).

Phase C: bis Ende der 1970 er Jahre

In ihr wurden in den bisherigen Hauptrichtungen des Programms Interkosmos und besonders in Richtungen des Erweiterungsprogramms weithin beachtete Erfolge erzielt. Bis zum Ende dieser Phase erfolgten die Starts von 20 der insgesamt 25 Erdsatelliten des Typs "Interkosmos". Die bisherigen Vereinbarungen zum Programm Interkosmos wurden auf eine neue völkerrechtliche Basis gestellt: Am 13.07.1976 unterzeichneten die Teilnehmerländer am Programm ein Regierungsabkommen über die Zusammenarbeit bei der Erforschung und Nutzung des Weltraumes zu friedlichen Zwecken; es trat am 25.03.1977 in Kraft. Vorgesehen wurde darin auch, dass über die sozialistischen Länder hinaus noch weitere Staaten beitreten konnten. In dieser Phase begann die Sowjetunion damit, Teile ihres nationalen Programms zur Erforschung und Nutzung des Weltraumes zu friedlichen Zwecken den sozialistischen und weiteren Staaten zur Beteiligung zu öffnen. Vom 15.07. bis 03.09.1978 erfolgte der Weltraumflug von Sigmund Jähn als Forschungskosmonaut an Bord der sowjetischen Orbitalstation "Saljut 6". 7 Es war der dritte in der Serie der Weltraumflüge mit je einem Bürger der Teilnehmerländer am Programm Interkosmos, die in den Jahren 1978 bis 1982 an Bord der sowjetischen Orbitalstationen "Salut 6" bzw. "Mir" durchgeführt wurden.

Phase D: die 1980er Jahre

In dieser Phase wurde auch in der DDR die Erforschung und Nutzung des Weltraumes für friedliche Zwecke in Wissenschaft und Volkswirtschaft zu allgemein üblichen und weitgehend unerlässlichen Aktivitäten, wobei sich zunehmend abzeichnete, dass die Leistungskraft der DDR dazu immer weniger ausreichte. Mit dem Ende der DDR wurde das Kapitel eigenständige Beteiligung der DDR an Weltraumaktivitäten abgeschlossen. Das Koordinierungskomitee Interkosmos wurde aufgelöst. Die Verantwortung für die in den ehemaligen Einrichtungen der DDR noch laufenden Arbeiten zur Weltraum-

⁷ Die DDR wurde damit (nach der UdSSR und den USA, sodann der CSSR und der VR Polen zum 5. Staat, der einen Staatsbürger zu einem Weltraumflug entsandt hat. Der DDR-Bürger Sigmund Jähn war der erste Deutsche im Weltraum.

forschung, insbesondere in der Zusammenarbeit mit der Sowjetunion, wurde von der DARA (Deutsche Agentur für Raumfahrtangelegenheiten mit Sitz in Bonn) übernommen.

Wirtschaftliche und wissenschaftliche Interessen in der DDR an der Nutzung der Raumfahrt

Auch im Rückblick kann man konstatieren, dass die überragende Bedeutung der Raumfahrt und ihrer weit gespannten Nutzung für Wissenschaft und Volkswirtschaft in der DDR früh erkannt wurde. Dabei spielte die "Faszination der Raumfahrt" weit weniger eine Rolle als die weit verbreitete Befürchtung "nicht zurückbleiben" zu dürfen.

Die DDR war in jeder Hinsicht ein hoch entwickelter Staat und hatte schon vor Beginn der auf die Mittel der Raumfahrt gestützten Weltraumforschung entwickelte gesellschaftliche Bereiche mit durchgehend großen Traditionen, die von der Nutzung der Raumfahrt nur profitieren können und ohne sie immer weniger auskommen. Zu nennen sind hauptsächlich folgende Bereiche:

- Meteorologie (Wetterdienst)
- Telekommunikation
- Erdvermessung, Navigation
- Geräte- und Anlagenbau (Carl Zeiß Jena), Elektronikindustrie
- Erkundung der irdischen Ressourcen, Überwachung der Umwelt
- Erforschung von Hochatmosphäre, erdnahem Weltraum, der solar-terrestrischen Beziehungen
- Astronomie und Astrophysik.

Die DDR konnte nur die Möglichkeiten der UdSSR und deren Angebote⁸ nutzen

Bei dieser Feststellung darf man nicht nur an die geographischen und die politischen Rahmenbedingungen denken. Die Beschränkungen werden schon

⁸ Nach dem Zusammenbruch der Sowjetunion und nachdem die sowjetischen Archive zugänglich geworden sind, wird immer mehr erkennbar, wie die Raumfahrt in der UdSSR und deren Nutzung für Militär, Wirtschaft und Wissenschaft entwickelt wurde. Dadurch werden auch viele Vorgänge und deren Hintergründe im Verhalten der sowjetischen Seite zur Zusammenarbeit mit den sozialistischen Ländern bei der Erforschung und Nutzung des Weltraumes besser verständlich.

156 Heinz, Kautzleben

mehr als deutlich, wenn man die bei der Nutzung der Raumfahrt erforderlichen technischen und organisatorischen Komplexe bedenkt, als da sind:

- Trägerrakete, Startkomplex, Flugleitung
- Raumfahrzeug
- Nutzlast
- Telemetrie, Bodenempfang
- Datenverwertung.

Beiträge seitens der DDR zum erstgenannten Komplex, auch noch so kleine, waren völlig undenkbar. Die DDR verfügte nicht einmal über eine eigene Flugzeugindustrie. Die Nationale Volksarmee der DDR besaß keinerlei Voraussetzungen für Operationen mit geostrategischer Ausrichtung. Angesichts der Finanzkraft der DDR war auch bei den weiteren Komplexen, ausgenommen den letzten, nicht an einen Kauf als Dienstleistung zu denken. Er wurde in den ersten Jahrzehnten von der sowjetischen Seite auch nicht gefordert, wohl aber zunehmend in den 1980er Jahren. Die großzügige Bereitstellung hatte aber ihren Preis: Die Sowjetunion entschied, was wann gemacht werden soll und was ab wann nicht mehr geheim gehalten wird.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Leistungen durch die DDR

Wir beginnen mit einer kurzen Nennung der Gebiete. Anschließend folgen dazu einige detaillierte Angaben und werden wichtige Aspekte genannt.

- Entwicklung und Fertigung von kosmostauglichen Geräten und Einsatz in sowjetischen Raketen und Satelliten
- Erforschung von Hochatmosphäre und erdnahem Weltraum
- Arbeiten zur kosmischen Meteorologie
- Teilnahme an Planetenmissionen der UdSSR
- Mehrkanalfotoapparat MKF-6, Nutzung der Fernerkundung mit aerokosmischen Mitteln
- Forschungskosmonaut Sigmund Jähn
- Satellitengeodäsie
- Beteiligung an "Intersputnik".

Die Entwicklung und Fertigung von kosmostauglichen Geräten war und ist die entscheidende Voraussetzung dafür, dass sich Einrichtungen der DDR an der "aktiven" Weltraumforschung beteiligen konnten. Als Zentralstelle für die entsprechenden Arbeiten wurde ab 1965 das Zentralinstitut für solar-terrestrische Physik der Akademie (ZISTP) (Direktor OM Ernst August Lauter) eingerichtet. Der über nahezu zwei Jahrzehnte anhaltende zügige Ausbau wurde ab 1973 fortgesetzt im Institut für Elektronik der Akademie (das IE

wurde aus dem ZISTP herausgelöst, sein Direktor war von 1973 bis 1980 Hans-Joachim Fischer) bzw. Institut für Kosmosforschung (IKF, wie das IE ab 1981 genannt wurde, sein Direktor war von 1981 bis 1988 Robert Knuth). Obwohl sich an der Entwicklung und Fertigung von kosmostauglichen Geräten zahlreiche weitere Einrichtungen der Akademie der Wissenschaften, des Meteorologischen Dienstes und auch der Industrie der DDR beteiligten, konnten aber zu keiner Zeit die Anforderungen aus den Kosmos-Aktivitäten ausreichend erfüllt werden. Man kann wohl behaupten, dass die sowjetische Seite besonders an derartigen Leistungen aus der DDR interessiert war. Die politischen Aspekte, die in den 1960er Jahren und anfangs der 1970er Jahren noch eine wichtige Rolle spielten, verloren danach zunehmend an Bedeutung.

Erdsatelliten "Interkosmos"

Diese Satelliten dienten ausschließlich Forschungszwecken, und zwar vorwiegend Missionen auf dem Gebiet der kosmischen Physik. Die Flughöhen auf ihren Umlaufbahnen um die Erde lagen zumeist zwischen 200 und 700 km, maximal wurden bis zu 3.000 km erreicht. Einige Eckdaten:

In den 1970er Jahren erfolgten die Starts

von

"Interkosmos-1" am 14.10.1969 im Startplatz Kapustin Jar (Gebiet Wolgograd)

Typ des Satelliten "DS-U"

bis

"Interkosmos-20" am 01.11.1979 im Startplatz Plesezk (Gebiet Archangelsk) Typ des Satelliten "AUOS-Z".

In den 1980er Jahren erfolgten die Starts

von

"Interkosmos-21" am 06.02.1981 im Startplatz Plesezk Typ des Satelliten "AUOS-Z"

bis

"Interkosmos-24" am 28.09.1989 im Startplatz Plesezk Typ des Satelliten "AUOS-Z".

Die Reihe endete mit dem Start von

"Interkosmos-25" 18.12.1991 im Startplatz Plesezk Typ des Satelliten "AUOS-Z".

Bei den Satelliten der Typen "DS-U" und "AUOS-Z" handelte es sich um sog. kleine Satelliten, die mit Trägerraketen aus der Familie der Raketen mitt-

158 Heinz Kautzleben

lerer Reichweite gestartet werden konnten. Beide Typen waren im Speziellen Konstruktionsbüro (OKB) der sowjetischen Verteidigungsindustrie in Dnepropetrowsk für eine universelle Verwendung entwickelt und gefertigt worden. Daher die Bezeichnung für den zuerst eingesetzten Typ "DS-U". Diesem folgte der Typ "AOUS-Z", was "automatische universelle Orbitalstation für Einsätze mit Orientierung auf die Erde" bedeutet. Den Teilnehmerländern an "Interkosmos", insbesondere der DDR, war von der sowjetischen Seite angeboten worden, sich an der Entwicklung von AUOS zu beteiligen. Die Mitwirkung kam jedoch nicht zustande.

Die DDR war mit Geräten an 12 der 25 Missionen beteiligt, darunter der ersten und der letzten. Der Erfahrungsgewinn aus den Missionen war für die beteiligten wissenschaftlichen Einrichtungen beträchtlich. Große Aufmerksamkeit haben die Missionen mit den Satelliten Interkosmos in den Medien leider nicht gefunden. Die Aktionen wurden überstrahlt in den ersten Jahren vom zeitgleichen Wettlauf der beiden Großmächte zum Mond, später von den spektakulären Leistungen im Rahmen des Erweiterungsprogramms. In den 1980er Jahren waren die Missionen mit den Interkosmos-Satelliten für die sowjetische Seite uninteressant geworden.

Einheitliches Telemetrie-System für "Interkosmos"-Satelliten

Seit Beginn der 1970er Jahre unternahmen die kleinen sozialistischen Länder unter Führung der DDR den Versuch, für die Durchführung der Experimente zur kosmischen Physik im Rahmen des Programms Interkosmos ein eigenes Telemetrie-System zu entwickeln, wozu sowohl ein Satelliten- wie auch ein Bodensegment mit Empfangsstationen in allen beteiligten Ländern gehören sollte. Die Absicht war, dieses ETMS zusätzlich zum bzw. anstatt des von der sowjetischen Seite für die "Interkosmos"-Satelliten betriebene standardmäßige Telemetrie-System nutzen zu können. Die Entwicklung gelang. Das ETMS wurde erfolgreich für die Satelliten "AUOS-Z" in den Missionen mit "Interkosmos-15" im Juni 1976, "Interkosmos-18" im Oktober 1978 und "Interkosmos-19" im Februar 1979 eingesetzt. Die Überführung in die Serienproduktion als Voraussetzung für den Routineeinsatz stieß dagegen auf wachsende Schwierigkeiten. Es gelang in den 1980er Jahren nur noch, das System zum ETMS-II weiterzuentwickeln und dieses einmal in der Mission mit "Interkosmos-24" im September 1989 einzusetzen.

Kosmische Meteorologie

Neben der Kosmischen Physik gehörte die Kosmische Meteorologie zu den ersten beiden Gebieten, zu denen im Rahmen des Programms Interkosmos unter Beteiligung der DDR wissenschaftliche Experimente an Bord von sowjetischen Raumflugkörpern durchgeführt wurden. Die DDR beteiligte sich mit eigenen Geräten an Experimenten auf insgesamt 38 meteorologischen bzw. geophysikalischen Raketen. Hinzu kamen Experimente größeren Maßstabs auf 3 Satelliten des Typs "Meteor". Einen breiten Umfang nahmen weiterhin die Beiträge der Meteorologen zu den Untersuchungen für die Fernerkundung der Erd- und Meeresoberfläche ein. Zum Spezialgebiet entwickelten sich dabei die Arbeiten zur Korrektur des Einflusses der Atmosphäre.

Die Arbeiten der Meteorologen in "Interkosmos" waren einerseits eng verknüpft mit der Zusammenarbeit der Hydrometeorologischen Dienste der sozialistischen Länder und andererseits mit der Mitarbeit der DDR, wie aller anderen sozialistischen Länder auch, im Rahmen der Meteorologischen Weltorganisation (WMO), letztere verstärkt nach der Aufnahme der DDR in die UNO und die WMO 1973.

Es kann nicht verschwiegen werden, dass in der DDR außerhalb der Zusammenarbeit mit der Sowjetunion und den weiteren sozialistischen Ländern auch die von den Wettersatelliten der USA und Westeuropas ausgestrahlten und frei empfangbaren Wetterinformationen genutzt und dafür spezielle Empfangsanlagen gebaut wurden.

Zu erwähnen ist in diesem Abschnitt weiter das bilaterale Regierungsabkommen von UdSSR und DDR zur Nutzung meteorologischer Raketen mit dem Startplatz auf der Halbinsel Zingst. Das Abkommen wurde am 31.03.1978 unterzeichnet. Es stand außerhalb von "Interkosmos". Verantwortlich dafür war seitens der DDR der Meteorologische Dienst.

Satellitengeodäsie

Die Anfänge dieser Arbeitsrichtung im Programm Interkosmos liegen in den astronomischen Beobachtungen zur Bahnverfolgung bereits der ersten sowjetischen künstlichen Erdsatelliten. Daraus entwickelte sich die regionale Zusammenarbeit der in den sozialistischen Ländern auf dem Gebiet der Satelliten- oder kosmischen Geodäsie tätigen Forschungseinrichtungen. Bei den Arbeiten im Rahmen von "Interkosmos" wurden dabei hauptsächlich die speziell für die Geodäsie und die Navigation geschaffenen Satelliten der USA

160 Heinz Kautzleben

und Frankreichs genutzt. Die sowjetischen Satelliten waren dafür nicht verfügbar. Im Mittelpunkt von "Interkosmos" stand der Erfahrungsaustausch zur Entwicklung der erforderlichen Ausrüstungen für die relevanten Beobachtungsstationen und zur Ausarbeitung der Modelle für die Ableitung der Stationskoordinaten und der Geodynamik. In der DDR entwickelte und fertigte der VEB Carl Zeiß Jena bereits in den 1960er Jahren eine Präzisionskamera für Astrogeodäsie. Sie wurde vom ZIPE in den 1970er Jahren mit einem Laserradar ergänzt und ständig weiter entwickelt. Dieses "SBG" wurde als Standardgerät in der DDR und weiteren Ländern eingesetzt. Das in den sozialistischen Ländern aufgebaute experimentelle Stationsnetz wurde von den Mitgliedern der "Interkosmos"-Gruppe als ihre Basis in weltweiten Kampagnen auf dem Gebiet der Satellitengeodäsie und für die Sammlung regionalspezifischer Erfahrungen genutzt.

Die Geodätischen Dienste der sozialistischen Länder beteiligten sich an den Forschungsarbeiten im Programm Interkosmos, achteten aber auch dabei streng darauf, dass in keiner Weise eine Verbindung des experimentellen Netzes mit den staatlichen geodätischen Netzen entstand oder Daten über diese offenbart wurden.

Mehrkanalfotokamera MKF-6. Fernerkundung der natürlichen Ressourcen der Erde

Die Arbeiten zur Fernerkundung der Erde wurden seit der Erweiterung des Programms Interkosmos zur festen und sich ständig ausweitenden Arbeitsrichtung. Weithin bekannt wurde die MKF-6, eine Kopplung von photogrammetrischen Kameras fiir Aufnahmen in 6 verschiedenen Spektralkanälen, die auch Multispektralkamera genannt wurde. Sie wurde im sowjetischen Auftrag seit Anfang der 1970er Jahre im VEB Carl Zeiß Jena entwickelt und dort auch gefertigt. Die MKF-6 wurde in Flugzeugexpeditionen im Gebiet der DDR und während des eigens dafür gestarteten bemannten Raumschiffes "Sojus 22" (vom 15. bis 23.09.1976) erfolgreich erprobt. Die MKF-6 war das erste in der Industrie der DDR entwickelte und gefertigte Großgerät für den Einsatz in künstlichen Erdsatelliten.

