

DIE STUTTGARTER MONDMISSION LUNAR MISSION BW1 – EIN MODELL FÜR UNIVERSITÄRE-INDUSTRIELLE PUBLIC-PRIVATE-PARTNERSHIP

R. Laufer, H.-P. Röser
Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 31
70569 Stuttgart
E-Mail: laufer@irs.uni-stuttgart.de

1. KURZFASSUNG

Am Institut für Raumfahrtssysteme (IRS) der Universität Stuttgart wurde 2002 das „Stuttgarter Kleinsatellitenprogramm“ initiiert. Vier unterschiedliche Satelliten sind derzeit in der Entwicklung, wobei Studierende der Luft- und Raumfahrttechnik in verschiedenste Bereiche der Projekte einbezogen sind. Ebenso sind industrielle Partner von Beginn des Projektes an über die reine Zulieferrolle hinaus an die Planung und Entwicklung der Missionen beteiligt.

Die vierte Mission ist die LUNAR MISSION BW1, ein Kleinsatellit, der den Mond umkreisen soll, um technologische und Fernerkundungsexperimente durchzuführen (s. Abbildung BILD 1). Die Startmasse soll ungefähr 200 kg betragen, die Form ist ein Würfel von etwa 1 m Kantenlänge, der Satellit soll nach einem Piggy-back-Start und mittels zweier elektrischer Antriebssysteme (Thermisches Lichtbogentriebwerk und instationärem magnetoplasmodynamischem Triebwerk) in einen niedrigen, hochgeneigten Mondorbit eintreten.

werden bereits Technologien, Hard- und Software erprobt werden, wie z.B. Ka-Band-Kommunikation, miniaturisierte Bordsysteme (RGB-NIR-TIR-Kameras, FPGA-Bordrechner), elektrische Antriebssysteme, Gallium-Arsenid-Solarzellen mit hohem Wirkungsgrad, Lithium-Ionen-Batterien.

Die Entwicklung der einzelnen Subsysteme erfolgt in enger personeller, technologischer, wissenschaftlicher und finanzieller Zusammenarbeit mit den industriellen Partnern, deren Produkte während der einzelnen Missionen weltraumqualifiziert werden, wobei Firmen auch Zugang und Zugriff auf Funktionen oder sogar das Gesamtsystem des Satelliten bekommen können (z.B. im Rent-a-Sat-Mode des FLYING LAPTOP). Dies kann über eine eigene Bodenstation erfolgen oder via IRS-Bodenstation/Kontrollzentrum.

2. DAS STUTTGARTER KLEINSATELLITEN-PROGRAMM

2002 wurde am Institut für Raumfahrtssysteme der Universität Stuttgart das „Stuttgarter Kleinsatellitenprogramm“ initiiert. Die Raumfahrtexpertise des IRS sowie Erfahrungen aus früheren von H.-P. Röser in Berlin mitverantwortete Kleinsatellitenmissionen wie DLR-TubSat (Start 1999) und BIRD (Start 2001) bilden die Grundlage für dieses Programm, das aus mehreren Projekte besteht, die unterschiedliche Zielsetzung haben, aber aufeinander aufbauen.

Wesentlicher Punkt ist dabei die intensive Einbindung in Forschung und Lehre in der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie zusammen mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie. Eine Hauptaufgabe ist die praxisgerechte Ausbildung. Studierende können in diesem Programm wertvolle Erfahrungen gewinnen, als Studentische Hilfskraft, im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten bis hin zur Dissertation. Zusätzlich zu diesem praktischen Erkenntnisgewinn hat ein solches Programm einen hohen Identifikationsfaktor, der für Motivation und Arbeitsbereitschaft sorgt, aber auch wichtige soziale Fertigkeiten im Team erbringt. Natürlich sind ebenso Nachwuchswissenschaftler, erfahrene Mitarbeiter verschiedenster Bereiche, Dozenten und Professoren sowie Fachleute kooperierender Institutionen und Unternehmen eingebunden.



BILD 1. Der Kleinsatellit LUNAR MISSION BW1

Im Rahmen der ersten drei Missionen „FLYING LAPTOP“ (Erderkundung/Technologiedemonstrator), „PERSEUS“ (Test elektrischer Antriebssysteme und Inspektionsaufgaben, UV-Astronomie), „DESIRE/CERMIT“ (Wiedereintrittsfahrzeug und autonome Bahn- und Lagemanöver)

2.1. Projekte

Das „Stuttgarter Kleinsatellitenprogramm“ beinhaltet mehrere Projekte (s. Tabelle TAB 1) darunter derzeit vier Satellitenmissionen.

