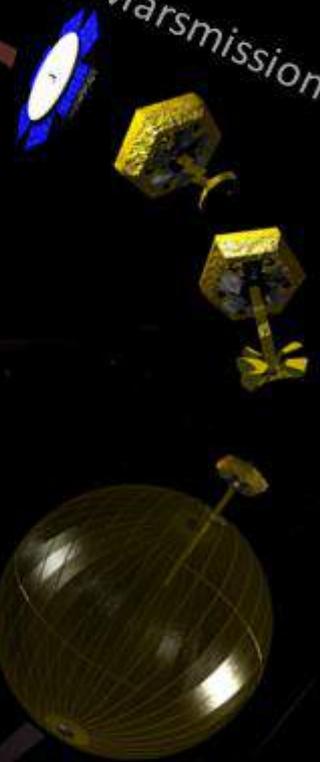


Weltraumtests 2006, 2008 und
2015

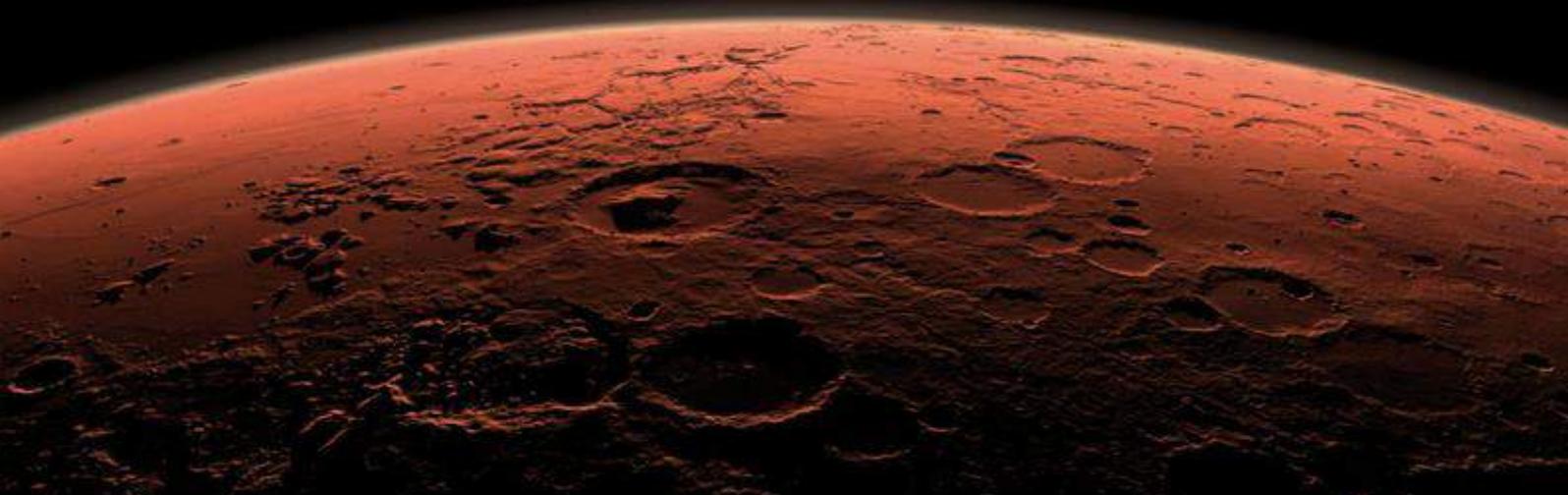
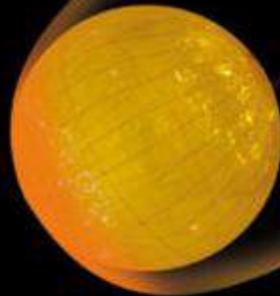


ARCHIMEDES Marsmission



1998-2014

16 Jahre Mars Society
und ARCHIMEDES



Einleitung

Die Mars Society Deutschland –MSD- wurde 1998 zusammen mit der Mars Society der USA gegründet. Schon 1999 entstanden dann die ersten Ideen für eine neuartige Methode zur Erforschung der Marsatmosphäre mithilfe eines relativ langsam in der Marsatmosphäre absteigenden großen Ballons von etwa 10m Durchmesser. Die weltweit neuartige Idee besteht darin, den mit Messsonden ausgerüsteten Ballon bereits im Weltraum auf einer Marseintrittsbahn aufzublasen und abzusetzen. Der Ballon soll dann selbsttätig in die Marsatmosphäre eintreten und dadurch abgebremst werden und schließlich zum Mars absteigen. Während der gesamten auf das Aufblasen folgenden Missionsphase sollen die Messdaten über einen den Mars umkreisenden Satelliten zum Boden gefunkt werden. Das war die Geburtsstunde der Marsballonsonde ARCHIMEDES. Parallel hierzu beteiligte sich die MSD noch bis 2003 an dem Entwurf und Bau von Mars-Simulationsstationen der Mars Society mit dem Entwurf einer europäischen Simulationsstation „Euromars“, die aber nicht zustande kam. Mitglieder der MSD nahmen 2002 an einer einwöchigen Simulationsmission in der Mars Desert Research Station (MDRS) der Mars Society in Utah teil.

Ab 2001 nahm das das Projekt ARCHIMEDES langsam Gestalt an und wurde Gegenstand der Doktorarbeit von Hannes Griebel, dem späteren Präsidenten der MSD.

Im Verlauf der 3. Europäischen Mars Society Konferenz EMC3 im Jahr 2003 in Bremen wurde dann das Projekt ARCHIMEDES zum Hauptprojekt der Mars Society Deutschland erklärt. Die MSD bekam den Untertitel „technisch-wissenschaftliche Vereinigung“ aufgrund des stark wissenschaftlich ausgerichteten Projekts ARCHIMEDES. Seitdem sind die personellen und finanziellen Ressourcen der MSD überwiegend auf das technisch sehr anspruchsvolle Projekt ARCHIMEDES ausgerichtet, weshalb ARCHIMEDES auch in dieser Sonderausgabe des Newsletters im Mittelpunkt steht.

Hintergrund und Ziele der Mars Society

Die Mars Society sieht die bemannte Raumfahrt als eine Kulturleistung der ganzen Menschheit und ist überzeugt, dass nur bemannte Marsmissionen mit Untersuchungen des Mars „vor Ort“ durch den Menschen letzte Gewissheit verschaffen können über wichtige Aspekte der Entstehung unseres Planetensystems und darüber, ob Leben auf der Erde spontan entstanden oder möglicherweise über den Mars zur Erde gelangt ist. Man verspricht sich von der Erforschung des Mars auch Erkenntnisse für die Zukunft der Erde, wenn die „Geschichte“ der Entstehung des Mars und seine Entwicklung von einem einstmals aktiven zu dem heutigen weitgehend toten Planeten und die Gründe hierfür verstanden würden. Nicht zuletzt wäre eine bemannte Marsmission die Verwirklichung eines Menschheitstraums, der dem Menschen neue Perspektiven bis hin zu einer Besiedlung des Mars eröffnen könnte, und an der deshalb höchstwahrscheinlich viele Länder teilnehmen würden.

Die internationale Mars Society wurde 1998 von Dr. Robert Zubrin unter Mitwirkung der zeitgleich gegründeten französischen und deutschen Mars Societies ins Leben gerufen. Die Mars Society umfasst zur Zeit mehr als 40 internationale „Ableger“, die alle unabhängig organisiert sind entsprechend den Schwerpunkten und Organisationsformen der beteiligten Länder. Unter ihnen auch die **Mars Society Deutschland (MSD)** als gemeinnütziger Verein auf der Basis freiwilliger unbezahlter Mitarbeit, dessen Funktionieren auf den Mitgliedsbeiträgen seiner Mitglieder beruht.

Anlass für die Gründung der Mars Society waren die aus Sicht ihres Gründers Dr. Robert Zubrin viel zu teuren und langwierigen Pläne der NASA in den 90'er Jahre für eine erste bemannte Marsmission, die mehrere Hundert Milliarden Dollar verschlungen hätte. Was dann ja auch folgerichtig zu einer Ablehnung in Politik und Öffentlichkeit einer solch teuren bemannten Marsmission mit einem so fernen zeitlichen Horizont führte. Zubrin hatte selber bei Martin Marietta an Studien und Berechnungen für wesentlich einfacher und schneller zu verwirklichende bemannte Marsmissionen gearbeitet.



hatte („The Case for Mars“) und das seitdem mehrmals überarbeitet und um neue Erkenntnisse ergänzt wurde –

zuletzt 2009-, ohne dass das Grundkonzept damit geändert wurde. Das Grundprinzip des Mars Direkt Konzepts ist es, mit weitestgehend verfügbaren Technologien, geringstmöglichen Kosten und in einem vertretbaren Zeitraum von 10 bis 12 Jahren sechs Astronauten auf dem Mars absetzen und sie nach Beendigung wissenschaftlicher Untersuchungen sicher zur Erde zurückbringen zu können. Die bei der Mission entstehenden Risiken sollten nicht

größer sein als vergleichsweise bei der Apollo Mission, die ja auch innerhalb von weniger als zehn Jahren

verwirklicht wurde bei einem vergleichsweise viel schlechteren Technologiestand zu Beginn des Apollo Programms.

Zur Vorbereitung bemannter Marsmissionen sind vorherige umfangreiche Simulationen auf der Erde erforderlich, bei denen Menschen unter möglichst dem Mars ähnlichen Bedingungen leben und arbeiten.

FMARS



Die Mars Society hat hierfür schon bedeutende Beiträge geleistet mit ihren beiden schon seit 2001 betriebenen sogenannten „Mars Analog Stationen“ FMARS (Flashline Mars Analog Research Station) in der Arktis und MDRS (Mars

Desert Research Station) in der Wüste von Utah. Die extremen klimatischen Umgebungsbedingungen dieser Stationen nähern sich denen auf dem Mars.