Die Erprobung der MKF-6 gab sowohl in der DDR wie auch in allen weiteren Teilnehmerländern an "Interkosmos" einen entscheidenden Anstoß für den Auf- und Ausbau des Arbeitsgebietes Fernerkundung der Erde mit aerokosmischen Mitteln. Im Rahmen von "Interkosmos" wurde im April 1975 eine neue Arbeitsgruppe gebildet, die sich sowohl mit Fragen der Interpreta-

tion der einlaufenden Daten als auch mit der Entwicklung weiterer technischer Mittel befasste. Bezüglich der technischen Mittel waren vorrangige Ziele die Entwicklung optoelektronischer Kameras mit digitaler Datengewinnung sowie von spektrometrischen Geräten. Als vorrangige Aufgaben bei der Interpretation erwies sich die Entwicklung der digitalen Bearbeitung, der Digitalkartographie bis hin zur Geoinformatik.

Die Vorarbeiten im Rahmen von "Interkosmos" ermöglichten es, dass bereits am 21.06.1978 ein spezielles Regierungsabkommen von UdSSR und DDR zur ökonomischen und technischen Kooperation auf dem Gebiet der Fernerkundung abgeschlossen wurde.

Forschungskosmonaut Sigmund Jähn

In der Anfangszeit der Raumfahrt besaß die bemannte Raumfahrt einen besonders hohen Stellenwert. Bis weit in die 1970er Jahre hinein hatten nur Staatsbürger der beiden Großmächte UdSSR und USA als Kosmonauten bzw. Astronauten an Weltraumflügen teilgenommen. Deshalb war der DDR das Angebot, das ihr am 15.07.1976 von der Sowjetunion unterbreitet wurde, höchst willkommen, in ein, zwei Jahren einen Bürger der DDR zu einem Raumflug in einer sowjetischen Orbitalstation mitzunehmen, wobei die Flugkosten von der sowjetischen Seite übernommen würden. Die Umsetzung erhielt höchste Priorität. Die Verantwortung wurde dem Koordinierungskomitee Interkosmos übertragen. Aus medizinischen Gründen kam als Teilnehmer nur ein trainierter Jagdflieger in Frage. Da er nur als Forschungskosmonaut mitfliegen konnte, musste er über große wissenschaftlich-technische Vorbildung und Fähigkeiten verfügen. Innerhalb der äußerst kurzen Vorbereitungszeit mussten ausreichend viele Experimente entwickelt werden, die der Forschungskosmonaut an Bord der Orbitalstation mit Aussicht auf möglichst bedeutende Ergebnisse durchführen konnte. An dieser Stelle kann nur daran erinnert werden, dass der Kraftakt gelang. Der Forschungskosmonaut der DDR Sigmund Jähn erreichte am 26.08.1978 die Orbitalstation "Saljut 6" und kehrte von ihr am 03.09.1978 wieder zur Erde zurück. Während seines Aufenthaltes hatte er wissenschaftlichtechnische zur Fernerkundung der Erde unter Einsatz der an Bord befindlichen MKF-6 und von Handkameras sowie materialwissenschaftliche, medizinische und biologische Experimente durchgeführt. Die Auswertung der von ihm erzielten Messergebnisse erfolgte in

⁹ Als Leiteinrichtung in der DDR fungierte für die Arbeiten zur Entwicklung technischer Mittel das IE bzw.IKF, für die Arbeiten zur Interpretation der Fernerkundungsdaten das ZIPE.

162 Heinz Kautzleben

den Instituten, die die Experimente vorbereitet hatten. Die Vorbereitung und Auswertung der Experimente haben vor allem in diesen Einrichtungen neue wissenschaftliche Forschungen initiiert. Hervorzuheben sind in dieser Beziehung die Arbeiten auf dem Gebiet der Weltraummedizin; sie wurden im Institut für Flugmedizin Königsbrück der Nationalen Volksarmee der DDR durchgeführt. Sigmund Jähn beteiligte sich persönlich vor allem an der Auswertung der Experimente zur Fernerkundung der Erde; diese wurden im ZIPE betreut. Seine Untersuchungen erreichten hohe wissenschaftliche Qualität und konnten mit der Promotion zum Dr. rer. nat. 1983 gewürdigt werden.

Nachdem einmal das Interesse an der bemannten Raumfahrt geweckt worden war, versuchte die DDR in den 1980er Jahren nochmals, einen ihrer Staatsbürger zur Teilnahme an einer Mission auf einer sowjetischen Orbitalstation zu entsenden. In den entsprechenden Verhandlungen forderte die Sowjetunion jedoch die Bezahlung der ihr dadurch entstehenden Kosten durch die DDR. Die DDR war dazu nicht (nicht mehr) in der Lage. Der zweite deutsche Forschungskosmonaut war dann Klaus-Dietrich Flade, der seinen Raumflug auf der Station "Mir" im März 1992 absolvierte.

Topside-Sondierung der Atmosphären von Erde und Venus. Infrarot-Fourier-Spektrometer

Mit diesen Arbeiten begann die Mitwirkung der DDR an Missionen auf Satelliten im Rahmen des nationalen Programms der UdSSR. Die DDR besaß hierfür sowohl in gerätetechnischer (Optik und Spektroskopie) als auch in thematischer Hinsicht (Atmosphärenphysik) besonders günstige Voraussetzungen. Die Entwicklung seit 1971 und auch die Fertigung der Infrarot-Fourier-Spektrometer erfolgten in Einrichtungen der Akademie der Wissenschaften und des Meteorologischen Dienstes. Die Geräte gelangten in den 1970er Jahren zum Einsatz im Rahmen von drei Missionen zur Sondierung der Erdatmosphäre auf den Satelliten des Typs "Meteor-Priroda", und zwar auf "Meteor-25" (Mai 1976), "Meteor-28" (Juni 1977) und "Meteor-29" (Januar 1979). Alle Messdaten sind von den beteiligten Wissenschaftlern der DDR eingehend ausgewertet worden; die Ergebnisse fanden großes Interesse in der Fachwelt. Die analoge Teilnahme an weiteren Missionen im Rahmen des Weltklimaprogramms, die sowohl seitens der UdSSR wie auch von der WMO erbeten wurde, scheiterte, weil in der DDR die Kapazitäten zur Fertigung der erforderlichen Geräte nicht bereitgestellt werden konnten. Diese wurden anderweitig benötigt, und zwar für die Fertigung der entsprechenden

Spektrometer für den Einsatz in den Missionen zur Sondierung der Venusatmosphäre auf den sowjetischen Raumsonden "Venera-15" und "Venera-16". Deren Starts erfolgten im Juni 1983, die Messungen im Oktober bis Dezember 1983). Auch dieser Einsatz verlief erfolgreich. Die Messdaten sind ebenfalls eingehend ausgewertet worden und erbrachten sehr interessante Ergebnisse.

Beteiligung an internationalen Planetenmissionen der UdSSR

In den 1980er Jahren wurde die Nutzung des Weltraumes auch in der UdSSR und den am Programm Interkosmos teilnehmenden Ländern zunehmend zur Routine. Das Interesse der sowjetischen Weltraumforschung, geführt vom Institut für kosmische Forschungen der AdW der UdSSR (IKIAN), verlagerte sich deutlich auf Missionen zur Erforschung der Planeten mit breiter internationaler Beteiligung, wobei die am Programm Interkosmos beteiligten Länder in die Minderheit gerieten. Die Beteiligung der DDR an derartigen Missionen wurde von Mission zu Mission verstärkt und erweitert. Die erste war das Projekt "VEGA" mit Flügen zur Venus und zum Kometen Halley. Die Sowjetunion setzte dafür die Raumsonden "VEGA-1" und VEGA-2" ein. Sie wurden im Dezember 1984 gestartet und passierten die Venus im Juni 1986 und den Kometen Halley im März 1986. Die DDR beteiligte sich bei der Gewinnung und Bearbeitung von Bildern vom Kometen Halley. Eine wesentlich stärkere Beteiligung wurde zum Projekt "Phobos" vorbereitet. Die Sowjetunion setzte dafür die Raumsonden "Fobos-1" und "Fobos-2" ein. Die Starts erfolgten im Juli 1988. Der Start von "Fobos-1" missglückte. "Fobos-2" erreichte den Marsorbit Ende Januar 1989 und Phobos im Februar/März 1989, dann brach die Datenübertragung ab. Eine Enttäuschung!

Eine noch stärkere Beteiligung wurde von der DDR für die sowjetische Mission mit breiter internationaler Beteiligung zum Mars in den 1990er Jahren vorbereitet. Zum Glanzlicht sollte der Einsatz der neu entwickelten optoelektronischen Kamera WAOSS werden. Nach mehrfachen Verschiebungen erfolgte der Start der dafür vorgesehenen Raumsonde "Mars-96" erst nach dem Ende der DDR und dem Zusammenbruch der UdSSR, und zwar am 16.11.1996. Es wurde ein Fehlstart.

Misserfolge sind in der auf die Mittel der Raumfahrt gestützten Weltraumforschung keine Seltenheit. Die angearbeiteten Projekte werden danach unter Einsatz der vorgesehenen technischen Entwicklungen in neuen Raumflugkörpern weitergeführt. So ist es auch geschehen mit den Entwicklungen 164 Heinz Kautzleben

der Weltraumforschung in der DDR für das ursprünglich sowjetische, dann russische Mars-Projekt.

Kurzes Fazit: Die Leistungen des Koordinierungskomitees Interkosmos

Das Koordinierungskomitee hat unter den Bedingungen der sozialistischen DDR trotz aller Schwierigkeiten seine Aufgaben in bemerkenswerter Weise erfüllt, die lebensnotwendige, scheinbar mehr administrative

Vorbereitung von allseitig, d.h. auch mit den Partnern in "Interkosmos", abgestimmten Plänen zu den kosmischen Vorhaben der DDR und Vorlage zur Bestätigung im Ministerrat

ebenso wie die anscheinend mehr informelle

Unterhaltung von funktionierenden Verbindungen zum Rat Interkosmos bei der Akademie der Wissenschaften der UdSSR mit umfassenden Informationsaustausch weit über die Angelegenheiten des Programms Interkosmos hinaus.

Mitglieder unserer Gelehrtengesellschaft, die in der Weltraumforschung der DDR, insbesondere im Rahmen des Programms Interkosmos, aktiv waren:

Wolfgang Böhme	KM ¹⁰ 1977, OM 1980	
Claus Grote	KM 1972, OM 1974	
Heinz Kautzleben	KM 1979, OM 1987	
Volker Kempe	KM 1984, OM 1986	*
Ernst August Lauter	OM 1967	verstorben 1984
Karlheinz Müller	KM 1972	*
Karl-Heinz Schmelovsky	KM 1970, OM 1979	*
Heinz Stiller	KM 1971, OM 1974	*
Boris N. Petrov	AM 1971	verstorben 1980
Vladimir A. Kotelnikov	AM 1974	verstorben 1974
Dieter B. Herrmann	MLS 1996	
Diedrich Möhlmann	MLS 2005	
Dietrich Spänkuch	MLS 1994	

¹⁰ Die Abkürzungen KM, OM und AM bedeuten, dass die Zuwahl durch das Plenum der DAW bzw. AdW der DDR zum korrespondierendem, ordentlichen bzw. auswärtigen Mitglied der Akademie erfolgte. MLS besagt, dass die Zuwahl durch die Leibniz-Sozietät erfolgte.

Die Leibniz-Sozietät würdigt das Wirken aller beteiligten Fachkollegen, auch derjenigen, die nicht Mitglieder unserer Gelehrtengesellschaft waren. Von ihnen seien an dieser Stelle namentlich genannt: Hans-Joachim Fischer und Ralf Joachim; sie sind beide schon verstorben.

Referenzsysteme für globale Vermessungen und geodynamische Untersuchungen mittels geodätischer Raummethoden

1. Einleitende Betrachtungen

50 Jahre Vermessung und Überwachung der Erde mit Hilfe von Satelliten – das ist auch eine geodätische Erfolgsgeschichte bisher nicht gekannten Ausmaßes. Die neu entstandene Teildisziplin Satellitengeodäsie ermöglichte erstmalig eine globale Vermessung mit geodätischer Genauigkeit. Damit ist eine Vielzahl neuer Erkenntnisse über die Größe und Figur der Erde, über geometrische und physikalische Parameter des Erdkörpers und seiner Wechselwirkung mit anderen Himmelskörpern verbunden. Die hohe Genauigkeit enthüllte auch die zeitlichen Variationen der meisten dieser Parameter. Die Überwachung dieser geodynamischen Erscheinungen ist im Rahmen permanenter internationaler wissenschaftlicher Beobachtungs- und Analysendienste zu einer wichtigen Aufgabe geworden.

Mit der Satellitengeodäsie ist für die Geodäsie auch eine völlig neue Aufgabenstellung verbunden, die Bahnbestimmung künstlicher Erdsatelliten. Einerseits dient diese Bahnbestimmung als ein notwendiger Zwischenschritt für die Bestimmung hochgenauer Positionen bzw. Stationskoordinaten auf der Erde. Andererseits ist die präzise Analyse der Satellitenbahnen eine Quelle neuer Erkenntnisse über eine Vielzahl von Erscheinungen des Systems Erde. Das betrifft sowohl gravitative als auch nichtgravitative Parameter, die entsprechende Bahnstörungen gravitativer bzw. nichtgravitativer Art verursachen und damit aus den Bahnanalysen abgeleitet werden können. Voraussetzungen dafür sind neben einem Vorlauf für eine entsprechende Bahntheorie globale Stationsnetze und die Anwendung verschiedener Beobachtungs- bzw. Messverfahren (Redundanz). Eine Kombination verschieprinzipiell unterschiedlicher, aber in der Messgenauigkeit gleichwertiger Messverfahren ist notwendig, um bestmögliche Genauigkeiten zu erzielen und insbesondere systematische Fehler weitgehend auszuschalten. Diese Redundanz – sowohl hinsichtlich der Messgenauigkeit als

auch der sich überlappenden jeweils einzigartigen Beiträge für die Bestimmung der einzelnen Parameter – wird heute erreicht durch optische Laserentfernungsmessungen zu künstlichen Erdsatelliten (SLR - Satellite Laser Ranging), verschiedene Mikrowellenverfahren zur Messung von Distanzen. Distanzänderungen oder -differenzen (GPS, DORIS, Satellite to Satellite Tracking -SST, Altimetermessungen vom Satelliten zur Erdoberfläche) sowie durch Gradiometermessungen im Satelliten. Im Sinne der Redundanz und zur Bestimmung zusätzlicher Parameter ist die Nutzung weiterer, ebenfalls in den letzten 50 Jahren neu entstandener, geodätischer Raumverfahren von besonderer Bedeutung. Es sind dies Lasermessungen zu unserem natürlichen Satelliten, dem Mond (LLR - Lunar Laser Ranging), die zusätzlich die Bestimmung von Parametern des Erde-Mond-Systems ermöglichen, und die Mikrowellen-Interferometrie mit sehr langen Basislinien (Very Long Baseline Interferometry – VLBI) zu extragallaktischen Strahlungsquellen (Quasaren), die die Realisierung und Überwachung eines Inertialsystems ermöglichen.

Die erreichten Genauigkeiten liegen heute bei globalen Anwendungen im Zentimeter- bis Millimeterbereich (10⁻⁹ bis 10⁻¹⁰ mit Bezug auf den Erdradius).

Im Rahmen internationaler Kooperation sind im Laufe der ständigen Weiterentwicklung der dynamischen Satellitengeodäsie sowie der VLBI immer wieder neue und verfeinerte Erkenntnisse über die vielfältigen Parameter des Systems Erde und deren Wechselwirkung erzielt worden. Zu nennen sind insbesondere die Figur und Größe der Erde einschließlich Schwerefeld und Geoid, das globale Referenzsystem, die Geokinematik und Geodynamik sowie einige physikalische Phänomene (Gravitationskonstante, relativistische Effekte).

Zur Bestimmung des Schwerefeldes der Erde bzw. des Geoides dienen vor allem SST- und Altimetermessungen sowie Gradiometermessungen im Satelliten. Auf die großen Fortschritte bei der Vermessung des globalen Gravitationsfeldes wird hier nicht weiter eingegangen; es sei auf den Beitrag von R. Rummel in diesem Band verwiesen.

Die Ergebnisse der neuen geodätischen Raumverfahren haben in einem halben Jahrhundert gegenüber den klassischen terrestrischen Verfahren einen Genauigkeitssprung um einen Faktor von mehr als 10³ erbracht, ein Fortschritt, der in der Entwicklung der altehrwürdigen Disziplin Geodäsie einmalig ist und wohl auch bleiben wird.

2. Überwachung der Erde durch moderne kosmisch-geodätische Verfahren

Die Ergebnisse klassischer terrestrischer Messungen sind relative Koordinaten in Lage und Höhe sowie prinzipiell auch Geoidhöhen, allerdings mit geringer Genauigkeit und bestenfalls auf große Regionen bzw. Kontinente ausgedehnt.

Die neue Qualität wird durch die dynamische Methode der Satellitengeodäsie erreicht. Neben geometrischen können auch physikalische Größen mit hoher Genauigkeit und im globalen Umfang bestimmt werden. In erster Linie sollen hier Lösungen für grundlegende Referenzsysteme und die Bestimmung präziser geozentrischer (absoluter) Stationskoordinaten eines globalen Netzes betrachtet werden. Das Monitoring der damit verbundenen Parameter ist die Basis für umfassende geodynamische Untersuchungen.