Begleitend zu diesen Missionen befindet sich notwendige Bodeninfrastruktur wie eine Bodenstation, ein Missionskontrollzentrum, ein Satellitenintegrationslabor sowie Testeinrichtungen im Aus- bzw. Aufbau

| Projekt | Zeitpunkt |
|---|-------------------------|
| Labormodell ILSE (elektr. voll funktionsfähig, Telemetrie-test) | Sept. 2003 |
| Satellitenintegrationslabor | 2005/06 |
| Bodenstation (UHF-, VHF-, L-, S-, Ka-Band) und Missionskontrollzentrum - S-Band in Betrieb - Ka-Band in Betrieb | 2005/06 2006 |
| UAV mit Fernerkundungsinstrumenten | 2006 |
| Rent-a-Sat: FLYING LAPTOP Start: Softwaretest im Weltraum, FPGA-Rechner, Ka-Band, RGB/NIR, TIR | 2007 |
| Antriebsdemonstrator: PERSEUS Start: Elektrische Antriebssysteme, Bahn- und Lagemanöver | 2008 |
| Rückkehrmission: DESIRE/CERMIT Start: Wiedereintritt, Autonome Navigation, Steuerung und Kontrolle | nach 2008/09 |
| Mondorbiter: LUNAR MISSION BW1 - Test des Laborprototyps - Start: Technologieerprobung, Fern- erkundung | 2006/07 nach 2008/09 |

TAB 1. Projekte des Stuttgarter Kleinsatellitenprogramms

Der ungefähr 100 kg leichte FLYING LAPTOP, der zusammen mit dem Steinbeis-Transferzentrum Raumfahrt geplant, gebaut und betrieben wird, bildet den Auftakt des Kleinsatellitenprogramms und soll voraussichtlich 2007 als Huckepack-Nutzlast an der Spitze einer indischen PSLV-Rakete starten. Aufgaben sind dabei Technologie-demonstration und wissenschaftliche Erdfernerkundung.

An Bord von PERSEUS werden verschiedene Antriebssysteme geprüft. Der Satellit auf FLYING LAPTOP-Basis wird mit den beiden elektrischen Antrieben ausgestattet, die für die LUNAR MISSION BW1 geplant sind: ein ther-

misches Lichtbogentriebwerk und ein magnetoplasmodynamisches Triebwerk. Möglich ist zusätzlich ein Test eines chemischen Antriebssystems für die Kleinsatelliten-Rückkehrmission. Aufgrund des kurzen Testzeitraums von längstens einigen Monate ist für den zweiten Teil der Mission eine wissenschaftliche Aufgabenstellung ange- dacht: eine astronomischen UV-Nutzlast in Zusammenarbeit mit dem Institut für Astronomie und Astrophysik der Universität Tübingen.

Das dritte Satellitenprojekt ist die Wiedereintrittsmission DESIRE/CERMIT. Basierend auf der mehrjährigen Erfahrung des Instituts für Raumfahrtssysteme im Bereich Rückkehrtechnologien inklusive der Beteiligung an mehreren Experimenten mit unbemannten Eintrittskapseln soll diese Mission eigene wertvolle praktische Flugerfahrung erbringen. Dabei sollen theoretische wie praktische Arbeiten in folgenden Bereichen durchgeführt werden: Missions- und Systemanalyse, Aerothermo- dynamik, Plasmaforschung Entwicklung von Messverfahren und Sensoren. Denkbar ist eine Konfiguration mit ungefähr 200 kg Startmasse bestehend aus zwei miteinander verbundenen Fahrzeugen, wobei das Rück- kehrfahrzeug CERMIT nach dem atmosphärischen Eintritt mittels Fallschirm weich in Australien landen wird. Das „Servicemodul“ stellt u.a. Energie und Antrieb (inklusive Treibstoff) für den De-Orbit zur Verfügung bevor es nach der Abtrennung verglüht.

Die LUNAR MISSION BW1 ist als vierter und derzeit letzter Satellit des Programms gegen Ende der Dekade geplant.

2.2. Eine universitäre Mondmission

Kleinsatelliten sind heute kostengünstige Normalität im Rahmen der Forschung und Lehre von Hochschule oder sogar einzelner Institute, bisher aber nur im erdnahen Raum. Andererseits beteiligen sich akademische For- schungseinrichtungen seit Jahrzehnten an Planetener- kundungsmissionen. Die Autoren denken, dass eine Mission zu einem anderen Himmelskörper, bisher Raumfahrtagenturen vorbehalten, der nächste logische Schritt auf dem Gebiet der universitären Kleinsatelliten ist.