MDRS



Das Fehlen einer atembaren Atmosphäre auf dem Mars wird dabei bei externen Arbeiten

durch das Tragen von Raumanzügen bei der Arbeit im Freien simuliert. Die beiden Stationen ähneln denen, die für eine bemannte Marsmission vorgesehen sind und bieten damit ähnliche Wohn- und Lebensbedingungen.

Auch in Europa wurde bis 2003 eine eigene Mars Simulationsstation geplant, EUROMARS genannt, die dann aber aufgrund fehlender Finanzierung nicht zustande kam. Auch die MSD war an deren Planung und Entwicklung beteiligt und nahm mit mehreren ihrer Mitglieder an einer 14-tägigen MDRS Mission teil. Seitdem steht aber ARCHIMEDES im Vordergrund, weshalb die MSD seitdem nicht mehr an Simulations-Missionen teilgenommen hat.

Ein weiterer von mehreren Mars Society Organisationen unterstützter Bereich betrifft Entwicklung und Test von Mars Robotern, den sogenannten „Mars Rovern“. Dabei geht es in

erster Linie darum, Studenten und Universitäten die Gelegenheit zu bieten, mit selbstentwickelten Rovern in einen internationalen Wettbewerb zu treten, der jährlich von der Mars Society in den USA organisiert wird, neuerdings auch in Europa.

Links:

FMARS (<http://arctic.marssociety.org/arctic/index.asp>)

MDRS (<http://desert.marssociety.org/>)

Rover Wettbewerb USA (<http://urc.marssociety.org/>)

Rover Wettbewerb 2014 in Polen (<http://roverchallenge.eu/en/erc/>)

ARCHIMEDES (http://marssociety.de/?page_id=27)

Inhalt

Hintergrund und Ziele der Mars Society	3	Der MIRIAM/ARCHIMEDES Ballon-ein High Tech Produkt	20
Das ARCHIMEDES Team und seine Partner	5	Das Ballon Technologie- und Testprogramm	20
Planetare Forschungsballons und ARCHIMEDES..	7	Material-Entwicklungstests	22
Venusballon	7	Fertigung des Ballons.....	23
Marsballon.....	7	Das bisherige Flugtestprogramm.....	23
Aufblasen des Ballons in der Atmosphäre.....	7	Parabelflüge	24
Start des Ballons vom Boden aus	8	REXUS 3-REGINA Raketenflugtest.....	24
Der ARCHIMEDES Ballon als „Mars-Eintrittsraumfahrzeug“	9	REXUS 4-MIRIAM 1 Weltraumtest.....	25
Die wissenschaftlichen Instrumente von ARCHIMEDES	10	Planung der Mission	25
Die ARCHIMEDES Marsmission.....	11	Missionsablauf	26
Anforderungen an die Mission	11	Der geplante MIRIAM2 Weltraumtest.....	27
Der Ursprung: Mitflug zum Mars mit der AMSAT P5-A Marssonde.....	12	Von MIRIAM 1 zu MIRIAM 2	27
Missionsablauf.....	12	MIRIAM-2 Mission	28
Forschung für das ARCHIMEDES Programm.....	13	MIRIAM-2 Zeitplan.....	29
Verhalten des Ballons unter aerodynamischer und thermischer Belastung	13	Weitere Flugtests.....	29
Versuche im Unterschallbereich	14	MIRIAM-3 Flugtest mit flacher Eintrittsbahn.	29
Ballonform und Aerothermodynamik im Hyperschall	15		
Windkanalversuche	15		
Ballon-Vibrationsversuche.....	15		
Materialuntersuchungen, Materialauswahl und Ballonfertigung	15		
Verlauf des ARCHIMEDES Programms.....	15		
MIRIAM-2 als „Mini-ARCHIMEDES“	16		
MIRIAM-B, das Werkzeug der Wissenschaft..	17		
Das Service Spacecraft.....	19		
Datenübertragung	20		
Energieversorgung.....	20		
Bahnkorrektursystem zum Erreichen der Balloneintrittsbahn.....	20		

Das ARCHIMEDES Team und seine Partner

Das Projekt des Marsballons ARCHIMEDES ist das wichtigste Vorhaben der Mars Society Deutschland-MSD und umfasst Definition, Entwicklung und Test eines Raumflugsystems, das es erlaubt, in einer Mars-Eintrittsbahn außerhalb der Marsatmosphäre einen Ballons mit 10 m Durchmesser aufzublasen, der anschließend antriebslos in die Marsatmosphäre eintritt und nach mehreren Umrundungen des Mars in der Marsatmosphäre zum Boden absinkt. Solch eine Mission erlaubt es, in einer niedrigen Marsumlaufbahn und in der Marsatmosphäre wissenschaftliche Messungen vorzunehmen, die bisher nicht möglich waren. ARCHIMEDES soll als Passagier auf einer Marssonde mit zum Mars fliegen und dort in einer Umlaufbahn ausgesetzt werden. Ursprünglich war hierfür eine enge Kooperation mit der Amateurfunk-Organisation AMSAT geplant, die eine Marsmission mit ihrem Satelliten P5-A plante. Die Konfiguration des P5-A erlaubt eine besonders ökonomische Auslegung von ARCHIMEDES, da der P5-A sein Antriebsmodul, das am Mars nicht mehr benötigt wird, ARCHIMEDES zum Abstieg in eine Marseintrittsbahn zur Verfügung stellen kann. Inzwischen ist es jedoch ungewiss, ob die P5-A Mission zustande kommt. ARCHIMEDES müsste dann an einen anderen Satelliten angepasst werden, was aber keine grundlegende Änderung von ARCHIMEDES zur Folge hätte. Deshalb wird die auf den P5-A „optimierte“ Konfiguration von ARCHIMEDES vorerst beibehalten.

Das technisch anspruchsvolle ARCHIMEDES Projekt wird von der Mars Society Deutschland e.V. seit 2003 in Kooperation mit Partnern aus namhaften Universitäten und Forschungsinstituten entwickelt. Dabei ist die MSD auf das ehrenamtliche Engagement der Mitglieder des ARCHIMEDES Entwicklungsteams angewiesen sowie auf die Mitgliedsbeiträge ihrer Mitglieder und die Unterstützung durch Sponsoren. Seit 2006 stehen Entwicklung und Raumflugtest repräsentativer Fluggeräte in verkleinertem Maßstab von ARCHIMEDES, die Raumfahrzeuge MIRIAM-1 und MIRIAM-2, im Mittelpunkt der Aktivitäten von MSD und ihren Partnern.

Die MSD ist innerhalb des ARCHIMEDES/MIRIAM Projektteams verantwortlich für

- die Projektführung
- die Entwicklung des Ballute 1)
- Entwurf und Bau des Geräteträgers mit der Bordelektronik und den wissenschaftlichen Instrumenten („Pod“)
- die Beschaffung und Integration der wissenschaftlichen Geräte
- die Entwicklung der Bodentestgeräte
- die Entwicklung der Computer und ihrer Software
- die Entwicklung aller sonstigen Bestandteile der Elektronik und Elektrik
- die Tests des Ballons und des Gesamtsystems

1) „Ballute“ ist ein Begriff, der sich aus den Wörtern „Balloon“ und „Parachute“ zusammensetzt und andeuten soll, dass es sich dabei um einen atmosphärischen Bremskörper in Ballonformat handelt

Technisch federführend in der Forschung und der Entwicklung des Systems zu Verstaung, Ausbringung, Entfaltung, Aufblasen und Freisetzen des Ballons (Service Spacecraft) ist die Universität der Bundeswehr (UBW) in Neubiberg bei München.

Weitere unverzichtbare Partner der MSD im ARCHIMEDES Programm sind

- die Mobile Raketen Basis der deutschen Raumfahrtagentur DLR (DLR-MoRaBa), die die Raketen sowie die gesamte Startkampagnen für die Flugversuche REXUS3-Regina, REXUS4-MIRIAM-1 und TAURUS/IMPROVED ORION-MIRIAM2 zur Verfügung stellt
- die IABG zur Unterstützung von Bau und Test des Ballons
- weitere Sponsoren, die die Entwicklung des Ballons und der Elektronik unterstützen.

Die wissenschaftlichen Grundlagen für die ARCHIMEDES Mission und die Flugtest Missionen REGINA und MIRIAM-1 (mit der MIRIAM-1 Mission im Oktober 2008) wurden an der Universität der Bundeswehr im Rahmen einer Doktorarbeit des MSD Mitglieds und früheren MSD Präsidenten Dr. Hannes Griebel und mithilfe zahlreicher Studien- und Diplomarbeiten entwickelt. Das Nachfolgeprogramm MIRIAM-2 befindet sich auf der Basis der Ergebnisse der MIRIAM-1 Mission zurzeit in der Entwicklung. Der Start von MIRIAM-2 ist für November 2016 geplant.

Die wissenschaftlichen Instrumente für ARCHIMEDES werden von den darauf spezialisierten Institutionen beigestellt und sind bestimmend für die Auslegung des Geräteträgers und seiner Avionik. Die einzelnen Instrumente und ihre Herkunft sind in einem der folgenden Kapitel beschrieben.