2.1 Globales geodätisches Referenzsystem

Die Grundlagen aller geodätisch-geodynamischen Untersuchungen sind die Definition, Realisierung und Überwachung entsprechend genauer Referenzsysteme. Im Einzelnen werden zwei Arten von Referenzsystemen benötigt, ein terrestrisches System zur Festlegung von Koordinaten der Punkte auf der Erdoberfläche und ein inertiales Referenzsystem zur Orientierung der geodätischen Netze im Raum sowie als Basis für die Bahnbestimmung künstlicher Erdsatelliten

Das globale geozentrische, terrestrische Referenzsystem wird festgelegt durch das Massenzentrum der Erde als Ursprung, die Lage der Rotationsachse im Erdkörper (z-Achse) und den Schnittpunkt des mittleren Meridians von Greenwich mit dem Äquator (x-Achse; die y-Achse ist die Ergänzung zum Rechtssystem, ebenfalls in der Äquatorebene liegend). Das inertiale Referenzsystem ist raumfest orientiert und hat als Ursprung ebenfalls das Geozentrum (eigentlich nur quasi-inertial wegen der Bahnbewegung der Erde um die Sonne). Bei der Realisierung beider Systeme müssen heute wegen der erreichten Genauigkeit relativistische Effekte berücksichtigt werden ([3], [5], [7]).

Der International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) unterscheidet beim terrestrischen System zwischen dem International Terrestrial Reference System (ITRS), wodurch die Parameter des Systems definiert werden, und dem International Terrestrial Reference Frame (ITRF) als seine Realisierung. Das ITRS ist folgendermaßen definiert [11]:

 Der Ursprung ist das Geozentrum, also Massenzentrum der Erde einschließlich Ozean und Atmosphäre,

- die Einheit ist das SI-Meter unter Berücksichtigung relevanter relativistischer Modelle.
- die Orientierung erfolgt durch die Erdorientierungsparamer (EOP) der Epoche 1984,0; diese Orientierung wird mit bestmöglicher Genauigkeit beibehalten, und zwar durch Überwachung der EOP und durch Anwendung der sog. No-net-rotation-Bedingung bezüglich horizontaler tektonischer Bewegungen der über die ganze Erde verteilten Beobachtungsstationen.

Die Realisierung (Manifestierung) des terrestrischen Referenzsystems, also die Schaffung des ITRF, kann nur durch dreidimensionale Koordinaten von auf der Erdoberfläche vermarkten Festpunkten erfolgen.

Alle Parameter, die die Referenzsysteme definieren und realisieren, sind wegen der unterschiedlichen geodynamischen Prozesse zeitlichen Variationen unterworfen. Diese zeitlichen Änderungen müssen bei der Realisierung eines Referenzsystems berücksichtigt werden. Andererseits sind sie wichtige Eingangsgrößen für geodynamische Untersuchungen.

Analog unterscheidet man beim Inertialsystem auch zwischen den Definitionen für die Parameter des Systems (ICRS – International Celestial Reference System) und der Realisierung (ICRF – International Celestial Reference Frame). Bei der Realisierung spielen die Phänomene Präzession und Nutation der Erde eine zusätzliche Rolle. Sie wurden früher durch astronomische Beobachtungen bestimmt. Heute geschieht das durch die Anbindung an die extragalaktischen Strahlungsquellen mittels VLBI. Dabei wird eine Genauigkeit von besser als 0,5 mas (milli arc second, 1 mas = 0,001 Bogensekunden, entsprechend 3 cm auf der Erdoberfläche) erreicht, im Gegensatz zu bestenfalls 0,1 Bogensekunden bei früheren optisch-astronomischen Beobachtungen. Bezüglich weiterer Einzelheiten sei auf die Annual Reports des IERS [12] sowie die weitere Literatur verwiesen ([3], [4], [5], [8]).

Das terrestrische Referenzsystem (bzw. der Referenz-Rahmen – ITRF) wird neben den Erdkrustenbewegungen (s. Abschn. 2.2) vor allem durch die Variationen des Erdrotationsvektors (Polbewegungen und Rotationsschwankungen, s. Abschn. 2.3) beeinflusst. Beide Phänomene sind nicht vorhersagbar und müssen deshalb ständig überwacht werden.

Die Polbewegungen wurden erst in den siebziger Jahren des 19. Jahrhunderts entdeckt, und zu ihrem permanenten Nachweis wurde bereits 1899 der internationale Polbewegungsdienst eingerichtet. Einige Jahre später folgte

dann in internationaler Kooperation der Zeit- oder Erdrotationsdienst. Mit klassischen astronomischen Messungen wurde in diesen wissenschaftlichen Diensten bis 1987 das Erdrotationsverhalten überwacht. Ab 1988 trat an ihre Stelle der IERS; die astronomischen Verfahren wurden durch die modernen kosmisch-geodätischen Verfahren ersetzt, die um etwa drei Zehnerpotenzen höhere Genauigkeiten erzielen und somit auch die wesentlich höheren Positionsgenauigkeiten auf der Erde ermöglichen. Wie schon erwähnt müssen wegen dieser hohen Genauigkeit heute viele weitere geodynamische Effekte berücksichtigt und eliminiert werden. Dazu zählen insbesondere alle Massenverlagerungen im Erdkörper und deren geometrische (Punktbewegungen durch Gezeiten, Tektonik, Auflasteffekte etc.) und gravimetrisch-physikalische Auswirkungen (Änderung des Gravitationsfeldes durch Massenverlagerungen, Variation des Geozentrums, Satellitenbahnstörungen).

Seit 1988 werden durch den IERS Kombinationslösungen zur Bestimmung der Referenzsysteme für bestimmte Epochen (Abstand ein bis mehrere Jahre) veröffentlicht. Grundlage dafür sind weltweit erhaltene Daten der genannten unterschiedlichen redundanten Messverfahren.

Das vom IERS realisierte terrestrische Referenzsystem unter der Bezeichnung ITRF(xx)xx (International Terrestrial Reference Frame, xxxx oder xx für Jahreszahl) besteht neben den Parametern für den Ursprung, den Maßstab und die Orientierung aus Koordinatensätzen, einschließlich Punktbewegungen, für ein globales Stationsnetz. Das aktuelle System ist das ITRF2005. Es beruht auf langjährigen (kumulativ bis einschließlich 2005 ausgewertet) VLBI-, SLR-, DORIS- und GPS-Daten. Der Vergleich mit dem ITRF2000, das ebenfalls eine besondere Bedeutung eingenommen hat, zeigt die gute Übereinstimmung und damit die hohe Genauigkeit bezüglich Ursprung, Maßstab und Orientierung sowie deren zeitliche Raten. Die Differenzen der Transformationsparameter und deren zeitliche Änderungen (pro Jahr) sowie die mittleren Unsicherheiten (m.F.) zwischen dem ITRF2000 und ITRF2005, abgeleitet aus 70 weltweit verteilten Stationen, sind in Tabelle 1 zusammengestellt ([1], [2], [13]).

Detaillierte Untersuchungen ([1], [2]) haben die große Konsistenz bestätigt. Der Ursprung (Geozentrum) und seine zeitliche Änderung wurden abgeleitet aus SLR-Daten, die durch verschiedene Analysenzentren ausgewertet wurden. Die Unterschiede liegen für die geozentrische x- und y-Komponente (Tx, Ty) unter einem Millimeter, für die z-Komponente (Tz) beträgt die Differenz etwa 5 mm. Zur Bestimmung des Maßstabes und seiner zeitlichen Variation dienten VLBI- und SLR-Daten (s. Abschn. 2.3), ebenfalls als Kombi-

nation der Lösungen verschiedener Analysenzentren. Für den Maßstab liegt die Konsistenz im Bereich von $4*10^{-10}$. Die Orientierung wird mit einer Unsicherheit von etwa \pm 0,01 mas (0,3 mm an der Erdoberfläche) aufrecht erhalten.

Wert Ändg.	Tx [mm] [mm/a]	Ty [mm] [mm/a]	Tz [mm] [mm/a]	D 10 ⁻⁹ 10 ⁻⁹ /a	Rx mas mas/a	Ry mas mas/a	Rz mas mas/a
Wert	0,1	-0,8	-5,8	0,40	0,000	0,000	0,000
m.F.	± 0,3	± 0,3	± 0,3	± 0,05	$\pm 0,012$	± 0,012	$\pm 0,012$
Ändg.	-0,2	0,1	-1,8	0,08	0,000	0,000	0,000
m.F.	± 0,3	±0,3	$\pm 0,3$	$\pm 0,05$	$\pm 0,012$	$\pm 0,012$	$\pm 0,012$

T – Translationen des Ursprungs; D – Maßstab; R – Rotationen

Tabelle 1: Differenzen der Transformationsparameter ITRF2000 minus ITRF2005 und zeitliche Änderungen dieser Transformationsparameter

Entsprechend der Wirksamkeit der übrigen Messverfahren für die Bestimmung der einzelnen Parameter werden diese zur Kontrolle oder Ergänzung eingesetzt. Besonders umfangreich ist das globale Netz von GPS-Stationen, wodurch insbesondere eine Erhöhung der Punktdichte sowie wegen der automatisierten und wetterunabhängigen Messtechnik eine hohe zeitliche Auflösung für die einzelnen Phänomene erreicht wird.

Die Genauigkeit der Punktkoordinaten liegt bei bzw. unter ± 5 mm für die sogenannten Core-Stationen und besser als ± 1 cm für die übrigen Stationen; das entspricht auf den Erdradius bezogen einer Genauigkeit von etwa 10^{-9} . Die Punktbewegungen haben eine Unsicherheit von meist besser als $\pm\pm 1$ mm/a (s. Abschn. 2.2).

Die Verdichtung des globalen Netzes bis in den lokalen Bereich ist mit GPS-Messungen quasi mit der gleichen Genauigkeit möglich. Damit bestehen erstmalig die Voraussetzungen für ein einheitliches Referenzsystem mit geodätischer Genauigkeit, das weltweit für alle Vermessungen genutzt werden kann. Für Deutschland geschah die Verdichtung auf der Grundlage des ITRF89 über das europäische System ETRS-89 (EUREF-Kampagnen in nahezu ganz Europa) zum deutschen Referenzsystem DREF und dann weiter zu den Referenznetzen der einzelnen Bundesländer.

2.2 Punktbewegungen und Krustendeformationen

Neben der Bestimmung hochpräziser Stationskoordinaten ist die Untersuchung von Punktbewegungen und Krustendeformationen wie oben erwähnt von großer Bedeutung für die Realisierung und Überwachung eines Referenzsystems. Gleichzeitig sind die Ergebnisse zur Kinematik der globalen Netze wichtige Informationen für die Erforschung der Deformation der Erde als Folge der Wechselwirkung der verschiedenen geodynamischen Prozesse. Die Bewegungen von Punkten der Erdoberfläche können sehr unterschiedliche Ursachen haben. In erster Linie sind zu nennen globale Plattentektonik, andere regionale oder lokale tektonische Erscheinungen, seismische Ereignisse. Erdgezeiten und Belastungsdeformationen durch großräumige postglaziale Entlastungseffekte, Meeresgezeiten, Grundwasser- und Luftdruckschwankungen sowie sonstige Massenbewegungen auf der Erdoberfläche und im Erdinnern. Die Trennung der einzelnen Anteile ist schwierig, sie kann nur in interdisziplinärer geowissenschaftlicher Kooperation erfolgen. Ein wichtiger Schlüssel ist dabei der zeitliche Ablauf der einzelnen Phänomene, der sich von säkular bis kurzperiodisch (Stunden) erstreckt.

Insbesondere ist das Modell der plattentektonischen Erdkrustenverschiebungen in den letzen Jahren immer weiter verfeinert und mit geologisch-geophysikalischen Hypothesen und Erkenntnissen verglichen worden. Dabei hat sich gezeigt, dass die über große Zeiträume geltenden geotektonischen Bewegungsmodelle im Allgemeinen recht gut mit den aus globalen kosmisch-geodätischen Messungen erhaltenen gegenwärtigen Bewegungen übereinstimmen. Der Nachweis der Punktbewegungen gelingt heute für die großräumigen bis globalen Erscheinungen mit einer Genauigkeit von etwa \pm 1 mm/a bis \pm 0,1 mm/a. Die Zeitcharakteristik kann bis in den Tagesbereich aufgelöst werden. Bei entsprechendem Aufwand (Punktdichte) erreicht man diese Genauigkeit auch für regionale oder lokale Effekte.

Das globale Bewegungsbild für die Stationen des ITRF2005 ist in ([1], [13]) auch graphisch dargestellt. Die Richtung der Bewegung ist durch die Pfeilrichtung angegeben, die Bewegungsgeschwindigkeit (cm/a) wird durch die Länge der Pfeile symbolisiert. Neben den Kontinenten sind auch die Grenzen der großen tektonischen Platten eingezeichnet. Die Bewegungsgeschwindigkeiten der einzelnen Punkte liegen zwischen 1 cm/a und über 10 cm/a; sie lassen die globale Schollenstruktur deutlich sichtbar werden. Auch die Bewegungsrichtungen der Punkte einer Platte sind weitgehend gleich. Neben der weitgehenden Übereinstimmung der Geschwindigkeiten und Richtungen der Bewegungen mit den geologisch-geophysikalischen Model-

len für geologische Zeiträume gibt es auch viele Diskrepanzen, die für weitere Untersuchungen besonders interessant sind. An den Rändern der großen tektonischen Platten, insbesondere in Kompressionszonen, ist das Bewegungsbild durch die vielen Mikroplatten sehr komplex. In derartigen Gebieten (z.B. Mittelmeer, Südostasien, Anden, Karibik) wurden zusätzliche Verdichtungen im Rahmen spezieller Kampagnen geschaffen, um das Bewegungsverhalten detaillierter zu erfassen. Die komplexe Interpretation des globalen und regionalen Bewegungsbildes führt zu weiteren Erkenntnissen über die Wechselwirkung der verschiedenen geodynamischen Phänomene. Diese neuen Erkenntnisse können neben dem wissenschaftlichen Aspekt in unterschiedlicher Weise genutzt werden. So erlauben sie u.a. Gefahrengebiete einzuschätzen und zu dem Langzeitziel Erdbebenprognose beizutragen.

2.3 Zu weiteren geodynamischen Parametern

Die Kombination der verschiedenen kosmisch-geodätischen Verfahren erlaubt Subzentimetergenauigkeit für Phänomene globalen bis lokalen Ausmaßes. Damit ist eine Vielzahl von Erscheinungen erstmals nachweisbar: andere können im Vergleich zu den klassischen Verfahren mit wesentlich höherer Präzision bestimmt werden. Mit der höheren Genauigkeit ist auch eine wesentlich höhere zeitliche und/oder räumliche Auflösung für die einzelnen Phänomene verbunden. Der Nachweis dieser Phänomene ist eine wesentliche Grundlage für weitergehende geowissenschaftliche Untersuchungen zur Struktur und Dynamik des Erdkörpers und seiner Bewegungen im Raum. Die Interpretation und Trennung der einzelnen Anteile kann umso besser erfolgen, je mehr Informationen zur Verfügung stehen. In diesem Sinne wird das auf der IUGG-Generalversammlung 2003 beschlossene Netz komplexer Stationen (neben den kosmisch-geodätischen Messverfahren zusätzliche geophysikalische und geologische Messungen an den gleichen Stationen) mit der Bezeichnung Integrated Global Observing System (IGOS) weitere Fortschritte bringen. Der durch die IAG formulierte geodätische Beitrag, das Global Geodetic Observing System (GGOS), konzentriert sich auf die fundamentalen Größen Erdoberfläche, Gravitationsfeld und Erdrotation sowie deren Änderungen [14].

Geozentrum: Das Geozentrum ist physikalisch definiert als das Massenzentrum der Erde, einschließlich Ozean und Atmosphäre. Änderungen der Massenverteilung in und auf der Erde bewirken somit auch Änderungen des Geozentrums. Das Geozentrum ist auch das dynamische Zentrum der Satellitenbewegungen (ein Brennpunkt der oskulierenden Kepler-Ellipse) und kann

insofern aus der Bahnanalyse im geometrischen Sinne als Ursprung des geozentrischen Koordinatensystems abgeleitet werden. Der präzise Nachweis des Geozentrums gelingt nur durch diese Satellitenmethoden. Die ersten Analysen zeigten u.a. Jahres- und Halbjahreswellen mit Amplituden von einigen Millimetern [6]. Mit der Realisierung von ITRF2005 wurden insbesondere die seit 1993 vorliegenden SLR-Daten analysiert und durch GPS-Auswertungen ergänzt ([1], [10], [13]). Gegenüber der Lage im ITRF2005 zeigten sich dabei Schwankungen des Geozentrums von bis zu ± 10 mm für die x- und y-Komponente und bis ± 20 mm für die z-Komponente. Ausgeprägt sind Jahreswellen mit Amplituden von 2 bis 4 mm für x und v und 3 bis 5 mm für die z-Komponente. Die Unsicherheiten liegen bei ± 0.5 mm für die x- und y-Komponente und betragen etwa ± 1 mm für die z-Komponente. Weiterhin sind saisonale Variationen erkennbar. Mit Wochenlösungen für SLR können diese genauer untersucht werden. Eine Herausforderung für die Zukunft stellen Untersuchungen säkularer Effekte dar. Sie deuten sich im Submillimeterbereich für die x- und v-Komponente sowie im Millimeterbereich für die z-Komponente an (Tab. 1). Interpretationen ([1], [10]) offenbaren Zusammenhänge mit Belastungsdeformationen, insbesondere durch Ozeangezeiten, mit jahreszeitlichen Massenverschiebungen, mit klimatischen und anderen Massentransporten sowie auch mit dem Maßstab.