Aus Sicht der Autoren rücken der aktuelle Kenntnisstand in der Kleinsatellitenentwicklung und Fragestellungen in der Planetenforschung sowie heute zu akzeptablen Kosten verfügbare Technologien eine eigene universitäre Mondmission in den Bereich des Machbaren. Die LUNAR MISSION BW1 soll demonstrieren, dass eine solche Herausforderung von einem Hochschulinstitut wie dem Institut für Raumfahrtssysteme mit entsprechender Erfahrung und ausreichender Größe sowie fachkundigen Partnern, wie z.B. EADS Astrium in Friedrichshafen, bewältigt werden kann.

Neben Grenzen existieren auch Potenziale. Die finanziellen Möglichkeiten einer Universitätseinrichtung sind limitiert, jedoch haben sich Kleinsatelliten in den ver- gangenen Jahrzehnten als erfolgreiches Instrument für einen kostengünstigen Zugang zum Weltraum erwiesen. Auf der anderen Seite sind Studierende, von der Hilfskraft bis zum Doktoranden, ein Potenzial an Kreativität und

Motivation, um neue Wege zu finden und auch zu gehen. Technologien, wie z.B. auf dem Gebiet der Mikroelektronik aber auch der Kommunikationstechnik, sind heute zu Preisen verfügbar, die auch eine kleine Institution in die Lage versetzen, Raumfahrt eigenständig vom Satelliten bis zum Bodensegment komplett zu betreiben. Die aufeinander folgenden Missionen des Stuttgarter Kleinsatellitenprogramms machen den Schritt zum Mond erst möglich, indem Flugerfahrung mit Material und vom Personal gesammelt werden kann (s. Tabelle TAB 2).

| Missionen | Erfahrungen |
|-------------------|---|
| FLYING LAPTOP | Integration, Bodenstation, Missionskontrollzentrum FPGA-Bordrechner S-/Ka-Band-Kommunikation RGB/NIR- und TIR-Kamera Radar Ga-As-Solarzellen |
| PERSEUS | Elektrische Antriebssysteme: - Thermisches Lichtbogentriebwerk - Magnetoplasmodynamisches Triebwerk Li-Ion-Batterien Bahn- und Lagemanöver |
| DESIRE / CERMIT | Komplexe Bahn- und Lagemanöver Autonome Steuerung, Navigation und Kontrolle |
| LUNAR MISSION BW1 | Technologien und Kleinsatellitenmissionsbetrieb jenseits des niedrigen Erdorbits |

TAB 2. Schritte auf dem Weg zum Mond

Die Ressourcen am Boden (Zeitaufwand, Teamgröße) und an Bord (Datenspeicherung, Energiespeicherung, Datenrate) sind limitiert. Daraus folgt, dass Themen wie z.B. Autonomie und Automatisierung von Aufgaben am Boden wie an Bord besondere Aufmerksamkeit zu schenken ist. Der Erfüllungsgrad potenzieller wissenschaftlicher Aufgaben ist besonders zu berücksichtigen.

3. PARTNER IM KLEINSATELLITEN-PROGRAMM

Hervorzuheben als Beispiel für universitär-industrielle Zusammenarbeit ist die Vernetzung mit regionalen Unternehmen. EADS-Astrium in Friedrichshafen, Lampoldshausen und Ottobrunn beteiligen sich durch Beistellungen von Software und neuen Technologien, insbesondere zur Erprobung im Weltraum. Dies wird begleitet durch Vorlesungen und Seminare in Stuttgart sowie mehrtägige Workshops in den Unternehmen vor Ort. EADS finanziert eine ganze Reihe von Patenschaften für Doktoranden und bietet dem hoffnungsvollen Nachwuchs außerdem persönliches Coaching. Weitere Unternehmen, die in ähnlicher Weise eine wertvolle

Unterstützung für das gesamte Programm geben, sind: TESAT SPACECOM in Backnang, TELDIX in Heidelberg, LITEF in Freiburg, VON HÖRNER & SULGER in Schwetzingen, RWE SPACE POWER in Heilbronn, ASP in Salem sowie DIEHL & EAGLE PITCHER, FRAUNHOFER-INSTITUT FIRST, O.S.T., THETA SYSTEM, TIMETECH und ZARM. Vor allen Dingen ist das Transferzentrum Raumfahrt der Steinbeis-Stiftung in das Kleinsatellitenprogramm stark involviert, das in der Projektleitung und wichtigen Subsystemen wie z.B. dem frei konfigurierbaren Bordrechner beim Flying Laptop sehr engagiert ist.