Wesentliche Partner der MSD im ARCHIMEDES Programm:

Universität der Bundeswehr

- Institut für Raumfahrttechnik & Raumfahrtnutzung (Prof. Förstner)
- Institut für Thermodynamik (Prof. Mundt)
- Institut für Leichtbau (Prof. Rapp)
- Institut für Werkstoffkunde (Prof. Gudladt)
- Institut für Technische Produktentwicklung (Prof. Paetzold)

DLR Deutsche Raumfahrtagentur, Mobile Raketen Basis (MORABA)

- Peter Turner, Andreas Stamminger, Frank Scheuerflug, Wolfgang Jung, Markus Pinzer, Marcus Hörschgen, Frank Hassenpflug, Thaddäus Stromsky

DLR Deutsche Raumfahrtagentur, GSOC

- Prof. Felix Huber, Markus Markgraf

IABG mbH Raumfahrt Test Zentrum, Ottobrunn

- Stefan Kupczyk, Christian Henjes, Stefan Reichl, Alwin Eisenmann, Dr. Anton Grillenbeck, Dr. Holger Kügler, Andreas Grielhuesl

Lohmann Tapes, Neuwied, Germany

- Rheinhold Domanski, Guntram Schanz

Die Firma GmbH

- Jo Oed, Sandiep Bapat, Guido Ernst

Arcotec GmbH

- Dr. Werner Eckert

Wasser- und Schiffsamt Uelzen, Bauhof Scharnebeck

- Frank Offenmüller, Arne Möller, Lothar Keding, Hubertus Schulte und
- Ausbildungsabteilung (Mechatronik und Elektronik)

STS Systemtechnik GmbH

- Peter R. Taubenreuther

Webdesign

- Steffen Werner

Links

[Institut für Raumfahrttechnik & Raumfahrtnutzung](#) (Entwicklung des Service S/C)

[Institut für Leichtbau](#) (Auslegung, Fertigung und Integration der Strukturen der verschiedenen Versuchsgeräte)

[Institut für Thermodynamik](#) (Berechnung des Hyperschall-Strömungsfeldes und des Verhaltens des Ballons beim Eintritt in die Atmosphäre)

[Institut für Technische Produktentwicklung](#) (Entwurf von MIRIAM-2)

[IABG](#) (Integrations- und Testeinrichtungen)

[DLR-MoRaBa](#) (Träger für Flugtests und Flugtest-Startkampagnen für RGINA, MIRIAM-1 und MIRIAM-2)

[Lohmann Tapes](#) (Ballon-Klebebänder)

[Die Firma GmbH](#)

[Arcotec GmbH](#)

[Wasser- und Schiffsamt Uelzen](#)

[STS SystemTechnik](#)

Planetare Forschungsballons und ARCHIMEDES

Forschungsballons sind auf der Erde zu einem wichtigen Instrument für viele Wissenschaftsbereiche geworden, da sie Messungen ermöglichen, die von Satelliten aus nicht möglich sind. Dazu gehören die Vermessung der Atmosphäre, des Magnetismus und der Oberfläche.

Das gilt auch für andere Planeten, die über eine Atmosphäre verfügen. Während auf der Venus bereits im Rahmen der sowjetischen VEGA Missionen französische Überdruckballons zum Einsatz kamen, stellte sich die äußerst dünne Atmosphäre auf dem Mars bisher als unlösbares Hindernis dar.

Venusballon

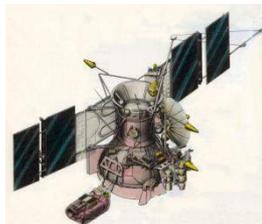


Der sowjetische VEGA Venusballon

Die Ballons der VEGA Missionen wurden in eine kleine Eintrittskapsel gepackt und nach ausreichender Abbremsung in der Venusatmosphäre am Fallschirm hängend aufgeblasen. Danach wurde das Aufblassystem zusammen mit den Fallschirmen abgesprengt und der Ballon konnte seine freie Fahrt in der Atmosphäre beginnen. Die VEGA-Ballons waren für einen Einsatz in rund 50 Kilometer Höhe vorgesehen.

Die sowjetische VEGA Sonde

Dort sind Druck- und Temperaturverhältnisse ähnlich wie auf dem Erdboden, so dass die Ballons mit einer fast sieben Kilogramm schweren Gondel nur einen 3,5 Meter großen Heliumballon benötigten. Darüber hinaus konnte das Flugsystem seine Schwebehöhe beim Aufblasprozess stark unterschreiten, um dann nach erfolgtem Aufblasen auf seine vorgesehene Einsatzflughöhe zu steigen.



Marsballon

Anders als die Venus, die eine überaus dichte Atmosphäre besitzt (Oberflächendruck etwa 90 Bar, Temperatur rund 450 Grad Celsius), hat der Mars eine sehr dünne Atmosphäre (Oberflächendruck etwa 7 mbar, Temperatur rund -70 bis +20 Grad Celsius, je nach Ort und Jahres- bzw. Tageszeit) die damit mehr als zehntausendmal dünner ist als die Venusatmosphäre. Das stellt ganz andere technische Herausforderungen an einen Ballon, das gesamte hierfür erforderliche System und den gesamten Missionsablauf.

Es wurde immer wieder versucht, eine Ballonmission auch an die Bedingungen der Marsatmosphäre anzupassen. Ein solches Experiment mit einem solaren Heißluftballon als Versuchsträger war für die russische Mission Mars'96 vorgesehen. Allerdings versagte die vierte Stufe der russischen Proton-Rakete, sodass diese Mission nicht

zustande kam. Alle anderen Bemühungen dieser Art scheiterten bereits an der Entwicklung der nötigen Technik.

Während also die VEGA Ballons mit einem Durchmesser von 3,5 Metern und einer recht robusten Ballonhaut schweben konnten, ist für den Mars ein vielfach größerer Ballon erforderlich, um die gleiche Nutzlast in der Marsatmosphäre im Schwebezustand halten zu können. Das stellt dann natürlich auch unvergleichbar höhere Anforderungen sowohl an die Konstruktion des Ballons als auch an die Systeme für Transport des Ballons zum Mars und für dessen Aufblasen und Freisetzen.

Ein Marsballon müsste selbst bei extremem Leichtbau einen Durchmesser von bis zu 30 m haben, um eine nennenswerte Nutzlast im Schwebezustand in der Marsatmosphäre halten zu können.

Bisherige Projektvorschläge für Marsballons beruhten im Wesentlichen auf zwei Konzepten:

1. Aufblasen des Ballons in der Marsatmosphäre
2. Aufblasen des Ballons am Boden

Für beide Optionen hat es Pläne für Marsballon Projekte gegeben, die aber bisher alle wegen des zu hohen dafür erforderlichen technischen Aufwand und der hohen erforderlichen Masse wieder aufgegeben wurden.

Aufblasen des Ballons in der Atmosphäre

Eine Marssonde mit dem verpackten Ballon an Bord tritt in die Marsatmosphäre ein und wird anschließend mittels Fallschirmen oder Abbremsraketen soweit abgebremst, dass der Ballon noch weit oberhalb der Marsbodens voll aufgeblasen und schwebefähig zu einem freien Flug freigesetzt werden kann.

Der Aufwand für einen solchen Missionsablauf ist sehr hoch. Um eine solche Ballonmission auf dem Mars durchführen zu können, müssen Wege gefunden werden, die Geschwindigkeit des Eintrittskörpers soweit abzubremsen, dass der Ballon in der Atmosphäre genügend behutsam aufgeblasen werden kann. Sowohl der Einsatz von Fallschirmen wie auch von Abbremstriebwerken würden einen aufwendigen und schweren Eintrittskörpers erfordern.

Es ist schwierig, in der dünnen Mars Atmosphäre einen Überdruckballon an einem Fallschirm hängend aufzublasen, bevor das gesamte Flugsystem am Boden zerschellt. Untersuchungen des Jet Propulsion Laboratory der NASA (JPL) im Rahmen des Mars Aerobot Validation Program (MABVAP) zeigten das recht eindrucksvoll.

Auch die Mars Society Deutschland hat diese Methode ausgiebig studiert. Allerdings kam das Team noch während der Theoriephase zu der Erkenntnis, dass ein derart schwieriger und komplexer Prozess mit den vorhandenen Mitteln der Mars Society Deutschland nicht durchgeführt werden kann. Das Problem ist, dass aufgrund der dünnen Atmosphäre große Fallschirme benötigt werden, um eine für den Aufblasvorgang ausreichend verringerte Sinkgeschwindigkeit zu gewährleisten. Solche Fallschirme führen jedoch in der Wirbelschleife der langen, flatternden Hülle eines riesigen Ballons zu einem nahezu chaotischen Verhalten des Gesamtsystems. Diese Erkenntnisse werden

durch Videoaufnahmen von Stratosphärenversuchen im Rahmen des MABVAP Programms bestätigt. Das chaotische Flattern beeinflusst nachhaltig die Flugbahn, welche jedoch so genau vorhersagbar sein muss, dass eine Kollision mit Bodenerhöhungen ausgeschlossen werden kann – in der dünnen Marsatmosphäre, in der alle Prozesse in Sekundenbruchteilen ablaufen müssen, eine kaum zu gewährleistende Bedingung.

Start des Ballons vom Boden aus

Wenn man sieht, wie aufwendig das Aufblasen eines Ballons am Boden auf der Erde ist mit zahlreichen Helfern, erscheint ein erfolgreiches vollautomatisches Aufblasen eines Ballons von bis zu 30 m Durchmesser vom Marsboden aus als utopisch. Hierbei müsste eine Marssonde mit dem verpackten Ballon an Bord zuerst am Marsboden abgesetzt und dann erst aufgeblasen und freigesetzt werden für einen Aufstieg in etwa 3 km Höhe und anschließendem freien Flug zu Messzwecken. Hierzu müssten aber Ballon und Aufblasvorrichtung erst einmal sanft bis zur Marsoberfläche gebracht und richtig positioniert werden.