Maßstab und GM (Gravitationskonstante G mal Erdmasse M): Der Maßstab von Satellitennetzen wird abgesehen von Messfehlern gemeinsam von GM (Maßstab der Bahnbestimmung der Satelliten) und der Lichtgeschwindigkeit (Maßstab bei den Messungen) bestimmt. Aus Genauigkeitsgründen werden hier für die Satellitennetze SLR-Messungen benutzt. Demgegenüber ist das globale VLBI-Netz unabhängig von GM; hier wird der Maßstab abgesehen von Mess- oder Modellfehlern nur durch die Lichtgeschwindigkeit festgelegt. Da die Lichtgeschwindigkeit als physikalische Konstante eingeführt wird, ist das aus Bahnanalysen unter Nutzung von SLR-Daten abgeleitete GM von entscheidender Bedeutung. Der aus VLBI-Analysen auf völlig unterschiedliche Weise (unabhängig von GM) mit vergleichbar hoher Präzision bestimmte Maßstab kann so hervorragend zur unabhängigen Ergänzung und Kontrolle eingesetzt werden (Redundanz). GM als Hauptglied der Gravitationsfeldentwicklung der Erde ist nicht nur aus Bahnanalysen von Erdsatelliten ableitbar, sondern zusätzlich auch aus Bahnen von Raumsonden bestimmbar. Dadurch ist eine weitere Kontrollmöglichkeit gegeben. Die Genauigkeit von GM liegt heute insgesamt bei besser als 10⁻⁹. Es sei erwähnt, dass die Gravi-

tationskonstante selbst als physikalische Grundgröße nur mit einer Genauigkeit von etwa 10⁻⁵ nachgewiesen wurde.

Der Vergleich der neueren ITRF – Lösungen (Tab. 1) zeigt eine Maßstabsgenauigkeit von etwa 0,5*10⁻⁹; das entspricht einer Positionsgenauigkeit auf der Erdoberfläche von etwa ± 3 mm. Die zeitliche Änderung zwischen den neueren ITRF-Lösungen liegt unter 10⁻¹⁰ und ist noch nicht signifikant. Die beiden hier eingesetzten Verfahren VLBI und SLR zeigen derzeit geringfügige Diskrepanzen ([1], [9]) im Bereich von 10⁻⁹, deren Ursachen in verschiedenen Messfehlern gesucht werden (Atmosphäre, Mess-Bias, Restfehler bei der relativistischen Modellierung einer oder beider Methoden). Detaillierte Untersuchungen verschiedener Lösungen deuten auf zeitliche Variationen im Bereich von etwa 5 mm hin, teilweise mit saisonalem Charakter ([1], [2], [9]). Auch Korrelationen mit den Variationen des Geozentrums sind erkennbar.

Erdorientierungsparameter (EOP): Die Erdorientierungsparameter (EOP), auch als Erdrotationsparameter (ERP) bezeichnet, bestehen, wie bereits oben erwähnt, aus den Polbewegungen und den Erdrotationsschwankungen bzw. der rotationsgebundenen Zeit. Sie variieren infolge der verschiedenen geodynamischen Phänomene, die sowohl das Trägheitsmoment der Erde (Umverteilung von Massen) als auch den Drehimpuls (Gezeitenreibung, zonale Winde, Ozeanströmungen, Dynamik des inneren Erdkerns) ständig verändern.

Die Polkoordinaten x_p und y_p sind die Koordinaten des Celestial Ephemeris Pole (CEP) relativ zu dem IERS Reference Pole (IRP). Der CEP unterscheidet sich von dem augenblicklichen Pol der Rotationsachse der Erde durch quasi tägliche Schwankungen mit Amplituden unter 0,01 Bogensekunden. Gemessen werden die Polkoordinaten in einer Tangentialebene am Pol, x_p positiv in Richtung des IERS-Referenzmeridians (λ = 0°) und y_p positiv in Richtung des Meridians λ = 90° West.

Bei der Analyse der rotationsgebundenen Zeit wird die Abweichung der Universalzeit (Universal Time UT1) von 24 Stunden betrachtet und als Länge des Tages (Length of Day – LOD) bezeichnet.

Sowohl die Polkoordinaten als auch die Geschwindigkeit der Erdrotation sind infolge der geodynamischen Effekte vielfältigen Schwankungen unterworfen. Die Bewegungen der Erdrotationsachse relativ zur Kruste erreichen Amplituden von etwa 10 m; das Periodenspektrum erstreckt sich von Subtagesperioden bis zu säkularen Bewegungen. Besonders hervorzuheben sind drei Bereiche, die freie Schwingung mit einer Periode von etwa 435 Tagen

(Chandler-Periode), die erzwungenen jahreszeitlichen Schwingungen und ein säkularer Trend. Die Chandler-Welle ist variabel sowohl bezüglich der Periodenlänge (im Bereich mehrerer Tage) als auch der Amplitude. Die veränderliche Amplitude schwankt zwischen 3 m und 8 m. Die ebenfalls veränderlichen jahreszeitlichen Schwingungen (insbesondere Jahreswelle und Halbjahreswelle) werden vor allem verursacht durch jahreszeitliche Massenverschiebungen in der Atmosphäre und Hydrosphäre. Ihre Amplituden variieren im Bereich von 2 m bis 3 m für die Jahreswelle und bei 0,3 m für die Halbjahreswelle. Die säkularen Bewegungen erfolgen etwa in Richtung des Meridians 80° West mit einer Rate von etwa 1 dm/a; sie sind dabei aber irregulär. Erwähnt werden sollen weiterhin die Variationen mit Tages- und Halbtagesperiode, die durch Gezeiten hervorgerufen werden. Ihre Amplituden liegen aber nur im Bereich von (oder unter) Millibogensekunden bzw. von einigen Zentimetern.

Insgesamt gelingt heute mit Hilfe der kosmisch-geodätischen Verfahren der Nachweis der Polbewegungen mit einer Genauigkeit von besser als \pm 5 mm bei einer zeitlichen Auflösung von besser als 1 Tag. Das entspricht in der Genauigkeit gegenüber den klassischen astronomischen Verfahren einer Steigerung um den Faktor 1000 für die Amplituden und um den Faktor 10 bis 100 für die zeitliche Auflösung.

Auch die Variationen in der Tageslänge LOD sind sehr komplex und teilweise irregulär. Die Einflüsse von Massenverschiebungen im Erdinnern, insbesondere des flüssigen Erdkerns, sowie Klimaschwankungen erzeugen langsame bis trendartige Variationen, atmosphärische Einflüsse verursachen saisonale Oszillationen und Gezeiten bewirken eine Vielzahl kurz- und langperiodischer Wellen. Irreguläre Erscheinungen wie der Einfluss des El Nino konnten auch bereits nachgewiesen werden. Die Amplituden der einzelnen Erscheinungen betragen bis mehrere Millisekunden (ms).

Der Nachweis der Rotationsschwankungen der Erde in Form der Tageslänge LOD erreicht heute eine Genauigkeit von \pm 0,01 ms bis \pm 0,03 ms. Gemeinsam mit der hohen zeitlichen Auflösung können damit mehr und mehr die verschiedenen Effekte getrennt werden.

Die gemeinsame Interpretation beider Erscheinungen, der Polbewegungen und Rotationsschwankungen, ermöglicht weitere Erkenntnisse über ihre Ursachen sowie über die komplexe Wechselwirkung der verschiedenen geodynamischen Phänomene.

3. Schlussbemerkungen

In den letzten 50 Jahren konnte die Genauigkeit für die Bestimmung großräumiger geodätischer Netze um den Faktor 1000 erhöht werden. Das führte auch zu einem enormen Erkenntnisfortschritt über den Status und die Dynamik des Systems Erde. In erster Linie betrifft das die Größe und Figur der Erde, einschließlich Gravitationsfeld und Geoid, das globale Referenzsystem als Basis für alle Vermessungen sowie die Deformation des Erdkörpers und eine Vielzahl geodynamischer Effekte und deren Wechselwirkung. Möglich wurde der Fortschritt in erster Linie durch die völlig neuen Methoden der Satelliten- bzw. Raumgeodäsie unter Nutzung der künstlichen Erdsatelliten und der in dieser Zeit entdeckten Quasare. Darüber hinaus haben neuartige technische Entwicklungen wie die Erfindung des Laserprinzips und die Fortschritte bei der Nutzung der Mikrowellentechnik zu diesem Entwicklungssprung beigetragen.

Die neuen erweiterten Potentiale der Geodäsie sind nicht nur für den Erkenntnisfortschritt von großer Bedeutung, sondern sie haben auch für die Praxis des Vermessungswesens neue Möglichkeiten geschaffen. Das präzise globale Referenzsystem steht für alle Länder zur Verfügung und liefert somit ein einheitliches System für alle Vermessungen. In Europa ist durch die Einführung des Europäischen Terrestrischen Referenzsystems ETRS-89 ein wichtiger Schritt in dieser Richtung unternommen worden. Die Vereinheitlichung der geodätischen Grundlagen ermöglicht auch erweiterte Anwendung der Geodäsie z.B. bei der grenzüberschreitenden Navigation oder dem Aufbau großräumiger Geo-Informationssysteme (GIS).

Literatur

- [1] Altamimi, Z. et al.: Long term stability of the ITRF origin and scale. Paper EGU General Assembly. Vienna 2007
- [2] Bianco, G.; Luceri, V.: Devoti, R.: ITRF2005: Evaluation and its consistency. Paper EGU General Assembly. Vienna 2007
- [3] Capitaine, N. et al. (Eds.): Proceedings of the IERS Workshop on the implementation of the new IAU Resolutions. IERS Technical Notes No. 29. Frankfurt/M, 2002, 134 S.
- [4] Gambis, D.: Earth orientation monitoring using various techniques. Proc. Colloqu. IAU 178. Cagliary (Italy), 2000
- [5] McCarthy, D.D.; Petit, G. (Eds.): IERS Conventions 2003. Verlag BKG, Frankfurt/M., 2004, 127 S.

- [6] Montag, H.: Geocenter motions derived by different satellite methods. IERS Technical Notes No. 25. Paris, 1999, S. 71–76
- [7] Montag, H.: Zu relativistischen Effekten in der Satelliten- bzw. Raumgeodäsie. Sitzungsberichte d. Leibniz-Sozietät. Berlin, Bd. 78/79 (2005), S. 275–288
- [8] Montag, H.; Gendt, G.; Wilson, P.: On the determination of the terrestrial reference frame by SLR and GPS techniques. J. Geodynamics, Vol. 22, 1/2, 1996, S. 63–77
- [9] Ries, J. C.: Satellite laser ranging and the terrestrial reference frame; principal sources of uncertainty in the determination of the scale. Paper EGU General Assembly. Vienna 2007
- [10]Wu, X. et al.: Geocenter motion and reference frame Geophysical and geodetic perspectives. Paper EGU General Assembly. Vienna 2007
- [12]IERS Annual Reports. Herausgeber: Central Bureau des IERS, jährlich.
- [11]IERS Homepage unter http://www.iers.org/
- [13]ITRF im Internet unter http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF solutions/2005/ITRF2005.php
- [14] International Association of Geodesy, Internet unter http://www.iag-aig.org/

Thomas von Larcher, Birgit Futterer, Christoph Egbers

The GeoFlow-Experiment on International Space Station (ISS): Research on Thermal Convective Flows in a Spherical Gap under influence of a Central Force Field

1. Introduction and Previous Works

Research on thermal convection in spherical gap flows is a suitable model in geophysical fluid dynamics. Instabilities provide details for understanding large scale geophysical flows as e.g. convective phenomena in Earth's outer core.

Yavorskaya et al. (1) discussed the fluid flow analogy of spherical gap flow model in atmospheric motion and convection in core regions of gasous planets in theory. Microgravity research on convective flow stability in a spherical shell system was realised by Hart et al. who did experiments on board a NASA Space Shuttle in 1985 and in a reflight campaign in 1995 (cf. (2) and (3)). The experiment set-up consisted of a rotating hemispherical shell system with the possibility to apply a radial as well as a latitudinal temperature gradient, i.e. Equator-to-Pole temperature difference. Gravity was modelled by imposing a central electric field. The observed flow pattern was visualised by applying Schlieren technique and the experimental results were compared with 3D nonlinear simulations.

Use of central force fields as artifical gravity is in geophysical analogy regarding for example Earth's outer core as discussed by Früh (4) and also by Beltrame (5) who concluded that the essential character of the flow is captured even if the power law of artifical gravity due to central force field does not agree with acceleration due to gravity in earth.

The GeoFlow experiment focus on thermal-driven flows influenced by a central force field in a rotating full spherical gap model. Regarding fluid dynamics, the aim is to investigate the stability of flow states, pattern formation and transition to turbulence in viscous incompressible fluids. But research in spherical gap flows is also of interest in technical applications as understand-

ing and controlling of such flows can be useful for e.g. pump systems, etc. As the central force field is realised by an electro-hydrodynamic force, in particular the dielectrophoretic effect, the study can also bring some new results in electro-viscous phenomena and in fluid transport applications.



Fig. 1: Chart of the location of the scientific team members as space industry involved in the project (EADS Astrium, Friedrichshafen, Germany; MARS, Naples, Italy; E-USOC, Madrid, Spain) and the Space Agencies which fund the project (ESA, Noordwijk, The Netherlands; DLR, Bonn, Germany).

To eliminate the unidirectional acceleration due to gravity on earth, these long-time experiments require microgravity environment. GeoFlow therefore is going to take place in the Fluid Science Laboratory (*FSL*) of Columbus Orbital Facility (*COF*). Launch of the GeoFlow Experiment Container and *COF* is scheduled to 6th December 2007. Experimental research can probably started in early January 2008 after comissioning of *COF* and *FSL*.

The overall preparatory research program comprises work packages as development of hard- and software as well as preparative experimental and numerical investigations. While experiments are performed using the Science

Reference Model in the laboratory at BTU Cottbus and also in the laboratories of industrial partners, the experiment hardware is built and verified by industry. Numerical investigations and bifurcation analysis are performed by European research groups from France, United Kingdom and Germany which are members of the GeoFlow Topical Team (cf. fig. 1). These studies focus on preparation of the experiment design and on the observable parameter space by flow states simulations and on linear stability analysis and bifurcation analysis (cf. (6) - (12)).

2. Experiment Preparation

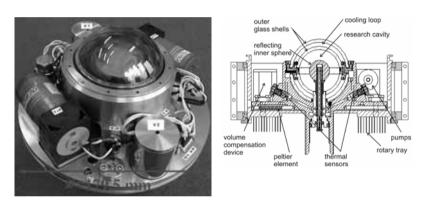


Fig. 2: Sketch of the experimental set-up (left) and Science Reference Model (right).

The set-up consists of an inner sphere made and two outer glass shells. Silicone oil is used as working fluid. In the research cavity a temperature difference is realised by heating the interior sphere and cooling the fluid in the outer gap between the outer glass shells using temperature-controlled fluid circuits filled also with silicone oil. The experiment cell is mounted on a rotating tray which allows for solid body rotation (cf. fig. 2). A central force field which acts on the experiment fluid is generated by applying an alternating high voltage field, $V_{\rm rms}$, between the inner sphere and the inner glass shell.

While the Coulomb force does not affect the fluid due to high frequency alternation, the dielectrophoretic effect results in central force field and acts as ponderomotive force due to the geometrically inhomogenous electrical field. Table 1 shows geometric and dynamic parameters of the model as physical properties of the working fluid.

a) geometric dimensions of the research cavity					
Inner radius r_i	13.5 mm				
Outer radius r_o	27.0 mm				
Gap width r_i - r_o	13.5 mm				
Radius ratio $\eta = r_i/r_o$					
b) variable experiment parameter					
Rotation rate Ω	0-2 Hz				
High voltage $V_{\rm rms}$	0-10 kV				
Temperature difference ΔT	0-10 K				
c) physical properties of the working fluid					
Туре	Silicone oil				
Density ρ	0.92 g/cm^3				
Kinematic viscosity v	5*10 ⁻⁶ m^2/s				
Thermal conductivity λ	0.116 <i>W/(K*m)</i>				
Thermal Diffusivity κ	$7.735*10^{-8} m^2/s$				
Cubic exp coeff α	108*10 ⁻⁵ 1/K				
Dielectric Constant $\varepsilon_{\rm r}$	2.7				
Therm. Coeff. of ϵ_r	1.07*10 ⁻³ 1/K				
d) dimensionless parameters					
Taylor number <i>Ta</i>	$Ta \le 1.3*10^7$				
Central Rayleigh number Ra _{central}	$Ra_{\text{central}} \le 1.4*10^5$				
Prandtl number <i>Pr</i>	Pr = 64.64				

Tab. 1: Experiment parameters

Regarding dimensionless parameters, the Taylor number Ta is proportional to the rotation rate Ω , $Ta\sim\Omega^2$. While in natural convection phenomena (i.e. in GeoFlow case $V_{\rm rms}=0~kV$) the Rayleigh number Ra often denotes the temperature difference, in GeoFlow this parameter is called the central Rayleigh number $Ra_{\rm central}$ which is proportional not only to the temperature difference ΔT but also to the acceleration due to central force field, g_E , $Ra_{\rm central}\sim(\Delta T^*g_E)$. As g_E is proportional to $((V_{\rm rms})^2*_{\Gamma}^{-5})$, it follows that $Ra_{\rm central}\sim(\Delta T^*g_E)$.

 $_{\rm tral}$ ~ $(\Delta T^*(V_{\rm rms})^2*{\rm r}^{-5})$. While acceleration due to gravity is approx. 10 m/s^2 on earth's surface, the largest value of acceleration due to high voltage field is approx. $10^{-1}~m/s^2$ at $_{\rm r=r_0}$, $_{\rm r_0}$ as outer radius of the research cavity, and $V_{\rm rms}=10~kV$. Table 1 shows values of Ta and $Ra_{\rm central}$, resp. The Prandtl number Pr reflects physical properties of the working fluid, $Pr=v/\kappa$. The Rayleigh number Ra is used here only when natural convection phenomena are investigated in preparatory work.

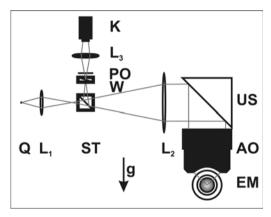


Fig. 3: Sketch of the WSI set-up at BTU-Laboratory. Q=Laser, L=Lens, ST=Beam Separation, US=90° mirror, AO=Adaption Optics, EM=Science Reference Model, W=Wollaston prism, PO=Polarisator, K=CCD Camera, g=gravity vector.