Neben der Bereitstellung von Software und Hardware für Satelliten wie Teile der Bodeninfrastruktur sind es vor allem die bereits oben erwähnten Beteiligungen im Rahmen der Lehre bis hin zum kompletten Angebot von Vorlesungen und Seminaren, Workshops für Studierende vor Ort in den Unternehmen, Studien- und Diplomarbeiten sowie Patenschaften für Doktoranden. Darüber hinaus finden gemeinsame Entwicklungen von Subsystemen inklusive die Einwerbung von Finanzmitteln statt, die in der Erprobung neuer Technologien im Weltraum an Bord von Kleinsatelliten gipfeln. Möglich macht dies die vollständige Nutzung einzelner Kleinsatelliten im sogenannten Rent-a-Sat-Mode – d.h. temporäre Kontrolle und Nutzung durch Dritte – durch beteiligte Unternehmen und Partner

4. DIE LUNAR MISSION BW1

Der geplante Mondorbiter hat eine Startmasse von ungefähr 200 kg und eine Würfelform mit etwa 1 m Kantenlänge und zweifach ausklappbaren, fix ausgerichteten Solarzellenflächen sowie einer fest montierten Antenne von etwa 1m Durchmesser. Der Missionsablauf teilt sich in sieben Phasen (s. Tabelle TAB 3), wesentlich charakterisiert durch die unterschiedliche Antriebssystemnutzung. An die schließt sich möglicherweise die Aktivitätsphase eines Oberflächenelements an, das kurz vor dem Einschlag abgeworfen würde, zur aktiven oder passiven Bestätigung des Impakts, wozu derzeit erste Studien laufen.

Elektrische Antriebssysteme werden seit mehreren Jahren am Institut für Raumfahrtssysteme erforscht und entwickelt, darunter Beispiele für einfache und kosten-günstige elektrische Triebwerke, die sich deshalb auch für universitäre Satellitenmissionen eignen. Aufgrund unterschiedlicher Anforderungen in verschiedenen Missionsphasen sind derzeit zwei Systeme geplant: ein thermisches Lichtbogentriebwerk und ein Cluster von magnetoplasmodynamischen Triebwerken. Das mit Ammoniak betriebene thermische Lichtbogentriebwerk für die Phasen I, IV und VII soll ungefähr 100 mN Schub mit einer Ausströmgeschwindigkeit von etwa 5 km/s erzeugen. Der Cluster von magnetoplasmodynamischen Triebwerken für die Phasen III, V und VI verwendet als Treibstoff Teflon und soll einen Schub von wenigen mN erbringen, die Ausströmgeschwindigkeit beträgt jedoch ungefähr das Zwei- bis dreifache der des Lichtbogenantriebs. Gepulst betrieben, lassen sich die Systeme je nach zur Verfügung stehender elektrischer Leistung regeln.

| Phase | Beschreibung |
|-------------------|---|
| I – Start | Huckepack-Start, Aussetzen im GTO |
| II – Aufstieg | Anheben des Orbits oberhalb des Van-Allen-Gürtels |
| III – Flug | Aufspiralisieren zum Mond |
| IV – Einfangen | Wechsel vom Erd- zum Mondorbit und Eintritt in eine hochelliptische Übergangsbahn |
| V – Abstieg | Absenken des Orbits in die kreisförmige, niedrige, hochgeneigte Zielumlaufbahn |
| VI – Wissenschaft | Mindestens sechs Monate Fernerkundung der Oberfläche |
| VII – Impakt | Kontrollierter Einschlag |

TAB 3. Missionsphasen

Dem daraus für einen Kleinsatelliten hohen Bedarf an elektrischer Leistung von bis zu 1 kW, wird durch sechs Solarzellenflächen sowie hoch effektive Gallium-Arsenid-Solarzellen neuester Technologie Rechnung getragen. Zur Speicherung der erzeugten Energie finden moderne Lithium-Ionen-Batterien Verwendung. Die im Flug und zur Fernerkundung benötigte Drei-Achsen-Kontrolle wird durch Reaktionsräder erreicht. Neben Tracking stehen zur Navigation mehrere Sternsensoren an Bord zur Verfügung, die durch weitere Sensoren ergänzt werden.