Neben den technischen Schwierigkeiten ist zusätzlich das Aufblasen eines solch großen Ballons auf dem Mars ein schwieriges Unternehmen angesichts der auf dem Mars zu erwartenden Staubschicht und der auftretender Sandstürme. Daher wurde als Alternative ein Konzept entwickelt, bei dem der Ballon von einer ausreichend großen gelandeten Plattform aus gestartet wird. Allerdings zeigten sich auch hier sehr schnell die technischen Grenzen. Wetterphänomene wie Wind und Windhosen (Dust Devils) in der Nähe des Marsbodens oder die jeweilige Bodenmorphologie könnten trotzdem zur Zerstörung des Ballons führen, der während des Aufblasens durch seine Beweglichkeit zum fragilen Schwachpunkt des Gesamtkonzepts würde.

Der Aufwand und das Risiko für eine Landung des Ballonsystems auf dem Mars ist vergleichbar mit der Landung eines Marsroboters wie OPPORTUNITY.

Das ARCHIMEDES Konzept-Eintritt des Ballons im aufgeblasenen Zustand

Schließlich könnte der Ballon schon im Weltraum außerhalb der Marsatmosphäre aufgeblasen werden und anschließend auf einer Eintrittsbahn in die Marsatmosphäre eintauchen, dadurch sukzessive abgebremst werden und damit selbst als „Bremsen“ dienen, sodass der Ballon relativ langsam zur Marsoberfläche absinkt. Während der gesamten Flugphase des Ballons würden wissenschaftliche Messungen ausgeführt und über den Trägersatelliten zur Erde gesendet.



ARCHIMEDES
Missionskonzept mit einer Marssonde (hier die AMSAT P5-A Marssonde) als „Transportmittel“ zum Mars

Solch ein Konzept erscheint grundsätzlich sehr attraktiv, da aufgrund der dünnen Marsatmosphäre mit einem Atmosphärendruck von unter 10 mbar ein solcher Ballon nur auf mehr als 10 mbar Innendruck aufgeblasen werden müsste, um in der Marsatmosphäre weiterhin voll aufgeblasen zu bleiben. Aufwendige und schwere Systeme, wie sie für ein Aufblasen in der Marsatmosphäre oder vom Marsboden aus erforderlich wären entfallen, wenn der Ballon unter Schwerelosigkeitsbedingungen im Weltraum aufgeblasen und anschließend in eine Mars Eintrittsbahn gebracht würde, die mit der thermischen und aerodynamischen Belastbarkeit des Ballons in Einklang steht.

Das ist das Prinzip des ARCHIMEDES Raumfahrzeugs und Konzepts.

Um eine mehrtägige Mission zu erreichen, müsste der Ballon einen Schwebezustand Ballons in der Marsatmosphäre erreichen. Solch ein Ballon müsste bei Anwendung verfügbarer Technologien einen Durchmesser von über 30 m haben. Untersuchungen zu solch einem Konzept haben gezeigt, dass im Rahmen der angestrebten Missionsziele und des für das MSD Team realisierbaren technischen Aufwands eine solche Mission nicht verwirklicht werden kann.

Umfangreiche Untersuchungen und Berechnungen haben jedoch ergeben, dass eine wissenschaftlich ergiebige Mission auch mit einem Ballon von etwa 10 m Durchmesser verwirklicht werden kann. Damit lässt sich ein System darstellen, das etwa 80 kg Gesamtgewicht nicht überschreitet und damit auch die Chance hat, als „Passagier“ mit einer Marssonde zum Mars mitgenommen zu werden.

Ein solcher Ballon würde immer noch eine Flugzeit durch die Marsatmosphäre von etwa einer Stunde gewährleisten, was nach Meinung der an der ARCHIMEDES Mission beteiligten Wissenschaftler ausreicht, um die gewünschten wissenschaftlichen Messungen durchzuführen.

Um die für wissenschaftliche Messungen zur Verfügung stehende Messzeit auf etwa 2 bis 4 Stunden zu erhöhen und eine zu starke Erwärmung des Ballon zu vermeiden, wird der Missionsverlauf so ausgelegt, dass der Ballon zunächst zwischen zwei und neunmal durch die Atmosphäre hindurch fliegen wird, bevor er anschließend ein letztes Mal eintaucht, um innerhalb von weiteren bis zu sechzig Minuten -abhängig von der Eintrittsbahn- zum Boden absinkt. Hierfür ist eine sehr genaue Vorherbestimmung von Eintrittswinkel und -Geschwindigkeit des Ballons erforderlich.

ARCHIMEDES besteht demnach aus einem Ballon von etwa 10 m Durchmesser, der in gefaltetem Zustand an Bord eines Trägersatelliten zum Mars befördert und dort, zusammen mit den für das Entfalten, Aufblasen und Freisetzen des Ballon erforderlichen Systemen, in einer Marsumlaufbahn abgesetzt und anschließend in eine Marseintrittsbahn gesteuert wird. Erst dann wird der Ballon aufgeblasen und freigesetzt für seinen Eintritt in die Marsatmosphäre und Abstieg zum Marsboden. In den Ballon ist ein Geräteträger mit wissenschaftlichen Instrumenten, der Avionik zur Aufbereitung des Daten und Sendern integriert, über die die gemessenen Daten über einen Satelliten in der Marsumlaufbahn zur Erde übertragen werden.

Da der Ballon mit dem Geräteträger auf dem Mars relativ hart aufschlagen wird, müssen alle gewonnenen Daten noch während des Abstiegs gesendet werden.

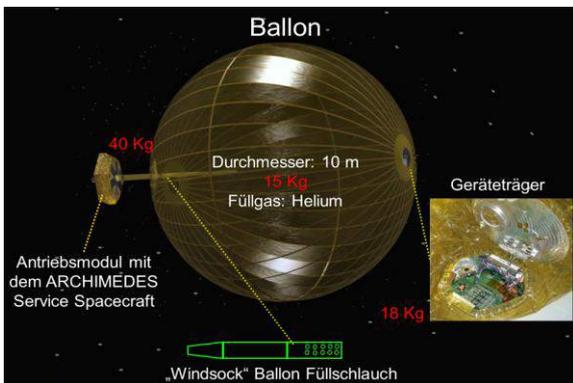
ARCHIMEDES wäre damit weltweit das erste interplanetare Amateur-Raumfahrtprojekt und die erste Ballonsonde, die zur Erforschung der Marsatmosphäre und der Gewinnung von weiteren Marsdaten aus geringer Höhe eingesetzt wird.

Der ARCHIMEDES Ballon als „Mars-Eintrittsraumfahrzeug“

Bisher konnten wichtige Daten zur Marsatmosphäre und der Stärke des Restmagnetfeld des Mars nur aus der Satellitenperspektive oder von Robotern auf dem Marsboden aus vermessen werden. Mit einem relativ langsam aus großer Höhe zum Marsboden absinkenden Ballon könnten nun erstmals sowohl der genaue Atmosphärenverlauf wie auch das Restmagnetfeld genau vermessen und Bilder aus geringer Höhe gemacht werden. Das könnte zum Verständnis der Entwicklung des Mars von einem möglicherweise einst lebendigen zu dem jetzt mit hoher Wahrscheinlichkeit toten Planeten beitragen.

Die Verwendung eines Ballons bietet sich für den Mars an, da aufgrund der geringen Atmosphärendichte des Mars (etwa 10 mbar) ein Ballon im Weltraum nur auf einen Innendruck von größer als 10 mbar aufgeblasen werden muss, um bis zur Marsoberfläche voll aufgeblasen zu bleiben. Das ermöglicht eine leichte Ballonbauweise.

Der Ballon dient also als großer und gleichzeitig leichter Widerstandskörper. Weitere Bremsvorrichtungen wie zum Beispiel Fallschirme, wie sie bei früheren Konzepten vorgeschlagen wurden, entfallen.



Der ARCHIMEDES Marsballon mit dem integrierten Geräteträger nach dem Aufblasen kurz vor der Trennung vom gemeinsam genutzten Abstiegs- und Aufblasmodul des P5-A Orbiters

Da der Ballon groß und gleichzeitig leicht ist, wird bereits in Atmosphärenschichten von sehr geringer Dichte eine vergleichsweise hohe Abbremswirkung erzielt. Dieser Effekt ist sowohl technisch als auch wissenschaftlich sehr interessant: Zum einen heizt sich der Ballon auf diese Weise weniger auf, zum anderen kann die Atmosphäre auch in sehr viel größeren Höhen untersucht werden, als das bisher der Fall war. Natürlich begünstigt auch die im Vergleich zur Erde geringere Schwerkraft des Mars die Verwendung eines Ballons. Bei einem vergleichbaren Anflug auf die Erde wäre

die Geschwindigkeit gut doppelt so hoch, und die abzubauen kinetische Energie damit etwa viermal höher.

Die derzeitige Abschätzung der Massenbilanz der Marssonde ARCHIMEDES ergibt eine Gesamtmasse von 73 kg. Hinzu käme ein Antriebssystem zur Steuerung von ARCHIMEDES in eine Marseintrittsbahn, sodass die Gesamtmasse von ARCHIMEDES unter 100 kg betragen würde.