Since tracer particles are not suitable due to the application of a high voltage field, measurements of the flow field are done using the Wollaston-Shearing-Interferometry (WSI). Schlieren technique and Shadowgraphy is implemented within FSL and can be an option for GeoFlow. Due to Experiment constraints, measurement techniques are used in reflection mode. The inner sphere of the set-up is prepared to act as a mirror. Figure 3 shows a sketch of the WSI set-up at BTU laboratory used for preparatory experimental works.

The WSI method principally detects refractive index gradients and is therefore sensitive to density gradients caused by temperature differences in the GeoFlow experiment. Optical path length variations results in interference phenomena which are directly photographed by a CCD camera. Figure 4 shows WSI images from ground test sequences at industrial lab taken at different parameter points. Note the complicated interferogram structures at large Taylor numbers.

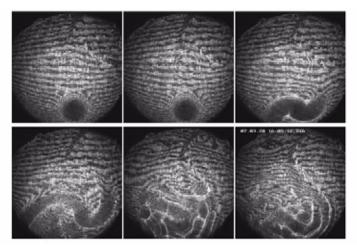


Fig. 4: Natural Convection (V_{rms} =0 kV). WSI images taken at constant Rayleigh number Ra=4.31*10⁶ and different Taylor numbers. From top left to down right: Ta=0, Ta=8.6*10², Ta=1.3*10⁵, Ta=5.4*10⁵, Ta=1.1*10⁷, Ta=1.3*10⁷.

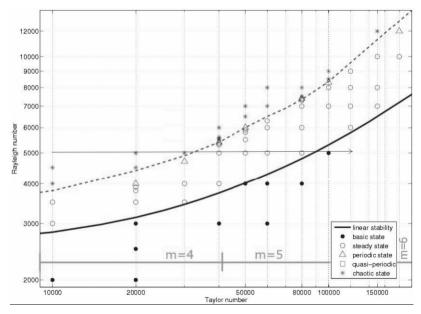


Fig. 5: Stability diagram calculated from numerical simulations (cf. (6)).

Since the WSI delivers images of interference pattern, the goal of the WSI data analysis is to get informations about the temperature field, that corresponds to the flow field, and its time-dependent behaviour. This is part of the experimental and numerical preparatory work within GeoFlow which is discussed below.

Numerical simulations using a pseudospectral method by Hollerbach (13) including linear stability analysis are performed in the experiment preparation phase to design the experimental set-up, in particular the geometric parameters of the gap, and to predict the experiment scenario. Figure 5 shows an overview of numerical solutions of flow states which occur by varying Ra and Ta, resp. The solid line is calculated by linear stability analysis, the dashed line denotes the transition from time-dependent stable solutions to irregular flows. In addition, regions of most stable mode m are shown.

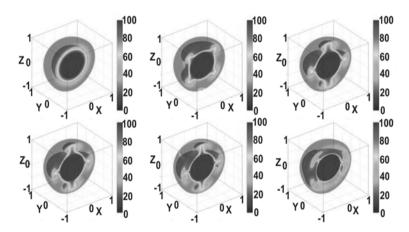


Fig. 6: Temperature field visualized in hemispherical shells, scaled to 100%, calculated for η =0.5, Pr=64.64, Ta=0 and different central Rayleigh number. From top left to down right: Racentral= $2*10^3$ (conductive state), $Ra_{central}$ = $5*10^3$, $Ra_{central}$ = $8*10^3$, $Ra_{central}$ = $1*10^4$, $Ra_{central}$ =1

A special focus in the 3D simulation is on the calculation of flow states including flow field and temperature field at selected parameter points of the defined experiment flow plan to support the experimental data analysis (cf. fig. 6). Furthermore, construction of artifical interferograms from the calculated temperature fields is necessary for evaluation and interpretation of experiment data (see below).

3. Experiment Operation

The developed experiment flow plan based in part on numerical predictions in other parts on experiences by the science teams. Since the high voltage will be set-up to a constant value of $10 \, kV$, free parameters are the temperature difference ($Ra_{\rm central}$) and the rotation rate (Ta). The expected experiment duration time of several weeks allows for a high resolution parameter scan.

To investigate the dependence of solutions on initial conditions, i.e. flow patterns at given parameter values, some experiment sequences started e.g. with a sudden temperature difference while others increase ΔT smoothly. Main part of the first experiment run is the investigation of flow patterns at rotation rate 0, i.e. varying only the temperature difference without rotation. After this, superposition of rotation will be set-up.

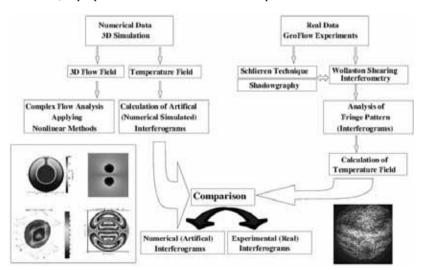


Fig. 7: Numerical and experimental data anlysis. Verification of experimental data by analysis and comparison with numerical data.

A quantitative analysis of experiment data will need the support of numerical simulations. Figure 7 shows the way of data processing and evaluation and interpretation, resp. The simulation of 3D temperature fields which are then used for construction of artifical interferograms (forward modelling, left hand side) allows for a comparison with experimental interferograms. On the other hand, calculation of integrated 2D temperature fields based on experimental interferogram data (inverse modelling, right hand side) allows for comparison

with numerical calculated temperature fields. By using both data sets in a useful manner, the observed flow pattern can be analysed in detail. Also the numerical simulations can be verified with experimental data. In addition, applying nonlinear methods on calculated 3D flow field data allows for a detailed analysis of complex flows in particular.

The analysis procedures are realised by the scientific teams and the two ways of data analysis are tested successfully, especially the inverse modelling method is verified by using ground test data which are measured in scientific test campaigns. Figure 8 shows an example for forward modelling. The calculated flow pattern is a steady state in case of natural convection, i.e. $V_{\rm rms}$ =0 kV.

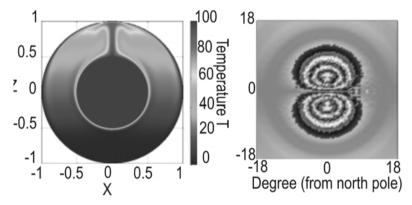


Fig. 8: Forward Modelling. Parameters: $Ra=8.09*10^6$, Ta=0 ($\Delta T=15.0$ K, $\Omega=0$ Hz, $V_{rms}=0$ kV).

Summary

We presented an overview of the status of experimental and numerical preparatory work and the way of data analysis within the GeoFlow project.

The experiment flow plan, that is developed with the support of linear stability analysis as well as on basis of 3D numerical simulations which confirm the stability analysis, allows for high resolution parameter scan.

The experiment data will be analysed using mathematical tools and also by comparing numerical simulations which are extended to calculation of artifical interferograms.

Recent NASA/ESA project status is to launch the Columbus Orbital Facility on 6th December 2007 with NASA Space Shuttle 'Atlantis'. On board this flight the GeoFlow experiment container will be brought to *ISS* too. After comissioning of *COF* and the Fluid Science Laboratory (*FSL*) where Geo-

Flow will take place the experiment can be started, that is scheduled to early January 2008.

Outlook

While the first GeoFlow campaign will probably be done in the first months of 2008, reflight campaigns are under discussion yet. Here, different possible scenarios are in the loop as variation of experiment fluid's viscosity, variation of gap width and change of geometry, i.e. use of a cylindrical gap instead of a spherical one. With this, technical applications could be explored.

Acknowledgement

The GeoFlow project is funded by *ESA* (grant no. AO-99-049) and by German Aerospace Center *DLR* (grant no. 50 WM 0122). The authors would also like to thank *ESA* for funding the GeoFlow Topical Team (grant no. 18950/05/NL/VJ). The scientists also thank the industry involved for support, namely Astrium GmbH, Friedrichshafen, Germany and the User Support Center MARS, Naples, Italy and E-USOC, Madrid, Spain.

References

- [1] Yavorskaya, I.M., Fomina, N.I. and Belyaev, Y.N., Acta Astronautica 11, 1984.
- [2] Hart, J.E., Glatzmeier, G.G. and Toomre, J., J. Fluid Mech. 173, 1986.
- [3] Hart, J.E. et al., NASA-TP-1999-209-576, 1999
- [4] Früh, W.-G., Nonlin. Proc. in Geophys., 12, 2005
- [5] Beltrame, P., Travnikov, V., Gellert, M. and Egbers, Ch., Nonlin. Proc. in Geophys., 13, 2006.
- [6] Gellert, M., Beltrame, P. and Egbers, Ch.,
- [7] Futterer, B., Gellert, M., von Larcher, Th. and Egbers, C., *Acta Astronautica*, 2007 (in review).
- [8] Beltrame, P. and Egbers, C., Proc. Appl. Math. Mech., 4, 2004.
- [9] Beltrame, P., Egbers, C. and Hollerbach, R., Advances in Space Research, 32, 2003.
- [10]Travnikov, V., Egbers, C. and Hollerbach, R., Advances in Space Research, 32, 2003
- [11] Egbers, C., Beyer, W., Bonhage, A., Hollerbach, R. and Beltrame, P., Advances in Space Research, 32, 2003.
- [12] Futterer, B., Brucks, A., Hollerbach, R. and Egbers, Ch., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 50 2007.
- [13] Hollerbach, R., Int. J. Numer. Meth. Fluids, 32, 2000.

50 Jahre Raumfahrt – 104 Jahre Raumfahrtwissenschaft

Unser Kolloquium ist dem 50. Jahrestag des Beginns der kosmischen Ära (der Ära der praktischen Raumfahrt) gewidmet. Vor wenigen Jahren (2003) hatten Luft- und Raumfahrt ein Doppeljubiläum: den 100. Jahrestag des ersten Motorflugs der Brüder Orville und Wilbur Wright am 17. Dezember 1903 sowie ein Jahrhundert Raumfahrtwissenschaft. Flogen die Wright-Brüder 852 foot (260 m) weit, so Ziolkowski über die Atmosphäre der Erde und auch die Grenzen des Sonnensystems hinaus – die Wrights allerdings real, Ziolkowski in der Theorie.

Allerdings bedeutet dieses Doppel keine Arbeitsteilung – zumindest nicht für *Ziolkowski*. Luft- und Raumfahrt sind in der Entwicklung seiner Gedankenwelt eng verbunden.

Der Flug in den Kosmos - Mythos und Wissenschaft

Im Mai-Heft 1903 der "Wissenschaftlichen Umschau" erschien in Sankt Petersburg der Artikel "Die Erforschung der Weltenräume mit Rückstoßgeräten" (vgl. Bild 1).

Darin erfolgte die wissenschaftliche Begründung der Raumfahrt. K. E. Ziolkowski legte die Grundgedanken der Raketendynamik dar und führte den Nachweis, daß es prinzipiell möglich ist, mittels Raketen kosmische Geschwindigkeiten zu erreichen und damit auch den Aufstieg des Menschen in den kosmischen Raum zu vollziehen.

Die Idee der kosmischen Geschwindigkeit finden wir in I. Newtons Arbeit "Über das Weltsystem" veranschaulicht (vgl. Bild 2).



Bild 1: Titelblatt der Zeitschrift "Wissenschaftliche Umschau", Mai 1903

Ein von einem Berg horizontal geworfener Stein fällt nach einer bestimmten Zeit zu Boden. Je größer die Abwurfgeschwindigkeit ist, desto weiter fliegt er. Es gibt nun eine Geschwindigkeit, bei der der Stein nicht mehr auf die Erde zurückfällt. Der geworfene Körper "fällt um die Erde herum", umkreist sie als Satellit (künstlicher Satellit oder Mond). Besagte Geschwindigkeit ist die "1. kosmische Geschwindigkeit" (7,9 km/s). Zum Erreichen einer Ellipsenbahn um die Sonne muß ein Körper die "2. kosmische Geschwindigkeit" (11,2 km/s) und zum Verlassen des Sonnensystems die "3. kosmische Geschwindigkeit" (16,7 km/s) erhalten.

Phantasien über Ausflüge in himmlische Gefilde gibt es seit alten Zeiten. Denken wir an den sumerischen Mythos von Etana, dem König von Kisch (nahe Bagdad), der sich von einem Adler in den Himmel zur Göttin Ischtar tragen ließ; von dieser erbat er sich das Kraut des Gebärens, damit seine Frau ihm einen Thronfolger schenken konnte. Oder an die Sage von Dädalus und Ikarus. Die beiden wurden vom König Minos auf Kreta festgehalten. Der kunstfertige Dädalus stellte aus Federn, Bindfaden und Wachs Flügel her, mit denen er und sein Sohn sich in die Lüfte erhoben. Ikarus beherzigte nicht die

Mahnungen des Vaters, schwang sich zu weit zur Sonne empor, das Wachs seiner Flügel schmolz, sie lösten sich auf und Ikarus stürzte ins Meer.

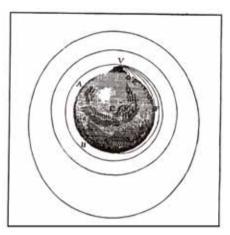


Bild 2: Zeichnung aus Isaac Newtons Arbeit "Über das Weltsystem", nach "Sir Isaac Newton's Mathematische Prinzipien der Naturlehre", hrsg. von J. Ph. Wolfers. Berlin 1872, S. 515

Es wären zu nennen die Legende vom chinesischen Mandarin Wang-Hu, der sich mit einem raketenangetriebenen Stuhl (eine Art Thron) in den Himmel erheben wollte (um 1500), Münchhausens Mondfahrt u.v.a.

Die Motive für derartige Erzählungen sind sehr unterschiedlicher Art: der Wunsch, den Göttern näher zu kommen oder dem irdischen Jammertal zu entfliehen; die irdischen Verhältnisse in eine ungewohnte Umgebung zu projizieren und sich auf diese Weise über sie lustig zu machen, den irdischen Verhältnissen eine ideale Gesellschaft gegenüberzustellen usw. "Es wäre" aber – so D. B. Herrmann – "eine grobe Simplifizierung, wenn wir behaupten wollten, die Mythen von einst wären der geistige Anstoß zu einer mehrtausendjährigen Geschichte zur Realisierung von Raumfahrt gewesen." Eine derartige Impulswirkung kann man jedoch den phantastischen Erzählungen von J. Verne und anderen utopischen Schriftstellern zuschreiben. Die Raumfahrtpioniere waren von diesen wesentlich beeinflußt, auch Ziolkowski.

Dieser war allerdings später in Verlegenheit, wenn er auszumachen versuchte, wann ihm der Gedanke vom Verlassen der Erde zuerst gekommen war: Es sei "wahrscheinlich falsch, daß die Grundideen und die Liebe zum unablässigen Streben dorthin – zur Sonne, zur Befreiung aus den Banden der

¹ D. B. Herrmann: Eroberer des Himmels. Urania-Verlag Leipzig, Jena, Berlin 1986, S. 13

Schwerkraft – beinahe bei der Geburt in mich gelegt wurden. Zumindest erinnere ich mich ausgezeichnet daran, daß mein Lieblingstraum, in der frühesten Kindheit, noch bevor ich Bücher las, in einer verworrenen Vorstellung von einer Welt ohne Schwere bestand, einer Welt, in der man sich frei nach allen Seiten und besser als die Vögel in der Luft bewegen kann. Auf welche Weise diese Wünsche in mir aufkamen, kann ich bis heute noch nicht verstehen. Märchen dieser Art gab es nicht; aber unklar glaubte ich, fühlte ich und wünschte ich mir gerade eine Welt ohne die Fesseln der Schwerkraft".²

Lange bevor Ziolkowski über begründete Ansichten darüber verfügte, wie der Mensch in den kosmischen Raum gelangen könne, erarbeitete er sich detaillierte Vorstellungen über die Bedingungen des Aufenthalts des Menschen in einer Umlaufbahn um die Erde, auf dem Mond oder im interplanetaren Raum. In Manuskripten aus den Jahren 1878 bis 1883 analysierte er die Fähigkeiten von Organismen, erhöhte Schwerebelastung auszuhalten, sowie Fragen der Bewegung im "freien Raum", d.h. in der Schwerelosigkeit. Bereits 1876 hatte er in Zentrifugenexperimenten mit Schaben und Küken die Widerstandsfähigkeit von Organismen gegenüber einem Vielfachen der Erdbeschleunigung, wie sie beim Flug von Raumschiffen – gleich welcher Art – auftreten müssen, studiert.

Ziolkowski ging die Fragen, die den Flug in den – und den Aufenthalt des Menschen im Kosmos betreffen, in ganzer Breite und sehr grundsätzlich an. So untersuchte er die Stabilität von Planetenbahnen unter Zugrundelegung des Newtonschen und anderer, von diesem abweichenden Gravitationsgesetzen. Er berechnete die kosmischen Geschwindigkeiten für die verschiedenen Körper im Sonnensystem. Er analysierte die Erscheinungen in der Schwerelosigkeit und bei nicht vorhandenem Luftwiderstand, die Wirkungsweise der mechanischen, physikalischen, chemischen und biotischen Gesetze unter diesen Bedingungen. Ausführlich ging er in den verschiedenen Perioden seines Schaffens auf die Probleme der Lebenserhaltungssysteme in Raumschiffen und außerirdischen Kolonien ein. Diese Überlegungen trieb er bis zur letzten Konsequenz voran, indem er sich vorstellte, daß im Ergebnis der weiteren biotischen Evolution sich Lebewesen herausbilden werden, die frei im kosmischen Raum leben; sie ernähren sich energetisch von der Strahlung der Sterne, vollziehen in ihrem Inneren geschlossene Kreisläufe (analog den Bi-

² K. E. Ziolkowski: Die Erforschung der Weltenräume mit Rückstoßgeräten (1911–1912), in: Ausgewählte Arbeiten. Akademieverlag der UdSSR, 1962 [Russ.], S. 167. Siehe auch "Die Schul- und Volkssternwarte Suhl pflegt das wissenschaftliche Erbe von Konstantin Eduardowitsch Ziolkowski", Suhl (o. J.), S. 8

otopen, die wir in verschlossenen Glasballons halten). Sie stellen eine Art Kombination von Tier und Pflanze dar ...