Zwei weitere Subsysteme werden beim FLYING LAPTOP erprobt und leisten in angepasster Version an Bord der LUNAR MISSION BW1 ihren Dienst: FPGA-basierter Bordrechner, S-/Ka-Band-Kommunikationssystem. Die moderne Computerarchitektur stellt, im Vergleich zu existierenden Raumsondenrechnern, eine deutlich höhere Leistung zur Verfügung. Diese wird für eine stärkere Bordautonomie und größere Verarbeitungskapazität an Bord genutzt, erstere während der Flugphase und letztere während der wissenschaftlichen Betriebsphase. Die Nutzung hoher Frequenzen im S- (2 GHz) und Ka-Band (20-30 GHz) macht annehmbare Datenraten möglich. Damit lässt sich die Mondmission mit geringen Antennen-durchmessern (ca. 1 m an Bord und etwa 3 m am Boden) von einem Universitätsinstitut eigenständig betreiben.

4.1. Technisch-wissenschaftliche Aufgaben

Die elektrischen Antriebssysteme stehen an erster Stelle der Technologiedemonstration. Weitere Themen sind: autonome Steuerung, Navigation und Kontrolle zur Orbit- und Lagekontrolle, FPGA-Bordrechner, moderne Softwaretechnologien. Hochfrequenz- und Mikrowellensysteme zur Breitbandkommunikation und Radarerkundung. In den Bereich Fernerkundung fallen: kleine

und leichte Kamerasysteme im sichtbaren Spektrum (RGB), nahen (NIR) und thermischen (TIR) Infrarot, „Target Pointing Observation Mode“ (Beobachtung eines Bodenpunktes unter verschiedenen Aufnahmewinkeln während eines Überflugs).

Es existieren unterschiedliche Möglichkeiten für Wissenschaft mit einem Kleinsatelliten abhängig von der jeweiligen Missionsphase. Potenzielle Aufgaben im cis-lunaren Raum: Staub- und Debris-Detektion, Messung von Gravitations- und Magnetfeldern sowie Strahlung, Beobachtung von erdnahen Objekten (NEOs), Erkundung der Kordylewskischen Wolken an den Lagrange-Punkten L4 und L5. Möglichen Experimenten am Mond: hochaufgelöste multispektrale Daten und mineralogische Beobachtungen ausgewählter Regionen, Reflektanz- und Illuminationsmessungen, Aufnahmen von Überresten früherer Missionen und zukünftiger Landestellen, Suche nach polarem Wasser, Untersuchung der lunaren Weltraumumgebung.

Mit einer einzelnen Kleinsatellitenmission ist diese Zahl an möglichen Forschungsaufgaben nicht abzudecken. Im Rahmen eines Entscheidungsverfahrens wird bewertet, was vernünftig und machbar ist und danach die wissenschaftliche Nutzlast ausgewählt. Wahrscheinlich erscheinen zum heutigen Zeitpunkt folgende Nutzlasten: RGB/NIR- und TIR-Kamera, Radarbeobachtung mittels S-/Ka-Band-Kommunikationssystem. Viele auf den ersten drei Stuttgarter Kleinsatelliten geflogene Subsysteme werden sich in gleicher oder angepasster Version an Bord der LUNAR MISSION BW1 befinden.

Im Rahmen zukünftiger robotischer und bemannter Monderkundung und -nutzung könnten Kleinsatelliten eine wichtige und kostengünstige Rolle beim Aufbau notwendiger Infrastruktur (z.B. für Kommunikations- und Navigationsaufgaben) spielen, was durch die LUNAR MISSION BW1 demonstriert werden könnte.

- [1] R. Laufer, H.-P. Roeser and the Lunar Mission BW1 Project Team (M. Auweter-Kurtz, D. Bock, A. Falke, M. Graesslin, M. Hartling, G. Herdrich, F. Huber, H. Kurtz, M. Lengowski, A. Nawaz, M. v. Schoenermark, T. Wegmann): “An Academic Small Satellite Mission beyond Low Earth Orbit – The LUNAR MISSION BW1 of the University of Stuttgart”, IAA-B5-0508P, 5th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, April 4 – 8, 2005, Berlin, Germany, 2005
- [2] R. Laufer, M. Auweter-Kurtz, M. Lengowski, A. Nawaz, H.-P. Roeser, M. v. Schoenermark, H. P. Wagner: „An All Electrical Small Satellite for a Technology Demonstration and Science Mission to the Moon“, IAC-04-IAF-Q.2.b.05, 55th International Astronautical Congress, October 4 – 8, 2004, Vancouver, Canada, 2004
- [3] H.-P. Roeser, M. Auweter-Kurtz, H. P. Wagner, R. Laufer, S. Podhajsky, T. Wegmann, F. Huber: “Challenges and Innovative Technologies for a Low Cost Lunar Mission“, ESA SP-542, 5th IAA International Conference on Low-Cost Planetary Missions, September 24 – 26, 2003, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2003