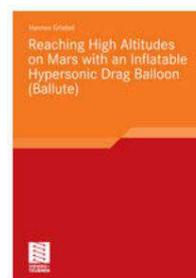
Umfangreiche wissenschaftliche Analysen und Untersuchungen der Universität der Bundeswehr –dem Hauptpartner der MSD- haben belegt, dass ein solcher Eintritt mit einem Ballon in die Marsatmosphäre möglich ist unter Verwendung verfügbarer Ballonmaterialien, wenn der Ballon zusammen mit dem Geräteträger groß und leicht genug ist. Dabei spielt der sogenannte „ballistische Koeffizient“ BC, das Verhältnis zwischen Masse und der Atmosphäre ausgesetzter Oberfläche, eine ausschlaggebende Rolle. Für das aus Ballon plus Geräteträger bestehende ARCHIMEDES Eintrittsraumfahrzeug ist $BC=0,5$ bei einem Ballondurchmesser von 10 m und einem Gesamtgewicht

Komponente	Masse (kg)
Ballon + Helium	18
Nutzlast	15
Bordelektronik + Instrumente	5
Nasenkappe mit Sensoren	10
Aufblas-System	40
Tanks, Ballonbehälter, Ventile, Steuerelektronik, System zum Freisetzen des Ballons	
Gesamt ARCHIMEDES	73

Ballon + Geräteträger von 73 kg, während für den Marsroboter CURIOUSITY dieser Wert mit etwa $BC=200$ 400x größer ist! Entsprechend kleiner ist die thermische Belastung des ARCHIMEDES Ballons beim Eintritt in die Marsatmosphäre.

Die Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen und des Konzeptentwurfs von ARCHIMEDES Projekts sind in einer Doktorarbeit zusammengefasst *) und wured durch eine Reihe von Boden- und Flugtests erhärtet, die später beschrieben werden. Mit dem derzeit in der Entwicklung befindlichen MIRIAM-2 Programm eines weitgehend mit ARCHIMEDES repräsentativen Fluggeräts tritt das ARCHIMEDES Projekt in eine entscheidende Phase.

***) Dr. Hannes Griebel: "Reaching High Altitudes on Mars With An Inflatable Hypersonic Drag Balloon (Ballute)", ISBN 978-3-8348-9911-8**



Da der Ballon möglichst perfekt sphärisch sein sollte und die Belastungen im verpackten und entfalteten Zustand überstehen muss, mussten neuartige Fertigungsmethoden für den Ballon entwickelt werden, die während der MIRIAM-2 Mission erprobt werden.

Die Möglichkeiten für wissenschaftliche Messungen während solch eines Missionsablaufs sind vielfältig und werden im nächsten Kapitel beschrieben.

Da eine Ballonmission wie ARCHIMEDES zur Erforschung des Mars zum ersten Mal unternommen wird, ist neben den wissenschaftlichen Messungen auch das Verhalten des Ballons selbst während des Eintritts und Abstiegs von großem Interesse. Da damit gerechnet werden muss, dass der Ballon keine stabile Fluglage einnimmt sondern "schwingt", muss außerdem die tatsächliche Lage des Geräteträgers im Raum ständig registriert werden, um die wissenschaftlichen Messungen in Bezug zu den Marskoordinaten setzen zu können. Aus demselben Grund muss auch der Bahnverlauf des Ballons genau vermessen werden.

Natürlich muss der Ballon mit dem Geräteträger erst einmal zum Mars befördert und dort entfaltet werden. ARCHIMEDES besteht deshalb neben dem Ballon mit dem Geräteträger noch aus einem komplexen System für Verstaueung, Entfaltung, Aufblasen und Freisetzen des Ballons. Dazu kommt ein Antriebssystem, das ARCHIMEDES nach der Abtrennung von seinem Trägersatelliten und vor Beginn des Aufblasprozesses auf eine Marseintrittsbahn steuert.

Die wissenschaftlichen Instrumente von ARCHIMEDES

Bei bisherigen Marsmissionen wurden Messungen auf zwei verschiedene Arten vorgenommen: von den Mars in relativ großer Höhe umkreisenden oder am Mars vorbeifliegenden Sonden aus, oder von Robotern von der Marsoberfläche aus. Marsroboter durchqueren vor ihrer Landung auf dem Mars systembedingt in etwa 6 Minuten die Marsatmosphäre. Die dadurch entstehende hohe thermische Belastung und die damit verbundene Entstehung sehr heißen Plasmas verhindern kontinuierliche wissenschaftliche Messungen während der Durchquerung der Marsatmosphäre.

Demgegenüber bietet ARCHIMEDES die Möglichkeit von Messungen während einer Periode von mehreren Stunden in der hohen Marsatmosphäre zwischen etwa 90 und 140 km und bis zu einer Stunde in der Marsatmosphäre bis herunter zum Boden. Damit wird erstmals die Möglichkeit geboten, direkte Messungen über das gesamte Atmosphärenprofil von der Ionosphäre bis hinunter zum Boden vorzunehmen und so ein Profil der Atmosphärenströmungen und -Dichte über den gesamten atmosphärischen Höhenbereich zu gewinnen. Erstmals könnte auch der Verlauf des Restmagnetfelds des Mars gemessen werden. Außerdem besteht durch die geringe Aufheizung auch die Möglichkeit, vor und während des Abstiegs über ein Kristallglasfenster in der Nasenkappe hochauflösende Bilder vom Mars zu machen.

Auch für unser Wissen über die Erde kann die Erforschung der Marsatmosphäre wichtige Beiträge liefern. Denn viele Effekte, die auf der Erde durch andere Faktoren überlagert werden, können auf dem Mars -oder genauer in seiner Atmosphäre- ungestört beobachtet werden und uns dabei

helfen, Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Klima, Magnetfeld und Strahlung genauer zu verstehen.

ARCHIMEDES kann außerdem als Technologieträger eine neue Möglichkeit zur Erforschung von Planeten mittels Ballonen aufzeigen und das Potenzial des hierbei entwickelten Konzepts vorführen.

Auch für spätere bemannte Missionen zum Mars können die durch ARCHIMEDES vorgenommenen Messungen von Nutzen sein, da eine genaue Kenntnis der Marsatmosphäre erforderlich ist, um ein Fahrzeug möglichst punktgenau auf dem Mars absetzen zu können, was bei Errichtung einer Marsbasis sehr wichtig ist, bei der mehrere Missionen erforderlich sind, um die für eine bemannte Mission erforderliche Infrastruktur auf dem Mars zu errichten.

Die Mars Society Deutschland entwickelt wissenschaftliche Messgeräte nicht selber sondern bietet Wissenschaftlern mit dem ARCHIMEDES Projekt einen Geräteträger an, der in die Ballonoberfläche integriert ist und es damit zum ersten Mal erlaubt, kontinuierliche Vermessungen der Atmosphäre, die Aufnahme eines Profils des Restmagnetismus und hochauflösende Fotos in einer niedrigen Umlaufbahn, während des Eintritts in die Marsatmosphäre und während des relativ langsamen Absinkens des Ballons zur Marsoberfläche vorzunehmen.

Das Angebot für wissenschaftliche Messungen mit ARCHIMEDES ist deshalb von Anfang an auf großes Interesse bei Wissenschaftlern gestoßen, die sich von Messungen am Mars unter den von ARCHIMEDES angebotenen Bedingungen wissenschaftliche Erkenntnisse versprechen, die erst mit dem ARCHIMEDES Ballon Konzept möglich werden.

Anzahl und Art der wissenschaftlichen Instrumente sind bestimmend für die Auslegung des Geräteträgers und seiner Avionik.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass alle wissenschaftlichen Daten in Echtzeit zum Mars Orbiter gesendet werden müssen. Eine Speicherung von Daten für eine spätere Übertragung ist nicht möglich, da der Ballon mit dem Geräteträger relativ hart auf dem Marsboden landen wird mit etwa 50 m/s, sodass damit gerechnet werden muss, dass der Geräteträger dabei zerstört wird.

Die für ARCHIMEDES derzeit vorgesehenen wissenschaftlichen Instrumente und ihre wissenschaftlichen Zielsetzungen sind :

- **Atmos-B.** Die Kenntnis über Bestandteile und Dichte der Marsatmosphäre ist von Bedeutung für das Verständnis von Vergangenheit und Zukunft des Mars. Atmos-B ist ein



Wettersensorenpaket bestehend aus einem Thermometer, einem Barometer (Druck) und einem Hygrometer (Luftfeuchtigkeit). Dieses wissenschaftliche Instrument wird vom Finnischen Meteorologischen Institut (FMI) in Helsinki bereitgestellt. Das Instrument soll während seines Absinkens zum Boden ein

vollständiges Atmosphärenprofil aufnehmen. Die gewonnenen Druckdaten werden auch zur Bestimmung der Flugbahn beitragen.

- **Hochauflösende Kamera.** Hochauflösende Bilder vom Mars können bisher nur aus Umlaufbahnen oder vom Boden aus gemacht werden. Die Flugbahn des ARCHIMEDES Ballons wird es zum ersten Mal gestatten, hochauflösende Bilder auch aus geringeren Höhen zu bekommen. Dafür wird ARCHIMEDES mit einer hochauflösenden Kamera ausgerüstet. Diese Kamera wird vom DLR in Berlin-Adlershof beigesteuert werden. Die Kamerabilder können auch zur Bestimmung der Flugbahn des Ballons beitragen, da die Oberfläche des Mars durch bisherige Aufnahmen gut bekannt ist. Da die Bandbreite der Datenübertragung zum Mars Orbiter begrenzt ist, wird eine Bildverarbeitung bereits in Echtzeit an Bord des Geräteträgers vorgenommen und nur eine begrenzte Anzahl interessanter Bilder zum Mars Orbiter übertragen
- **Magnetometer.** Der Mars hatte höchstwahrscheinlich einstmals, wie die Erde, einen flüssigen Eisenkern und damit ein Magnetfeld. Ein Magnetometer zur Messung von räumlichen Änderungen im residualen Krustenmagnetfeld und zum Studium der Wechselwirkung des Planetenkörpers mit dem Magnetfeld des Sonnenwindes. Während seines Absinkens zum Boden wird ARCHIMEDES ein vollständiges Profil der Magnetosphäre aufnehmen und damit unser Wissen um den Mars erweitern. Das Magnetometer wird vom Institut für Geophysik und Extraterrestrische Physik der TU Braunschweig kommen
- **3-Achsen Präzisions-Beschleunigungsmesser.** ARCHIMEDES bietet eine wissenschaftlich besonders interessante Gelegenheit zur Messung der Hochatmosphäre des Mars oberhalb von etwa 140 Kilometern. Dazu wird der Geräteträger mit einem Präzisions-Beschleunigungsmesser ausgerüstet werden, der bereits ab dieser Flughöhe Messungen der Abbremsung des Ballons durch die dünne Atmosphäre vornehmen kann. Über die bekannten aerodynamischen Eigenschaften eines Flugkörpers lassen sich so Rückschlüsse auf die Dichte der durchflogenen Atmosphäre ziehen. Außerdem werden die Daten der Beschleunigungsmesser auch Rückschlüsse auf den Verlauf der Flugbahn erlauben. Damit wäre ARCHIMEDES bereits ein Teilerfolg, selbst wenn der Ballon beim Eintritt in die Marsatmosphäre verloren ginge.
- **COMPARE Hyperschall Messinstrument.**