All diese Fragen griff Ziolkowski Zeit seines Leben immer wieder auf und arbeitete sie nach den verschiedensten Richtungen weiter aus. Wenn wir bei ihm Arbeiten finden wie die über Sonnenkraftwerke, Kühlsysteme für Wohnungen in heißen Wüsten, aerodynamische Züge und Luftkissenfahrzeuge u.s.w., so sind sie alle einem einheitlichen Komplex von Fragen untergeordnet – der Ergründung und Schaffung der Bedingungen für die Eroberung des kosmischen Raums durch die Menschen.

Die Rakete – der Durchbruch

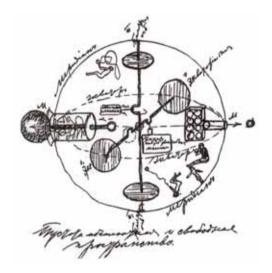


Bild 3: Skizze aus "Der freie Raum" (1883). Ausgewählte Arbeiten, 1962, S. 20

Freilich wäre all dies Fiktion geblieben, hätte man nicht das Transportmittel gefunden, das die Überwindung der Erdanziehung ermöglicht. Für die Bewegung in der Schwerelosigkeit hatte Ziolkowski bereits 1878 den Gedanken der reaktiven Bewegung ins Auge gefaßt. In der Arbeit "Der freie Raum" von 1883 "wurde endgültig die Schlußfolgerung von der Bewegung der Körper im Kosmos mittels Abgabe von Teilen ihrer Massen formuliert"³

³ T. N. Jelnina: Materialien zur Biographie K. E. Ziolkowskis. In: K. E. Ziolkowski – Forschungen zum wissenschaftlichen Erbe und Materialien zur Biographie [Russ.]. Moskau, Verlag "Nauka", 1989, S. 126

Wie man aber von der Erde in den Kosmos gelangen könne, das war Ziolkowski lange nicht klar. Er griff zunächst auf bekannte Ideen zurück – so auf Jules Vernes' gigantische Kanone. Oder er entwickelte phantastische Vorstellungen: viele Kilometer hohe Gerüste oder Türme, einen sich um den Äquator bewegenden Zug, der auf die erste kosmische Geschwindigkeit gebracht wird ...

Es gehört in das folgerichtige Vorgehen Ziolkowskis, daß er sich Schritt für Schritt mit den Mitteln zur Eroberung des Luftraums beschäftigte. Als einer der ersten schlug er ein Modell eines steuerbaren Ganzmetall-Luftschiffs vor. Das "Luftschiff vom Typ Ziolkowskis" hatte eine Besonderheit; es sollte eine zusammenlegbare Hülle besitzen. Für diese Idee der zusammenlegbaren Hülle erhielt er in vielen Staaten ein Patent. Er führte ab 1885 einen jahrzehntelangen Kampf um die Realisierung des Projekts.

Als nächstes widmete er sich der Konstruktion eines Ganzmetallflugzeuges.

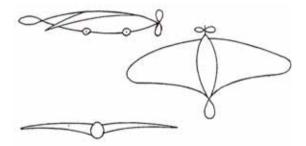


Bild 4. nach Ziolkowski: Der Aeroplan oder die vogelartige (aviatische) Flugmaschine (1894). In: Ders.: Ausgewählte Arbeiten, 1962, S.33–70; Skizze nach T. N. Jelnina

Um exaktere Vorstellungen über die Flugeigenschaften des von ihm vorgeschlagenen Apparates zu erhalten, überprüfte er experimentell den Druck, den Körper unterschiedlicher Form bei ihrer Bewegung auf ein Medium ausüben. Er widerlegte mit diesen Untersuchungen tradierte Vorstellungen. Ziolkowskis Untersuchungen zum Strömungswiderstand fanden die Anerkennung der Moskauer Akademie der Wissenschaften. Von dieser erhielt er eine gewisse finanzielle Unterstützung für diese Forschungen.

Im Jahre 1896 schlug der russische Erfinder A. P. Fjodorow einen Raketenapparat vor, mit dem die Überwindung der Erdenschwere möglich sein sollte.

Seit wann es Raketen gibt, ist umstritten.⁴ Wahrscheinlich kommen sie aus China. Sie kamen verbreitet für Feuerwerk und Illumination zum Einsatz.

Die Chinesen verwandten sie im 12. Jahrhundert auch als Kampfmittel. Indische "Kampfraketen wurden 1799 bei Seringpatam gegen die Engländer eingesetzt ... Die Truppen Tippu-Sahibs demoralisierten die englische Kavallerie restlos."⁵ Der General W. Congreve führte die Raketen in die englische Armee ein; 1807 verwüsteten seine Truppen mit 25000 Raketen (und Kanonen) Kopenhagen. ⁶ In Rußland kam es im 19. Jahrhundert zu einer intensiven Entwicklung von Kampf-Raketen. Der General K. I. Konstantinow begründete die *experimentelle Raketendynamik* und wurde zum Organisator einer modernen *Massenproduktion von Pulverraketen*. ⁷

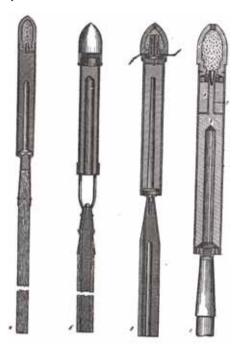


Bild 5: militärische Raketen

⁴ V. N. Sokol'ski: Grundrichtungen der Entwicklung der kosmischen Raketenwissenschaft und Technik. In: Forschungen zur Geschichte und Theorie der Entwicklung der aviatischen und kosmischen Raketenwissenschaft und Technik [Russ.], Moskau, Verlag "Nauka", 1983

⁵ A. A. Kosmodemjanski: K. E. Ziolkowski. Verlag MIR, Moskau; Teubner Verlagsgesell-schaft, Leipzig, 1979, S. 71

⁶ Das Bombardement von Kopenhagen. In: Johann Peter Hebel. Aus dem Schatzkästlein des rheinischen Hausfreundes. Verlag der Nation, Berlin, S. 83–87

⁷ A. A. Kosmodemjanski, 1979, S. 76

Im 19. Jahrhundert gab es über 30 Projekte zu reaktiven Fluggeräten. ⁸ Zum Beispiel skizzierte *N. I. Kibaltschitsch*, der wegen seiner Beteiligung am Attentat an Zar Alexander II. zum Tode verurteilt wurde, kurz vor seiner Hinrichtung eine Plattform, die durch Raketen bewegt wird.

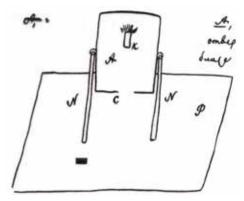


Bild 6: Kibaltschichs raketengetriebene Plattform

Jedoch hatten diese Entwürfe keinen Bezug zur Raumfahrt. Ausnahmen waren Hermann Ganswindt mit seinem "Weltenfahrzeug" – und natürlich Ziolkowski.

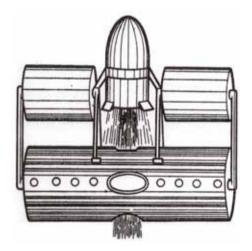


Bild 7: Ganswindts "Weltenfahrzeug"

Grundgedanken, Herangehensweise

Und nun Fjodorow: "Ein neues Prinzip der Luftfahrt, das die Atmosphäre als stützendes Medium ausschließt" (1896). Ziolkowski fand das Buch unbefriedigend, "weil keinerlei Berechnungen gegeben wurden … Aber in derartigen Fällen pflege ich die Berechnungen selbst vorzunehmen – von den Anfangsgründen an. Das war der Beginn meiner Forschungen über die Möglichkeit der Anwendung reaktiver Geräte für kosmische Reisen. – Keiner erwähnte vor mir Fjodorows Büchlein. Es gab mir nichts, aber dennoch gab es mir den Anstoß zu ernsthaften Untersuchungen, wie der (vom Baum) gefallene Apfel zur Entdeckung von Newtons Gravitation." Ziolkowskis "ernsthafte Untersuchung" bedeutete die mathematische Behandlung des Problems, deren Ergebnis die Raketengrundgleichung (1897) war. In der Diskussion der Glei-

Изавдованіе міровыхъ пространствъ реактивными пряборами.

Небольние варостаты съ автоматически наблюдающими приборами, безъ людей, до сихъ поръ поднимались только до высоты, не больmeй 20 верстъ.

Трудвость подпятія въ высоту съ помощію воздушнихъ шаровъ возрастаеть чрезвычайно быстро съ увеличеніемь этой высоты.

Подожнить, мы котимъ, чтобы авростать поднядся на высоту 27 кидометронъ и поднядът грузъ въ 1 килограмить (2.4 фунта). Воздухъ на высотъ 27 килом. ижботъ пдотность около "/ь» патинсти воздухъ при обыкновенныхъ условіяхъ (760 мм. давденія и о" Цельсія). Значить паръ на такой высотъ дожковъ замить объекь въ 50 разъ большій, тімъ виму. У уровня ме океала слідуеть внуотять въ мего ме менле 2 кубич. метронъ водорада, которые на высотъ займуть 100 куб. метронъ. При втожъ шаръ подкиметъ грузъ въ 1 килограмиъ, т. е. подниметъ вытожатическій приборъ, в самъ шаръ будетъ въсить калограмиъ мы около того.

Поверхность его оболочия, при діаметрів въ 5,8 метра, составить не менто 108 км. метровъ. Слідовительно клюдый квадратный мотръ катерін, считан и пришитую къ ней сътку, долженъ въсить 10 граммоть, ман квадо, принить будеть въсить около 1-го золотникъ.

Кв. метръ отой писчей бумаги иссить 100 гранионъ; въсъ ме кв. метра напиросной бумаги составляють гранионъ 50. Такъ что дамо пипрослая бумага будеть въ 5 разъ пиколъе той матеріи, которак должна быть употреблена на нашт авростать. Такая матерія, въ примененік къ авростату, невозможна, потому что оболочна, субланивая иль нед, будеть рвагься и сельно пропускать газъ.

Шары большихъ развіровь могуть якіть боліе толстую ободочку. Такі шара съ небывало больших ділметромъ въ 58 нетровъ

Bild 8: Erste Seite der Arbeit

⁹ Ziolkowski, Suhl, S. 9

chung zog er das physikalische, thermo-chemische und technische Wissen der Zeit heran, um herauszubekommen, ob Raketen das Mittel sind, mit denen man kosmische Geschwindigkeiten erreichen kann. 1896 bis 1898 wurden die Grundgedanken ausgearbeitet; andere Arbeiten hielten ihn zunächst von der Publikation ab. 1902 war der erste Teil des Artikels verfaßt, der im Mai 1903 erschienen wer.



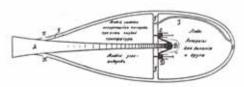
Bild 9: Titelbild von "Ziolkowski, Ausgewählte Arbeiten", 1962 (links), mit Raketengrundgleichung; Skizzen Ziolkowskis zu den Raketenschemata von 1903, 1911, 1913, 1914 (rechts)



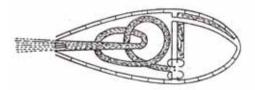
Schema der Rakett zu Artikel 1903; wurde nacht mitgedruckt. – Flüsinger Sossenioff und flüsinger Wassenstoff sind durch nine Wand gettenen. In der Spitze der Rakete ist der Plate für "Passugiere". A – Oer der Mochung der Gose und ibere Vorbessungs, B. – Aussteld steck entspanner und abgektilither Dümpfe. Das Ente A-B ist mit zine Hille versehen, durch die ein flüssigen Metall achnell zinkaliert.



Рис. 1. Схема реактивного прибора К. Э. Циолновского, 1911 г.



P и с. 2. Свема реактивного межпланетного апперата «Ракета» К. 3. Шиолковского. 1913 г.



Das Transportgerät ist also die Rakete; der Treibstoff soll aus Flüssigwasserstoff und -sauerstoff bestehen. Die Steuerung könne über Strahlruder erfolgen; das Triebwerk ließe sich durch die Treibstoffkomponenten kühlen ...

Im folgenden einige charakteristische Formulierungen, Grundideen und Punkte, die Ziolkowskis Herangehen demonstrieren:

"Allein die gewaltige Zunahme der Schwere ist übrigens völlig ausreichend, um von der Idee der Anwendung der Kanone in unserer Angelegenheit Abstand zu nehmen.

An ihrer Stelle oder anstelle des Aerostaten schlage ich als Erforscher der Atmosphäre ein Rückstoßgerät vor, d.h. eine Art Rakete, aber eine grandiose Rakete von besonderer Konstruktion. Die Idee ist nicht neu, doch ergeben die auf sie bezogenen Berechnungen derart bemerkenswerte Resultate, daß es ein großes Vergehen wäre, sie zu verschweigen.

Diese meine Arbeit betrachtet bei weitem nicht alle Seiten der Sache und bringt schon gar nicht Lösungen unter praktischem Aspekt – hinsichtlich der Durchführbarkeit; doch in ferner Zukunft sind durch den Nebel Perspektiven zu erblicken – derart verführerisch und bedeutend, daß von ihnen heute schwerlich jemand zu träumen wagt."

Als Vorteile der Rakete führt er z.B. an: ¹¹ a) Die Rakete ist im Vergleich zur gigantischen Kanone federleicht; b) sie ist relativ billig und relativ leicht zu realisieren; c) Die Größe der "relativen Schwere" (Andruck) ist durch die Stärke der Explosion regulierbar, womit – im Gegensatz zum Kanonengeschoß – Meßgeräte und Menschen befördert werden können; d) durch Regulierung des Brennprozesses ist die Erzeugung einer gewünschten Geschwindigkeit, damit auch eine sichere Landung auf einem Planeten möglich.

Ziolkowskis Herangehen:

- 1. Anfangen mit dem Grundsätzlichen, d.h. auch mit relativ einfachen, durchschaubaren Zusammenhängen, die der mathematischen Behandlung zugängig sind: Raketendynamik ohne Berücksichtigung von Gravitation und Atmosphäre (Raketengrundgleichung)
- Schrittweises Hinzuziehen weiterer Aspekte in einer auf das Prinzipielle vereinfachten Weise: Erdanziehung mit konstantem g bis über die Atmosphäre hinaus, konstanter aerodynamischer Widerstand der Atmosphäre; hierdurch eine Abschätzung "nach oben", d.h. tatsächliche Verhältnisse

¹⁰ Ziolkowski: Die Erforschung der Weltenräume mit Rückstoßgeräten (1903), in Ziolkowski, 1962. S. 139 f

¹¹ A. a. O., S. 142 f.

- sind günstiger. Wenn also bei seinen Idealisierungen die Sache klappen muß, dann noch mehr unter realistischen Voraussetzungen.
- 3. Bei jedem Punkt Abhandlung des ganzen Spektrums der Probleme, so daß sich folgendes Bild ergibt: Die Antwort auf das Grundproblem ist positiv gegeben; andererseits existiert eine Vielzahl von Problemen, die er deutlich sieht, für die er aber keine Lösung hat, zumindest keine endgültige; dafür aber eine Reihe von Vorschlägen, Vermutungen, Spekulationen ... Um die Rakete zu realisieren, bedürfe es noch des Hundertfachen von dem, was er selbst habe leisten können.

Beispiel für Punkt 3:

"Man braucht automatische Geräte, die die Bewegung der Rakete (so werden wir manchmal unser Gerät nennen) und die Stärke der Explosion nach einem zuvor festgelegten Plan steuern.

Wenn die resultierende Kraft der Explosion nicht exakt durch den Schwerpunkt des Geschosses geht, wird das Geschoß sich drehen und damit zu nichts taugen. Mathematische Genauigkeit für eine derartige Übereinstimmung zu erreichen ist jedoch völlig unmöglich, weil sowohl der Schwerpunkt infolge der Bewegung der im Geschoß befindlichen Gegenstände schwanken muß, und auch weil die Richtung der resultierenden Kräfte des Gasdrucks in der Kanone¹² nicht im Sinne mathematischer Strenge unveränderlich sein kann. In der Luft ist es noch möglich, das Geschoß mit einem Ruder – wie bei einem Vogel – zu steuern, aber was macht man im luftleeren Raum, in dem der Äther schwerlich irgendeine merkliche Stütze abgibt?

Die Sache ist die, daß bei einer möglicherweise nahe am Schwerpunkt des Geschosses verlaufenden Resultante die Drehung des Geschosses relativ langsam verläuft. Doch sobald sie beginnt, verschieben wir irgendeine Masse innerhalb des Geschosses so lange, bis die dadurch ausgelöste Verlagerung des Schwerpunkts das Geschoß zu einer Abweichung nach der entgegengesetzten Richtung veranlaßt. Indem wir also die Bewegung des Geschosses verfolgen und in seinem Innern eine kleine Masse verschieben, erreichen wir die Schwenkung des Geschosses mal in die eine, mal in die andere Richtung; insgesamt jedoch wird sich die Richtung der Wirkung der Explosionsstoffe und der Bewegung des Geschosses nicht ändern.