COMPARE (hier die Version für MIRIAM-2)

Von besonderem Interesse ist die Gewinnung von Erkenntnissen über das

Verhalten des Ballons während des Eintritts und der Durchquerung der Atmosphäre im Hyperschallbereich. Ein Instrumentenpaket namens COMPARE, gebaut vom Institut für Raumfahrtssysteme der TU Stuttgart, soll deshalb die Aufheizung im Hyperschall-Verdichtungsstoß sowie den Staudruck während des Eintritts in die Marsatmosphäre messen.

- **Radio-Ranging Experiment.** Die Kenntnis der genauen Flugbahn des Ballons ist von großer Wichtigkeit, um die wissenschaftlichen Messungen möglichst genau einem bestimmten Punkt in Form von Koordinaten und Höhe zuordnen zu können. Über ein sogenanntes Radio-Ranging Experiment kann die Entfernung zwischen Ballon und Mars Orbiter bestimmt werden. Da die Flugbahn des Orbiters und deren zeitlicher Verlauf genau bekannt sind, kann hierdurch die Flugbahn zusätzlich genauer rekonstruiert werden
- **Lagemess-Sensoren.** Für die Zuordnung der von den Instrumenten gemessenen Daten ist es wichtig, die genaue Lage des Instrumententrägers zum Zeitpunkt jeder Messung zu kennen und der Messung zuordnen zu können. Da der Ballon höchstwahrscheinlich eine Taumelbewegung ausführen wird, muss mittels Lagemess-Sensoren kontinuierlich die Lage des Geräteträgers im Raum gemessen werden
- **Ballon-Sensorik.** Der Ballon wird während seiner Mission nicht dauernd seine ideale sphärische Form beibehalten und sich aufgrund des aerodynamischen Einflusses verformen. Die Ballonhaut kann auch in Schwingungen geraten (siehe hierzu den Bericht zum MIRIAM-2 Ballon). Deshalb wird der Ballon mit Sensoren ausgerüstet sein, die es gestatten, die Ballonverformungen zu messen. Videoaufnahmen hierzu, wie sie für MIRIAM-2 vorgesehen sind, sind für ARCHIMEDES aufgrund der geringen zur Verfügung stehenden Bandbreite der Datenübertragung zum Mars Orbiter jedoch nicht möglich
- **Radar-Höhenmesser.** Eventuell wird mittels eines Radar-Höhenmessers der Abstand des Ballons zum Marsboden gemessen, um hierdurch noch zusätzliche Daten zur genauen Bahnbestimmung zu gewinnen

Die ARCHIMEDES Marsmission

Anforderungen an die Mission

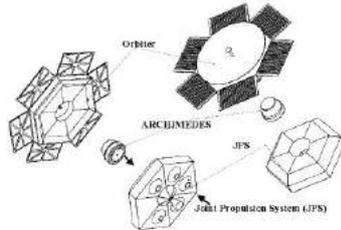
Bisher durchgeführte wissenschaftlichen Analysen und Untersuchungen zum ARCHIMEDES Konzept zeigten keine prinzipiellen physikalischen Hinderungsgründe für die geplante Mars-Ballonmission

- Die maximalen aerodynamischen Kräfte beim Eintritt in die Marsatmosphäre sind mehr als eine Größenordnung geringer als der Überdruck des Ballons
- CFD-Untersuchungen (Computational Fluid Dynamics) am Institut für Thermodynamik der UniBW München haben gezeigt, dass ein Ballon von 10 m Durchmesser mit einem integrierten Geräteträger die beim Eintritt in

die Marsatmosphäre auftretende Wärme ohne große Aufheizung abstrahlen kann und anschließend genügend langsam zur Marsoberfläche absinkt, um währenddessen wissenschaftliche Messungen auszuführen

Missionsbedingte Anforderungen:

- Der Zeitraum zwischen dem Start der Trägersonde von der Erde bis zum Erreichen der Marsumlaufbahn kann bis zu 18 Monaten lang sein. Das ergibt sich aus der eigentlichen Flugdauer zum Mars plus dem Zeitraum, den die Marssonde in einer elliptischen Erdumlaufbahn verbringen muss, um die geeignete Konstellation Erde-Mars für den Start zum Mars abzuwarten
- Der Eintrittswinkel des Ballons muss genau vorherbestimmt werden können. Möglichst mit einer Genauigkeit von einigen Zehntel Grad. Dazu ist eine sehr genaue Ermittlung und Korrektur des Bahnverlaufs für den Ballon erforderlich, bevor er zu seinem freien Eintrittsflug vom Aufblas- und Bahnkorrektursystem getrennt wird
- Der Ballon trifft mit einer relativ hohen Geschwindigkeit von etwa 50 m/sec auf dem Boden auf, alle wissenschaftlichen Messdaten müssen also noch während des Abstiegs zu der den Mars umkreisenden Sonde gesendet werden, da zu erwarten ist, dass der Geräteträger beim Aufprall auf der Marsoberfläche funktionsunfähig wird.
- Der Ballon muss die beim Eintritt in die Marsatmosphäre auftretende Erwärmung auf etwa 250° C aushalten, ohne dass die wissenschaftlichen Zielsetzungen der Mission gefährdet werden.



Leistungs-Anforderungen:

- Entwicklung und Fertigung eines 10-m Ballons mit der erforderlichen Genauigkeit und Widerstandsfähigkeit, der den langen Transport zum Mars, Entfaltung, Aufblasen und Marseintrittsmission übersteht. Das ist im Wesentlichen eine materialtechnische und verarbeitungstechnische Aufgabenstellung
- Verstaueung des Ballons auf möglichst engem Raum, wobei gleichzeitig sichergestellt bleiben muss, dass der Ballon nach einer langen Verstauezeit von bis zu 18 Monaten seine Dichtigkeit erhält, entfaltet und aufgeblasen werden kann
- automatische Entfaltung und das Aufblasen des Ballons ohne menschliches Eingreifen im Weltraum auf einen Innendruck von etwa 20 mbar
- Beherrschung der Funkstrecken zur Datenübertragung in Echtzeit zum Mars Orbiter mit minimaler Leistung

Der Ursprung: Mitflug zum Mars mit der AMSAT P5-A Marssonde

Zu Beginn des ARCHIMEDES Programms war geplant, ARCHIMEDES in enger Zusammenarbeit mit der deutschen Amateurfunk-Organisation AMSAT zu entwickeln. AMSAT hat bereits mehrere Erdtrabanten entwickelt und gestartet, unter anderem ihren Satelliten P3-D. Abgeleitet vom P3-D wollte die AMSAT eine Marssonde entwickeln, die P5-A genannt wurde. Aufgrund der engen und freundschaftlichen Kontakte zwischen der Mars Society Deutschland und Professor Meinzer von der AMSAT wurde 2002 beschlossen, die Marsballon Sonde ARCHIMEDES, die zu der Zeit bereits bei der MSD projektiert wurde, als primäre Nutzlast der P5-A Marssonde vorzusehen. ARCHIMEDES sollte für einem 10-m Ballon etwa 80 kg wiegen, was als Nutzlast für den P5-A akzeptabel war. Die Auslegung des P5-A als sechseckiger symmetrischer Satellit mit zentral angeordnetem Antriebssystem bot gute Voraussetzungen für eine Integration von ARCHIMEDES in den P5-A.

Der AMSAT P3-D Satellit mit Professor Meinzer und Peter Gülzow. Das mittige Antriebssystem ist klar zu erkennen. Die um den Zentralkörper herum angeordneten Sonnenpaddel sind noch nicht montiert



Die AMSAT hatte zuvor ihre Satelliten kostenlos als zusätzlicher Passagier auf der Ariane mitfliegen können, wenn deren Nutzlastkapazität dies zuließ. Zum damaligen Zeitpunkt bestanden noch gute Aussichten, über eine kostenlose Mitflugmöglichkeit mit einer Ariane 5 den P5-A mit ARCHIMEDES in eine elliptische Erdumlaufbahn zu transportieren, von wo aus dann der P5-A mit ARCHIMEDES aus eigener Kraft den Mars erreicht hätte. Damals wurde sogar schon ein Start für 2010 anvisiert!

Leider bietet der Betreiber der Ariane –ARIANESPACE- aus kommerziellen Gründen diese kostenlose Mitflugmöglichkeit heutzutage nicht mehr an. Außerdem hat sich der erforderliche Änderungsumfang am AMSAT P3-D für eine Mission zum Mars als umfangreicher herausgestellt als ursprünglich angenommen.