¹² Ziolkowski benutzt das Wort "Kanone" häufig zur Bezeichnung von Brennrohr oder Rakete

Es kann sein, daß sich die Handsteuerung des Geschosses nicht nur als schwierig, sondern als praktisch geradezu unmöglich erweist. In diesem Falle muß man zur automatischen Steuerung übergehen.

Die Gründe hierfür sind nach dem Gesagten klar.

Die Erdanziehung kann hier nicht als Grundlage für die Regulierung dienen, da im Geschoß nur die relative Schwere mit der Beschleunigung W auftritt; deren Richtung fällt mit der relativen Richtung der ausgestoßenen Explosionsstoffe zusammen, d.h. sie ist der Richtung der Resultante ihres Drucks direkt entgegengesetzt. Da sich diese aber mit der Richtungsänderung von Geschoß und Kanone (Rakete) verändert, ist diese Schwere als Orientierung für einen Regulator nicht geeignet.

Vielleicht könnte man für dieses Ziel eine Magnetnadel oder die Kraft der Sonnenstrahlen, die mit Hilfe eines bikonvexen Glases fokussiert werden, verwenden. Bei jeder Drehung des Geschosses und der Kanone verändert die kleine und helle Abbildung der Sonne ihre relative Lage im Geschoß, was zur Erregung einer Gasexpansion, von Druck, elektrischem Strom und einer Massebewegung führen kann; hierdurch wird eine bestimmte Richtung der Kanone wiederhergestellt; mit dieser kommt der helle Fleck in eine neutrale, sozusagen "unempfindlichen Stelle' des Mechanismus.

Es muß zwei automatisch bewegte Massen geben.

Als Grundlage für die Richtungsregulierung des Geschosses kann auch eine nicht sehr große Kammer mit zwei in verschiedenen Ebenen schnell rotierenden Scheiben dienen. Die Kammer ist so aufgehängt, daß ihre Lage oder – genauer – ihre Richtung nicht von der Ausrichtung der Kanone (Rakete) abhängt. Wohin sich die Kanone auch dreht, die Kammer behält kraft der Trägheit – bei Vernachlässigung der Reibung – die frühere absolute Richtung (relativ zu den Sternen) bei; diese Eigenschaft äußert sich in höchstem Maße bei schneller Rotation der Kammerscheiben.

An der Kammer angebrachte feine Federn verändern bei einer Richtungsänderung der Kanone (Rakete) ihre relative Lage; dies kann einen Zug hervorrufen und der Verschiebung der regulierenden Massen dienen.

Schließlich kann das Schwenken der Rohrmündung als Mittel zur Erhaltung einer bestimmtem Richtung des Geschosses dienen."¹³

Ein anderes bemerkenswertes Beispiel betrifft den Treibstofftyp und die Erhöhung der Ausstoßgeschwindigkeit: ¹⁴ Je kleiner die Atomgewichte, desto größer ist die bei der chemischen Verbindung frei gesetzte Energie und damit

¹³ Ziolkowski, 1962, S. 141 f.

die Geschwindigkeit der ausgestoßenen Gase. Ziolkowkis Spekulation: Wenn sich erweisen sollte, daß die Atome aus elementareren Bausteinen bestehen, dann hätten diese natürlich ein noch geringeres Gewicht. Wenn obige Feststellung auch hier gilt, müßte bei der Vereinigung zu Atomen eine noch größere Energiemenge abgegeben werden. Das ist eine spekulative Vermutung zur Fusionsenergie. – Es geht hier nicht um die Richtigkeit des Herangehens, sondern um die Art und Weise Ziolkowskischer Überlegungen.

Ziolkowski bschließt die Arbeit mit den folgenden Worten: "Wir könnten noch zahlreiche Betrachtungen anstellen: über die Arbeit der Schwerkraft, den Widerstand der Atmosphäre; wir haben auch nichts darüber gesagt, wie der Forscher über längere, ja sogar unbestimmt lange Zeit in einem Medium ohne Sauerstoff verbleiben kann; wir sprachen nicht über die Erwärmung des Geschosses beim kurzzeitigen Flug in der Luft; wir vermittelten kein allgemeines Bild des Fluges und der ihn begleitenden (theoretisch) hochinteressanten Erscheinungen; wir haben fast nichts gesagt über die großen Perspektiven im Falle der Realisierung unserer Sache, die sich uns noch nicht transparent darstellt, und letztlich hätten wir noch die kosmischen Bewegungsbahnen der Rakete im Himmelsraum darstellen können."¹⁵

Nun – über die meisten dieser Themen hat sich Ziolkowski in den folgenden 30 Jahren (z. T. auch schon vor 1903) ausgiebig geäußert.

Weiterführende Ideen

Relativ spät arbeitete Ziolkowski die Idee der Mehrstufenrakete aus. Andere – wie Hermann Oberth – propagierten diese viel früher. Ziolkowski äußerte sich erstmalig in einer Publikation von 1926 hierzu. 1929 erschienen dann die "Kosmischen Raketenzüge", in denen er die Grundlagen der mathematischen Behandlung der Mehrstufenrakete darstellt. Hierzu äußert sich W. v. Braun: "Durch ihn haben wir das mathematische Rüstzeug zum Bau mehrstufiger Trägerraketen erhalten." ¹⁶

¹⁴ Ziolkowski: Die Erforschung der Weltenräume mit Rückstoßgeräten (1903), in: Ziolkowski 1962. S. 148

¹⁵ Ebd., S. 166 f.

¹⁶ W. von Braun: "Die Ergebnisse seiner Pionierleistungen liegen für alle, die sich heute mit Raumfahrt beschäftigen, klar auf der Hand. Durch ihn haben wir das mathematische Rüstzeug zum Bau mehrstufiger Trägerraketen erhalten ...". Zit. nach D. B. Herrmann: K. E. Ciolkovskij im Spiegel westeuropäischer Raumfahrtliteratur. Berlin-Treptow 1981 (Archenhold-Sternwarte / Mitteilungen; 125), S. 14

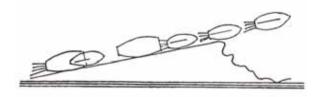


Bild 10: Skizze nach T. N. Jelnina

In den zwanziger Jahren entwickelte er ebenfalls das Konzept vom Raketenflugzeug, dem Stratoplan (Stratosphärenflugzeug) und einem von dem Stratoplan in die Stratosphäre beförderten "Sternenflugzeug", also einem Raumgleiter.

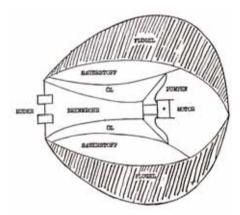


Bild 11: Ziolkowski, "Das Sternenflugzeug" (1932). In: Ausgewählte Arbeiten, 1962, S. 424–425. "Das Sternenflugzeug und die ihm vorangehenden Maschinen" (1933). In: Ausgewählte Arbeiten, 1962, S. 426–434

Ziolkowski war zutiefst davon überzeugt, daß die jüngeren seiner Zeitgenossen noch den Beginn der kosmischen Ära erleben würden – und daß der erste Mensch im Kosmos ein Sowjetbürger sein würde.

Andreas Drexler

Raumfahrt braucht gesellschaftliches Engagement Ein Porträt des Vereins zur Förderung der Raumfahrt e.V.

Der VFR wurde 1988 unter dem Namen "Verein zur Förderung der Weltraumforschung in Deutschland (VfW)" gegründet und setzt sich seitdem für die Raumfahrt in Deutschland ein.

Die Raumfahrt – insbesondere die unbemannte Raumfahrt – hat heute einen Stand erreicht, mit dem sie vielfältige Nutzanwendungen zum Wohle der Menschen ermöglicht. Satellitengestützte Telekommunikation, Erdbeobachtung, Navigation und eine Vielzahl wissenschaftlicher Anwendungen sind elementare und unverzichtbare Bestandteile eines fortschrittlichen Gemeinwesens

Das Wissen über die vielfältigen Raumfahrtsysteme und -projekte, ihre Anwendungen, ihren Nutzen und ihre ideellen Werte sind heute in der Bevölkerung schon weit verbreitet. Dazu haben das Internet sowie die intensive Informationsarbeit öffentlicher Agenturen (DLR, ESA, NASA), der Medien, der Industrie und nicht zuletzt auch von Organisationen wie dem VFR e.V. wesentlich beigetragen. Der ursprüngliche Vereinszweck des VFR e.V., "bei der Bevölkerung und bei den Wirtschaftsunternehmen mehr Verständnis und Interesse für die Weltraumforschung zu wecken", ist heute weitgehend realisiert.

Im Gegensatz dazu ist das öffentliche und staatliche Interesse an der bemannten Raumfahrt in Europa geschwunden. Gerade in Deutschland bestehen deutliche Vorbehalte gegen ein deutsches oder europäisches bemanntes Raumfahrtprogramm jenseits der vertraglich festgelegten Beteiligung an der Internationalen Raumstation. Bemannte Raumflüge für touristische Zwecke oder bemannte Missionen zu Mond und Mars haben keine hohe Priorität.

Der VFR e.V. vertritt die Meinung, dass Deutschland in der bemannten Raumfahrt eine Vorreiterrolle in Europa einnehmen sollte. Die Durchführung bemannter Raumfahrt ist nicht nur eine Kulturleistung, sie stellt eine Leuchtturmfunktion für eine zukunftsorientierte Volkswirtschaft dar und sie ist auch

206 Andreas Drexler

eine Metapher für den Aufbruch junger Menschen zu neuen Zielen und zur Überwindung von Grenzen.

Bemannte Raumfahrt ist nicht nur spannend, sie steht auch dafür, Wagnisse und Risiken einzugehen und Neuland zu betreten. Damit kommt einer bemannten deutschen Raumfahrt eine bedeutsame Rolle in der zeitgemäßen Vermittlung von Werten und Visionen für die junge Generation zu. Dies scheint uns angesichts einer Krise der Werte- und Bildungskultur unter Teilen der jungen Generation dringend geboten.

Aus dieser Überzeugung heraus betreibt der VFR e.V. eine Förderung der Raumfahrt mit seinen spezifischen Möglichkeiten und folgenden Teilzielen:

- Sinn und Nutzen der bemannten und unbemannten Raumfahrt zu verbreiten.
- Zukunftsvisionen zu erarbeiten, auch in Kooperation mit anderen Organisationen.
- studentisches Engagement bei entsprechenden Ideen und Konzepten zu fördern,
- die Bevölkerung durch Veranstaltungen, Internet und Publikationen zu informieren und Interesse für die bemannte Raumfahrt zu wecken,
- bei staatlichen Organisationen und Raumfahrtinstitutionen für ein Engagement bei bemannter Raumfahrt zu werben und
- ein Netzwerk von Unterstützern der Raumfahrt zu initiieren und zu leiten. Der VFR e.V. bedient sich dabei der vielfältigen medialen Möglichkeiten unserer Zeit. Hingewiesen sei hier z.B. auf unseren Raumfahrt-Informationsservice "SPACEXPRESS", der Sie auf unserer Internet-Seite, per Newsletter und im Fachmagazin "Raumfahrt concret" mit neuesten Nachrichten und aktuellen Informationen aus der Welt der Raumfahrt sachkundig und kompetent versorgt.

Seit 2003 gibt der VFR e.V. jährlich seine Raumfahrtchronik "SPACE" heraus. Dieses Almanach betrachtet mit Berichten, Fachbeiträgen, Statistiken und einer vollständigen Chronik das jeweils zurückliegende Raumfahrtjahr und gibt einen Ausblick auf bevorstehende Ereignisse. Die Publikation, die wir ohne Förderung im Eigenverlag herausgeben, hat seit ihrer Erstausgabe ihre Seitenzahl und auch ihre Auflagenhöhe verdoppeln können. Damit haben wir den Beweis erbracht, dass es auch für eine seriöse und anspruchsvolle Berichterstattung zur Raumfahrt eine interessierte Öffentlichkeit und einen Markt gibt.

Die diesjährige Ausgabe der Raumfahrt-Chronik "SPACE" erscheint im November 2007. Die Neuausgabe sowie die Ausgaben der vorangegangenen

Jahre können Sie über den Verein, über den Buchhandel oder über amazon.de beziehen.

Über die Aktivitäten und Publikationen des Vereins zur Förderung der Raumfahrt e.V. und über eine Mitgliedschaft oder die Möglichkeiten einer Mitarbeit informieren Sie sich bitte unter www.vfr.de.

Sie sind herzlich willkommen!

Die Verkehrstechnologie Raumfahrt in Wissenschaft und Gesellschaft

(Wissenschaftliche Mitteilung in der Sitzung des Plenums der Leibniz-Sozietät am 11.10.2007)

Herr Präsident, Kolleginnen und Kollegen der Leibniz-Sozietät, meine Damen und Herren.

ich danke dem Präsidium, dass es kurzfristig möglich geworden ist, im Plenum der Leibniz- Sozietät zum Thema Raumfahrt zu sprechen. Nach dem Kolloquium der Sozietät "50 Jahre Weltraumforschung" am 29. September 2007 bin ich mir wieder sicher, dass unsere Sozietät beim Thema Raumfahrt mitreden kann und Wichtiges zu sagen hat. Ich meine, dass das Kolloquium als ein beachtlicher Beitrag zur Meinungsbildung zum Thema Raumfahrt und ihre Nutzung in Wissenschaft und Gesellschaft angesehen werden kann.

Sie kennen alle das Programm dieses Kolloquiums. Es wurde ohne Abstriche erfüllt. Insgesamt wurden 20 Beiträge vorgelegt: einige historische Betrachtungen dem Anlass entsprechend und viele Berichte über neue Forschungen in einem beeindruckend breiten Spektrum.

Zunächst einmal: Die Raumfahrt hat die Gesellschaft bereits tief greifend beeinflusst. Die Zeiten, in denen die Faszination, die von der Raumfahrt ausgeht, in der breiten Öffentlichkeit als Begründung für die Entwicklung der Raumfahrt genutzt wurde, sind schon längst vorbei. Nach wie vor wird die Raumfahrt propagandistisch als Hinweis auf nationale Führungsstellungen genutzt. Entscheidend sind jedoch die Anwendungspotentiale der Raumfahrt in Wissenschaft und Gesellschaft. Die USA und die UdSSR haben das von Anfang an so gesehen und praktiziert. Beide Staaten haben sich dafür sofort nationale Führungsinstrumente geschaffen: die USA durch die Gründung der National Aeronautic and Space Agency (NASA) im Oktober 1958, die UdSSR durch Bildung des Zwischenbehördlichen Wissenschaftlich-technischen Rates für die Nutzung des Kosmos beim Präsidium der AdW der UdSSR im Dezember 1959.

Die Raumfahrt ist ein Produkt der Wissenschaft; ohne Wissenschaft hätte sie nicht entstehen können. Wohin "die Reise" weiter gehen soll, dazu ist die Wissenschaft als Ganzes gefragt. Notwendig ist das Denken in gesamtgesellschaftlichen Zusammenhängen. Wir brauchen dabei das Aufdecken und Nutzen von Analogien. Die Führung in die Zukunft darf beileibe nicht nur den Technikwissenschaften überlassen werden, auch wenn die technologischen Aspekte – und nicht nur auf den ersten Blick – von größter Bedeutung sind. Den Ansatz für die Formulierung der Entwicklungsziele findet man wahrscheinlich am besten, wenn man die Raumfahrt als System in der Gesamtgesellschaft betrachtet – spezieller: als Teil des Verkehrswesens.

Die Raumfahrt ist die jüngste der vier großen Klassen von Verkehrstechnologien. Die drei älteren sind: Landverkehr, Schifffahrt und Luftfahrt. Zwei weitere Klassen sind der Leitungsverkehr (mit Rohrleitungen, Kabelleitungen zur Energieübertragung) und der Funkverkehr. Die Raumfahrt wird auch heute noch vielfach in Verbindung mit der Luftfahrt betrachtet. Die Abgrenzung wirft sowohl technische wie auch komplizierte rechtliche Fragen auf.

Wenn man über Verkehr spricht, meint man generell die Ortsveränderung von

- Gütern (Waren, Dienstleistungen, Kapital, Energie in der Raumfahrt wären das die Nutzlasten der Raumflugkörper verschiedenster Art),
- Personen (einschließlich Tourismus in der Raumfahrt wären das die Astro-/Kosmonauten und die Weltraumtouristen)
- Nachrichten (auf stofflichen und nicht stofflichen Trägern in der Raumfahrt heißt das die Telekommunikation und die weltweite Übertragung und Verteilung von Wort- und Bildsendungen).

Findet die Ortsveränderung statt, um das räumliche Dasein von Personen und Gütern zu verändern, so spricht man vom Transport. Das Nachrichtenwesen wird häufig separat behandelt, bei der Verkehrstechnologie Raumfahrt jedoch nicht.

Der Grad, in dem eine Nation die Verkehrstechnologien entwickelt und nutzt, bestimmt maßgeblich den Charakter ihrer gesellschaftlichen Entwicklung, ihre Leistungskraft in allen gesellschaftlichen Bereichen. Man spricht von der Mobilitätskultur der jeweiligen Gesellschaft. Die führende Rolle spielt dabei vielfach der militärische Bereich. Das ist nicht nur in der Raumfahrt so. Über die militärischen Aspekte haben wir in unserem Kolloquium aber nicht explizit gesprochen.

Die Verkehrstechnologien bestimmen jeweils einen systemorientierten Zweig des Verkehrswesens: die Verkehrsträger. Von dieser Gruppierung nach technisch-technologischen Kriterien zu unterscheiden ist die Gruppierung nach wirtschaftlich-organisatorischen Kriterien in anwendungsorientierte Verkehrsdienste. Die dienstorientierten Zweige bedienen sich der systemorientierten, um den Nutzern Verkehrsdienstleistungen anzubieten. Über sie verläuft auch in erster Linie die Gewinnung von neuen Kunden und neuen Märkten für das Verkehrswesen. Anstöße für die Entwicklung neuer Träger und neuer Dienstleistungen kommen sowohl aus den technologieorientierten als auch aus den anwendungsorientierten Zweigen. Beide Gruppierungen haben jeweils eigene Zielvorstellungen, zwischen denen ein Kompromiss gefunden werden muss.

Obwohl die Raumfahrt erst ein halbes Jahrhundert Entwicklung hinter sich hat, gelten diese generellen Bemerkungen zum Verkehrswesen weitgehend auch schon für sie. In der heutigen kurzen Mitteilung möchte ich einige Aspekte ansprechen, die im Kolloquium deutlich geworden sind.

Seit dem Start der ersten für die Raumfahrt ausreichend leistungsfähigen Trägerrakete, der R-7 von Koroljow, und dem Start von Sputnik 1 ist in mehreren Ländern eine starke Raumfahrtindustrie entstanden. Zum Beispiel betragen die Jahresumsätze der Raumfahrtsparte des europäischen Konzerns EADS mehrere Milliarden Euro. Heute werden in den USA, in Russland und der Ukraine sowie in Europa ("Ariane") Trägerraketen bereits kommerziell produziert, angeboten und mit Gewinn an Interessenten im In- und Ausland verkauft. Die Weltraumforschung gehört zu den größten Kunden. Gesucht werden neue Einsatzgebiete, Aufträge und Fördergelder für die Entwicklung neuer Träger und neuer Raumflugkörper. Zum Beispiel auch Wege aus der "Sackgasse", in die die USA durch ihre Konzentration auf die Space Shuttle geraten sind. Im Kolloquium hatten wir dazu zwei Beiträge (Berge bzw. von Schönermark).

Zu Erfolgsgeschichten wurden die Satellitenmeteorologie, die Satellitenkommunikation und die Satellitennavigation, dann auch die Erdbeobachtung vom Satellitenorbit aus. Das waren die ersten Anwendungsgebiete der Raumfahrt, alle vier haben mit der militärischen Orientierung begonnen. Sie werden heute mehr oder weniger kommerziell betrieben und sind aus dem Leben in vielen Ländern nicht mehr wegzudenken. Die Nutzung der Raumfahrt hat die Leistungsfähigkeit der klassischen Forschungsgebiete und der darauf aufbauenden Dienste qualitativ und quantitativ außerordentlich gesteigert. Im Kolloquium haben wir diese Gebiete – bis auf die Satellitenkommunikation,

für die wir keinen Referenten gewinnen konnten – exemplarisch behandelt. Für uns waren dabei die aktuellen Forschungsaufgaben wichtig, die in den Anwendungen auftreten und durch sie lösbar werden.

Aus der Sicht von Naturwissenschaft und Technik stehen methodisch generalisiert im Mittelpunkt die Begriffe Information und Kommunikation.

Es sind aber beileibe nicht nur naturwissenschaftlich-technische Fragen, die zu ständig neuen Lösungen führen. Man erkennt das sofort, wenn man die Begriffe sieht, unter denen die UN und ihre Spezialorganisationen diese Anwendungen betrachten:

- Telekommunikation und globale Fernsehübertragungen,
- Überwachung der natürlichen Umwelt und Management der irdischen Ressourcen,
- Minimierung der Risiken von extremen Naturerscheinungen und Überwindung der Folgen von natürlichen und humanitären Katastrophen,
- sichere Verkehrsführung.

Das alles wird gebündelt im Begriff "nachhaltige Entwicklung", vor allem der Entwicklungsländer – aber nicht nur dort, wobei die Industriestaaten sich jedoch mehr für die Fragen Umwelt und Klima interessieren. Den Begriff Entwicklung zu verstehen und für die Umsetzung in die gesellschaftliche Praxis aufzubereiten sollten als erste die Sozial- und Geisteswissenschaftler in der Lage sein, ohne sie geht es bestimmt nicht. Verwiesen sei u.a. auf die damit verbundenen komplizierten Rechtsfragen.

Die weitaus größten Geldgeber für die Raumfahrt und ihre Nutzung auch im nichtmilitärischen Bereich sind nach wie vor die Staaten. Sie bestimmen durch ihre nationalen Interessen entscheidend die Richtung, in der die Raumfahrt sich entwickeln soll. Die USA haben dafür ihre spezielle nationale Weltraumagentur. Die NASA hat das weitaus größte Budget mit zur Zeit 17 Milliarden \$ US. Die deutsche Weltraumagentur, die DLR, hat ein Budget von über 1 Mrd. \$ US. Vergleichbar ist auch das Budget von RosKosmos. Große Agenturen und eigene nationale Programme besitzen auch die VR China und Indien. Die weitaus meisten Nationen, darunter alle Entwicklungsländer, sind jedoch darauf angewiesen, bei den "großen" Nationen mitwirken zu dürfen. Die UNO hat ein spezielles Programm, um die Entwicklungsländer zu fördern, sich an der Nutzung der Raumfahrt zu beteiligen. Seit 1990 ist darin auch die Nutzung für die Wissenschaft einbezogen. Die Nutzung der Raumfahrt für die Wissenschaft wird in allen Ländern ausschließlich vom Staat bezahlt.

Relativ breiten Raum nahmen im Kolloquium die Vorträge über die Erforschung des Weltraumes ein, konkret der Himmelskörper im Sonnensystem, besonders von Erdmond und Mars. Im Berliner Raum gibt es starke Gruppen der Planetenforschung. Weiterhin wurde auf die Erforschung der Heliosphäre als aktuelle Aufgabe verwiesen. Der interplanetare Raum im Sonnensystem ist beileibe nicht leer. Er ist von Plasmen und Magnetfeldern ausgefüllt, der Einfluß der Sonne ist gewaltig. Das sind für sich betrachtet sämtlich naturwissenschaftliche Fragen. Deutlich angesprochen wurden aber auch die wirtschaftlichen Zwänge des gesellschaftlichen Bereiches Weltraumforschung und die heutigen weltraumpolitischen Ziele der führenden Nationen.

Die Erforschung der Heliosphäre ist das zentrale Thema des Internationalen Heliophysikalischen Jahres, das 2007 begonnen wurde und bis 2009 reichen soll. Dieses internationale Wissenschaftsjahr ist eine ausgesprochene Förder-Initiative der großen Weltraumagenturen, in dem der einzigartig große Erfolg des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957/58 zur Popularisierung und Stärkung der Weltraumforschung genutzt werden soll. Die erneute starke Hinwendung der Planetenforschung auf den Erdmond – und nicht nur als Stützpunkt für die Marsforschung – ist offensichtlich durch die neue Konstellation der internationalen Weltraumpolitik bedingt. Man könnte fast schon davon sprechen, dass der Wettlauf in den Weltraum neu angefacht wird. Und das 40 Jahre, nachdem der Weltraumvertrag in Kraft getreten ist und für mehrere Jahrzehnte den Weltraum von nationaler Aneignung frei gehalten und die Stationierung von Massenvernichtungswaffen im Weltraum verhindert hat. Erfreulich war, dass in das Programm des Kolloquiums noch kurzfristig ein Vortrag (Schladebach) zu den aktuellen Fragen im Weltraumrecht aufgenommen werden konnte. (Die Situation erinnert mich sehr an die Forschungsaktivitäten in der Antarktis.)

Last but not least noch einige Sätze zur bemannten Raumfahrt, dem zweiten, faszinierenden, aber auch umstrittenen Teil der Verkehrstechnologie Raumfahrt. Wir hatten im Kolloquium die Freude, dass wir hierzu unseren Forschungskosmonauten Dr. Sigmund Jähn hören konnten. Dazu kamen noch ein Kurzvortrag von Papenfuss zur raumfahrtmedizinischen Forschung und ein Poster zu physikalischen Forschungen unter den Bedingungen der Mikrogravitation an der TU Cottbus. Das war natürlich viel zu wenig, um die Perspektiven der bemannten Raumfahrt diskutieren zu können, reichte aber aus, um erneut an die Schwierigkeiten der Internationalen Raumstation ISS erinnert zu werden, die auch durch die komplizierten Rechtsverhältnisse um

und in der Station und die dadurch bedingte Abhängigkeit von der Weltraumpolitik der großen Nationen verursacht werden.

Welche Anregungen für die Behandlung der Weltraumwissenschaften in der Leibniz-Sozietät ergaben sich? Erste Schlussfolgerungen wären:

- Betrachtungen zu den Folgen der Verkehrstechnologie Raumfahrt. (Dazu sollte die multidisziplinäre Beschäftigung mit den Weltraumwissenschaften von der Sozietät weitergeführt werden, sie bietet zudem nach wie vor gute Möglichkeiten, die Außenwirkung der Sozietät zu steigern. In den "Wortmeldungen" zu den aktuellen Wissenschaftsjahren sollte die Verbindung von Wissenschaft und Praxis betont werden.)
- Verbindung von Weltraumwissenschaften und Erdwissenschaften weiterhin pflegen
- Beitrag der Sozialwissenschaften entwickeln
- Aktivitäten vom Internationalen Heliophysikalischen Jahr 2007 zum Internationalen Jahr der Astronomie 2009
- die relevanten physikalischen Fragen behandeln (u.a. die universellen Prozesse in der Heliosphäre, Magnetoplasmadynamik)

Zum 50. Jahrestag des Startes von "Explorer-1"¹

Die Leibniz-Sozietät hat am 29. September 2007 ein ganztägiges wissenschaftliches Kolloquium "50 Jahre Weltraumforschung. Erforschung und Überwachung der Erde und des Weltraumes gestützt auf die Mittel der Raumfahrt" durchgeführt. Das Kolloquium war die akademiespezifische Wortmeldung der Sozietät zum 50. Jahrestag des Beginns der Weltraumforschung, als den die wissenschaftliche Welt den Start des künstlichen Erdsatelliten "Sputnik 1" betrachtet. "Sputnik 1" wurde am 4. Oktober 1957 durch die Raketentruppen der UdSSR mit einer Interkontinentalrakete des Typs "R 7" von der Startrampe in Baikonur (Kasachstan) gestartet. Was durch den "Osten" als grandioser Erfolg gefeiert wurde, war im damaligen Kalten Krieg für den "Westen" der "Sputnik-Schock" im "Wettlauf in den Weltraum". Nachwirkungen davon spüren wir heute noch.

Die Leibniz-Sozietät ist politisch unabhängig und verhält sich unvoreingenommen zu den Leistungen aller Nationen bei der Erforschung und Nutzung des Weltraumes für friedliche Zwecke. Ebenso wie zum 50. Jahrestag des Starts von "Sputnik 1" melden wir uns deshalb auch zum 50. Jahrestag des Startes des künstlichen Erdsatelliten "Explorer 1" zu Wort. "Explorer 1" wurde am 1. Februar 1958 durch die US Army mit einer Trägerrakete "Juno 1" von der Startrampe in Cape Canaveral (Florida) gestartet. Die "Juno 1" war eine leicht modifizierte Rakete vom Typ "Jupiter C", die wiederum eine leichte Modifikation der Mittelstreckenrakete vom Typ "Redstone" war.

"Explorer 1" war der insgesamt dritte künstliche Erdsatellit, nach den beiden sowjetischen Satelliten "Sputnik 1" (gestartet am 4.10.1957) und "Sputnik 2" (gestartet am 3.11.1957) der erste Satellit der USA. Für die Weltraumforschung zählt vor allem, dass "Explorer 1" der erste künstliche Satellit war, der ausdrücklich zur Erforschung der Hochatmosphäre und des erdnahen Weltraumes geschaffen und erfolgreich eingesetzt wurde.

¹ Wissenschaftliche Mitteilung in der Sitzung der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V. am 14.2.2008

"Explorer 1" war deutlich kleiner und leichter als die "Sputniks", aber mit mehreren geophysikalischen Messinstrumenten und Telemetrie-Antennen bestückt und lieferte sofort zahlreiche Messdaten, darunter diejenigen, die zur Entdeckung des Strahlungsgürtels rings um die Erde führten. Der Gürtel mit energiereichen Plasmateilchen war zuvor völlig unbekannt; er wurde nach James van Allen benannt, der im Jet Propulsion Laboratory des California Institute of Technology die Messgeräte für "Explorer 1" entwickelt hatte. Bezüglich der Ausstattung mit Messgeräten übertraf "Explorer 1" deutlich die beiden sowjetischen Sputniks. "Sputnik 1" war relativ einfach, "Sputnik 2" hatte die Hündin "Laika" an Bord. Ihre Starts hatte die Sowjetunion vorgezogen, da ihr für geophysikalische Forschungen im Rahmen des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957/58 geplanter Satellit nicht rechtzeitig fertig geworden war. Dieser startete erst am 15. Mai 1958 als "Sputnik 3", konnte jedoch wegen Versagens des Bandrekorders nur relativ wenige Messdaten liefern.

In der Mitteilung wird auf die Beschreibung von Details zum "Explorer 1" und zu den anschließenden Forschungen verzichtet. Das kann man an vielen Stellen nachlesen, auch im Internet. Erwähnt werden soll hier nur folgendes:

"Explorer 1" war konkret betrachtet eine Ersatzlösung "aus der Not geboren", um dem Überraschungsschlag der Sowjetunion einigermaßen begegnen zu können, im Trend gesehen jedoch der angekündigte und geplante Beitrag der USA zum Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58.

Ein zentrales Thema des IGJ war die Erforschung der Ionosphäre und des anschließenden äußeren Raumes sowie der Einflüsse der Sonnenstrahlung auf die Erde. In den USA lief dazu schon lange ein umfangreiches Forschungsprogramm, in dem auch Höhenforschungsraketen genutzt wurden: anfangs die in Deutschland erbeuteten "A4"-Raketen, dann die von der "A4" abgeleiteten eigenen Raketen "Viking". Das nationale Programm der USA zum IGJ enthielt ebenfalls den Einsatz von Raketen und Satelliten. Auf ihren Vorschlag hin war auch in das internationale Programm des IGJ ein Thema "Raketen und Satelliten" aufgenommen worden.

Allerdings verlief dann nicht alles so, wie es sich die USA vorgestellt hatten. Man kann auch das an vielen Stellen nachlesen. Hier nur soviel:

Am 28. Juli 1955 ließ der Präsident der USA Eisenhower verkünden, dass die USA als ihren nationalen Beitrag zum IGJ einen künstlichen Erdsatelliten starten werden. Für ein solches Projekt gab es zu diesem Zeitpunkt drei Varianten; sie waren entscheidend davon geprägt, welche der damals in den drei Teilstreitkräften der USA bereits einsatzfähigen bzw. in Entwicklung befindlichen Raketen als Träger benutzt werden sollten:

- ein Projekt der US Air Force, basierend auf der geplanten Interkontinentalrakete "Atlas"
- ein Projekt der US Army, das auf der Rakete "Jupiter C", einer Modifikation der Mittelstreckenrakete "Redstone", basierte, die unter der Leitung Wernher von Brauns ausgehend von der "A4" entwickelt worden war,
- das Projekt "Vanguard" der US Navy, wozu die Raketen, basierend auf von der "Viking" ausgehenden Vorarbeiten der Navy, neu entwickelt werden sollten.

Aus politischen Gründen entschied Präsident Eisenhower, das Projekt "Vanguard" zu realisieren: Es sollte ein weitgehend ziviles Projekt sein, und das "German Rocket Team"² der US Army mit Wernher von Braun sollte aus dem Spiel bleiben. Nach dem erfolgreichen Start von "Sputnik 1" am 4. Oktober 1957 musste dann aber sofort gehandelt werden. Der erste Startversuch der neuen Trägerrakete für "Vanguard" am 6. Dezember 1957 scheiterte. Jetzt musste auf die US Army zurückgegriffen werden. Sie hatte offensichtlich, parallel zur US Navy, auch an einem Satelliten, dem "Explorer 1", arbeiten lassen, und zwar im Jet Propulsion Laboratory des California Institute of Technology. Der Start des "Explorer 1" mit der leicht modifizierten "Jupiter C" der US Army als Träger am 1. Februar 1958 verlief erfolgreich. Die vollständige Blamage war damit vermieden.

Zeitungsberichten der Tage nach dem 1. Februar 2008 ist zu entnehmen, dass das Jubiläum des erfolgreichen Starts von "Explorer 1" in den USA groß gefeiert wurde. Dazu sollen auch alle noch lebenden Mitglieder des "German Rocket Team" eingeladen worden sein. Die deutschen Raketenentwickler. die mit von Braun in der Raketenversuchsanstalt der deutschen Wehrmacht Peenemünde an der "A4" gearbeitet haben, mit ihm in die USA gelangt sind, dort weiter an Raketen arbeiten konnten, vielfach eingebürgert wurden, hat es bestimmt sehr gefreut. Dabei werden sie sich wohl nicht daran erinnert haben, dass die von ihnen entwickelte Rakete "A4" (d.h. "Aggregat 4") in den letzten Jahren des 2. Weltkrieges zu mehreren Tausenden als Raketenträger der Vergeltungswaffe "V2" im unterirdischen Werk "Mittelbau" bei Nordhausen am Harz von KZ-Häftlingen gebaut wurde, wobei mehr Häftlinge umgekommen sind, als durch den Beschuss mit den "V2". Die Öffentlichkeit in den USA ist auf diese Verstrickung der Raketenbauer, die ihre Militärs aus Deutschland importiert hatten und die dann auch noch Entscheidendes unter anderem für den Mondflug der USA-Astronauten geleistet haben, erst in jüngerer Zeit aufmerksam geworden.

² So wurde die Gruppe der rund 500 deutschen Raketenbauer genannt, die sich am Kriegsende der US Army gestellt hatte und in die USA verbracht worden waren.