Deshalb ist eine gemeinsame AMSAT/Mars Society Deutschland Mission sehr unwahrscheinlich geworden. **Grundsätzlich könnte jedoch jede Marssonde, die den erforderlichen Platz und etwa 100 kg Nutzlast „übrig hat“, ARCHIMEDES mitnehmen zum Mars und dort aussetzen.** Der Entwurf von ARCHIMEDES würde hierdurch nicht betroffen und die durchgeführten Boden- und Flugtests würden ihre Gültigkeit bewahren.

Missionsablauf

ARCHIMEDES wurde ursprünglich so ausgelegt, dass der Ballon und alle sonstigen für die Ballon-Marsmission erforderlichen Elemente im Antriebsmodul der Marssonde P5-A der AMSAT untergebracht werden konnten. ARCHIMEDES hätte außerdem das Antriebsmodul des P5-A, das vom P5-A nach Erreichen der Marsumlaufbahn nicht mehr benötigt wird, zum Abstieg in eine Marseintrittsbahn

verwenden können. Zu diesem Zweck legte die AMSAT das Antriebsmodul –„Joint Propulsion System“ genannt- so aus, dass es in der Marsumlaufbahn abgetrennt werden konnte.

Wie im vorigen Kapitel ausgeführt wurde, könnte ARCHIMEDES jedoch bei vorhandener Reserve an Stauraum und zusätzlicher Masse auch mit anderen Marssonden mitfliegen.



ARCHIMEDES trennt sich von dem in der Marsumlaufbahn verbleibenden P5-A

Falls ein anderer Trägersatellit für ARCHIMEDES benutzt wird, würde ARCHIMEDES gegebenenfalls einen eigenen Antrieb erhalten, um aus der Satellitenumlaufbahn in eine Marseintrittsbahn steuern zu können. Die hierfür erforderliche Antriebsleistung ist aufgrund des begrenzten Gewichts von ARCHIMEDES -73 kg nach den jetzigen Berechnungen- relativ gering und würde das Gewicht von ARCHIMEDES um nicht mehr als etwa 10 bis 20 kg erhöhen.



Die ARCHIMEDES Marsmission würde, unabhängig vom Trägersatelliten, folgendermaßen ablaufen:

- Der Trägersatellit mit ARCHIMEDES wird als zusätzlicher Passagier zum Beispiel einer Ariane 5 Mission in eine elliptische Erdumlaufbahn befördert und dort ausgesetzt in eine „Parkbahn“, in der der Trägersatellit solange verweilt, bis eine günstige Konstellation Erde-Mars erreicht wird. Das kann bis zu einem Jahr dauern.
- Dann fliegt der Trägersatellit mithilfe seines Antriebssystems zum Mars und schwenkt dort in eine Marsumlaufbahn ein. Der Flug zum Mars wird etwa 6 Monate dauern.
- Nach Erreichen der vorgesehenen Marsumlaufbahn wird der Bahnverlauf genau vermessen, damit der geeignete Zeitpunkt für das Aussetzen von ARCHIMEDES bestimmen zu können
- Dann wird ARCHIMEDES zusammen mit dem Antriebsmodul des P5-A ausgesetzt und dessen Bahnverlauf wiederum genau vermessen, da durch die Trennung der bisherige Bahnverlauf leicht beeinflusst werden kann. Daraus müssen die Eintrittsgeschwindigkeit und der Eintrittswinkel mit großer Genauigkeit berechnet werden. Das kann mehrere Tage oder sogar Wochen dauern.

- Neben der gewünschten Abstiegs- und Eintrittsbahn zum Mars müssen auch die erforderlichen Bedingungen für das Tageslicht in der Eintrittsgegend, die Sichtbarkeit des P5-A Orbiters von ARCHIMEDES aus und die Sichtbarkeit des Orbiters von der Erde aus berücksichtigt werden
- Darauf basierend wird der Impuls berechnet und der Zeitpunkt, zu dem ARCHIMEDES in die gewünschte Marseintrittsbahn gesteuert wird
- Jetzt befindet sich das Antriebsmodul mit ARCHIMEDES auf seiner endgültigen Eintrittsbahn
- Als nächster Schritt wird nun der Ballon mit seinem integrierten Geräteträger aus seinem Transportbehälter freigegeben
- Dann wird der Ballon schrittweise aufgeblasen mithilfe der Aufblasvorrichtung
- Der Ballon mit dem Geräteträger wird entfaltet und mit Helium auf einen Innendruck von etwa 20 mbar aufgeblasen
- Anschließend wird der Ballon vom Antriebsmodul und damit vom Aufblähsystem getrennt und seine wissenschaftliche Mission beginnt
- Das Antriebsmodul mit dem Ballonbehälter und dem Aufblähsystem entfernt sich vom Ballon und verbrennt in sicherer Entfernung in der Marsatmosphäre

Nach der Trennung von ARCHIMEDES verbleibt der Trägersatellit in seiner Marsumlaufbahn, empfängt die Daten von ARCHIMEDES und leitet sie weiter zur Erde.

Die Flugbahn des Ballons ist so gewählt, dass der Ballon erst nach mehrfacher Durchquerung der oberen Marsatmosphäre in die Marsatmosphäre eintritt und absteigt. Dadurch wird eine übermäßige thermische Belastung des Ballons vermieden. Gleichzeitig wird dadurch eine längere Missionszeit erreicht.

Der Abstieg durch die Atmosphäre zum Marsboden kann bis zu 60 Minuten betragen.

Von der Trennung des Ballons vom Antriebsmodul ab bis zum ersten Marsatmosphären-Durchflug besteht die Möglichkeit, über den Satelliten Kontakt mit ARCHIMEDES zu halten. Das ist von Vorteil, da die Daten der Beschleunigungsmesser und möglicherweise auch Bilder vom Anflug direkt übertragen werden können, so dass diese Daten selbst bei einem späteren unplanmäßigen Verlauf der Mission zur Verfügung stünden, sodass dessen Ursache später rekonstruiert werden kann.

Forschung für das ARCHIMEDES Programm

Verhalten des Ballons unter aerodynamischer und thermischer Belastung

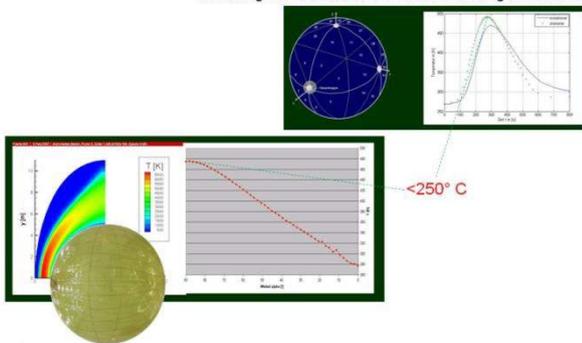
Die Auslegung von ARCHIMEDES, und damit von den Flugtestgeräten MIRIAM-1 und MIRIAM-2, orientiert sich an

den theoretischen Untersuchungen und Tests zur Flugbahn des Ballons, den Belastungen beim Eintritt in die Atmosphäre, dem Verhalten der zu verwendenden Ballonmaterialien und deren Verarbeitungsanforderungen, sowie den Anforderungen zum Verstauen, Ausbringen, Aufblasen und Freisetzen des Ballons in einer geeigneten Marseintrittsbahn. Die Untersuchungen gliedern sich dementsprechend in drei Entwicklungsstränge:

- Verhalten des Ballons bei Eintritt in die Marsatmosphäre und Abstieg
- Materialuntersuchungen
- Hardware und Software.

Parallel dazu wird am Institut für Raumfahrttechnik der UBW die Detailplanung der eigentlichen Mission verfeinert.

Ermittlung der maximalen thermischen Belastung des Ballons

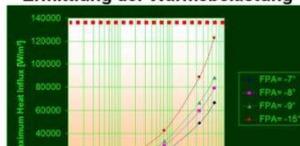


Belastung und Verhalten des Ballons im Hyperschallbereich beim Eintritt in die Marsatmosphäre und Abstieg zur Marsoberfläche

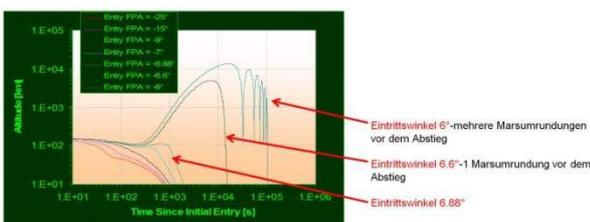
Die Untersuchung der aerodynamischen und thermischen Belastungen, denen der Ballon beim Eintritt in die Marsatmosphäre ausgesetzt ist, wurde bereits im Dezember 2003 begonnen am Institut für Thermodynamik der UBW München mit Hilfe eines Hyperschall CFD-Programms (Computational Fluid Dynamics) des DLR in Braunschweig. Um die entsprechenden Strömungsbedingungen berechnen zu können, muss außerdem die Flugbahn während des Eintritts sehr genau vorausberechnet werden.

Zusätzlich muss neben der Flugbahn des Ballons auch die Flugbahn des den Mars umkreisenden Orbiters berücksichtigt werden, da eine Datenübertragung zum Boden nur möglich ist, wenn der Ballon sich im Sichtbereich des

Ermittlung der Wärmebelastung



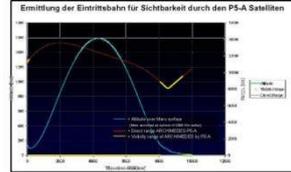
Ermittlung des für eine zulässige thermische Belastung erforderlichen Eintrittswinkels



Orbiters befindet. Ein solches Programm wurde am Institut für Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr in

München erstellt und in einen vorhandenen Missionssimulator integriert (dem sogenannten Radio Science Simulator). Damit wurde eine Simulation der Gesamtmision ermöglicht.

Der geringe ballistische Koeffizient führt zu einer relativ geringen thermischen Belastung des Ballons beim Eintritt in die Marsatmosphäre.



Der Eintrittswinkel des Ballons in die Marsatmosphäre muss sehr genau stimmen, um die gewünschte Eintrittsflugbahn zu erreichen.

Eine mehrfache Umrundung des Mars vor dem Eintritt wird nur mit Eintrittswinkeln zwischen 6° und 7° erreicht. Das erfordert eine sehr genaue Vorherbestimmung der Flugbahn des Ballons.

Ausschlaggebend für das Verhalten des Ballons bei Eintritt in die Marsatmosphäre ist der sogenannte "ballistische Koeffizient" des Ballons, das Verhältnis von Masse zu Oberfläche. Je kleiner der ballistische Koeffizient ist, umso weniger wird der Ballon beim Eintritt erwärmt.

Ein freies Schweben des Ballons in der Marsatmosphäre würde erfordern, dass die Gesamtmasse des Ballons von dem Auftrieb in der dünnen Marsatmosphäre kompensiert wird (das ARCHIMEDES-Prinzip). Das ist mit einer vertretbaren Ballongröße, der erforderlichen Masse der Nutzlast und bei Verwendung eines "sicheren", das heißt nicht brennbaren Füllgases nicht erreichbar. Es war deshalb früh klar, dass eine mit vertretbaren Mitteln durchzuführende ARCHIMEDES Mission nur mit einer „direct-to-ground“ Mission realisierbar ist, das heißt der Ballon steigt relativ schnell zur Marsoberfläche ab, da er schwerer ist als das von ihm verdrängte Atmosphärenvolumen.

Außerdem bedeuten starke Temperaturunterschiede für den Ballon und vor allem seine Haut große Druck- und Belastungsunterschiede. Gleichermäßen gravierend wirkt sich die Sonneneinstrahlung aber auch auf den Geräteträger aus.

Daher wurde in den Simulator am Institut später auch ein Modul zur Analyse des Thermalhaushalts des Ballons eingefügt.

Die Ergebnisse der zahlreichen und umfangreichen Untersuchungen und Analysen sind hier beispielhaft in einigen Diagrammen wiedergegeben. Damit wurde analytisch und rechnerisch nachgewiesen, dass der Ballon mit dem vorgesehenen Entwurf die thermischen Belastungen beim Eintritt in die Marsatmosphäre übersteht, selbst bei Verwendung von marktüblichem Material.

Versuche im Unterschallbereich

Zusätzlich zu den Untersuchungen im Hyperschallbereich fanden verschiedene Versuche zur Ermittlung des Verhaltens von Ballons im Strömungsfeld im Unterschallbereich statt. Unter anderem wurde ein 1-m Ballon von einem PKW geschleppt und vom Fernsehturm Hohenpeißenberg 2 aus ausgesetzt und sein Verhalten fotografiert. Dabei wurde ein chaotisches Strömungsverhalten des Ballons festgestellt. Das

bedeutet, dass das Verhalten des ARCHIMEDES Ballons in der Atmosphäre im besten Fall annäherungsweise vorherbestimmt werden kann, was zum Beispiel bedeutet, dass die tatsächliche Lage des Ballons während der Mission genau vermessen werden muss, um den wissenschaftlichen Daten die tatsächlichen Raumkoordinaten zuordnen zu können.

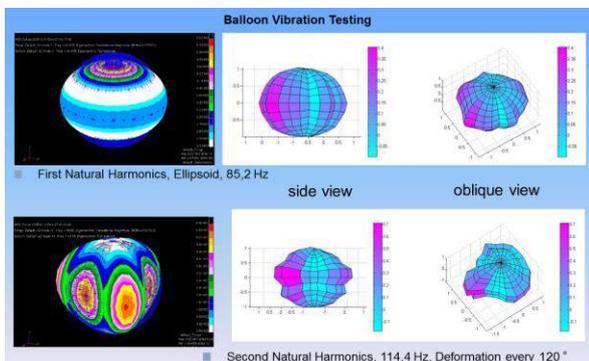
Ballonform und Aerothermodynamik im Hyperschall

Parallel hierzu wurden die Mission und die Flugbahn analysiert, ein FEM-Modell zur Berechnung der Verformung des Ballons im Hyperschall erstellt sowie die aerothermodynamische Auslegung der Nasenkappenbaugruppe vorgenommen. Die Ergebnisse flossen in die Materialauswahl ein. Die gewonnenen Daten wurden in verschiedenen Datensätzen erfasst und solange optimiert bis eine realistische und umsetzbare Konfiguration gefunden ist. Diese Konfiguration stand anschließend als neue Missionsgrundlage zur Verfügung.

Windkanalversuche

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Verhalten des Ballons im Hyperschallbereich könnten über Tests im Plasma- bzw. Stoßwellenwindkanal validiert werden. Solche Tests sind aufwendig und deshalb zurzeit nicht geplant. Von dem Flugversuch MIRIAM-2 werden jedoch schlüssige Ergebnisse hierzu erwartet.

Ballon-Vibrationsversuche



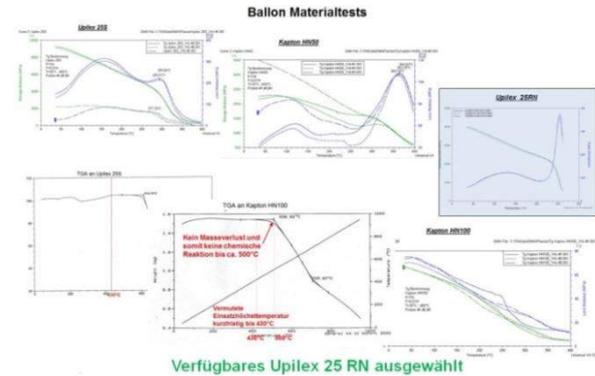
Ein Testballon wurde durch Anregung über eine Fläche, die den Geräteträger darstellen könnte, mit niederfrequenten Schwingungen angeregt, deren Frequenzen denen beim Eintritt in die Atmosphäre entsprechen. Die in den Abbildungen gezeigten Schwingungsbilder zeigen die Verformungen, jedoch zur Veranschaulichung stark übertrieben

Materialuntersuchungen, Materialauswahl und Ballonfertigung

Seit 2006 wurde eine ganze Serie von Material-Validierungstests durchgeführt, eine optimierte Herstellungsmethode für Testballone und den späteren

ARCHIMEDES Ballon etabliert, der Verpackungs- und Entfaltungsprozess des Ballons untersucht und optimiert.

Schließlich wurde als am besten geeignetes und verfügbares Ballonmaterial UPILEX 25 RN ausgewählt, das den Temperaturanforderungen der ARCHIMEDES Mission genügt und alle sonstigen Eigenschaften mitbringt wie Festigkeit,



Schweißfähigkeit, Formhaltigkeit, Versta- und Entfaltbarkeit. Mit diesem Material wird seither weiter gearbeitet und seitdem das Hauptaugenmerk auf die für eine reproduzierbare Herstellung des Ballons erforderlichen Fertigungsmethoden und -Werkzeuge gelegt.

Untersucht werden Materialproben und verschiedene Methoden der Verbindungs- und Nahttechnik. Verschiedene Materialproben geeigneter Ballonhautmaterialien wurden untersucht und ausgiebig getestet. Um das Lagerverhalten der Ballonhaut im Vakuum zu simulieren, ist eine mehrere Wochen andauernde Lagerung von Materialproben in der Vakuumkammer des Instituts für Raumfahrttechnik an der UBW durchgeführt worden. Dabei wurde geprüft, ob der Ballon nach langer Lagerzeit im Vakuum seine mechanischen Fähigkeiten verändert. Verschiedene Vorschädigungen und Verbundtechniken wurden zusammen mit unbehandelten Proben unter unterschiedlichen Testbedingungen getestet. Auf der Basis der Ergebnisse der Materialuntersuchungen zur Bestimmung der Belastungsgrenzen des Ballons wurde dann der Ballon für den Flugtestversuch MIRIAM-1 ausgelegt. Die Ergebnisse kommen auch für MIRIAM-2 zur Anwendung.

Verlauf des ARCHIMEDES Programms

Eine ARCHIMEDES Konfiguration, die die im Kapitel „Anforderungen an die Mission“ angeführten Anforderungen erfüllt, wurde zwischen 2001 und 2005 entwickelt.

Seit 2003 laufen Entwicklung und Test des Ballons und des Systems für Verstaung, Entfaltung und Aufblasen des Ballons. Das sind die technisch anspruchsvollsten Komponenten des ARCHIMEDES Systems und sind unabhängig vom Trägersatelliten gültig.

Als erstes wurde das System zur Verstaung und Entfaltung eines Ballons im Rahmen einer Parabelflug-Kampagne unter Schwerelosigkeitsbedingungen erprobt.

2006 wurde dann ein erster Raumflugtest durchgeführt, REXUS3-REGINA.

REXUS3 ist eine Höhenforschungsrakete der DLR-Moraba. REGINA war das erste in einem Raumflugtest unter Schwerelosigkeit erprobte ARCHIMEDES Testmodell und diente der Erprobung des Ballonbehälters mit einem verpackten Ballon, der im Weltraum unter Schwerelosigkeit und im Vakuum freigesetzt wurde. Dieser Versuch verlief erfolgreich trotz einer Kollision des Testkörpers mit der Rakete nach der Trennung, da über ein -wenn auch recht unscharfes- Foto die Ausstoßung des Ballons und damit die nachzuweisende Funktion zweifelsfrei nachgewiesen werden konnte.

Der nächste Schritt in der Entwicklung von ARCHIMEDES war ein weiterer, diesmal sehr anspruchsvoller Raumflugtest, diesmal mit dem verkleinerten aber funktionell weitgehend für ARCHIMEDES repräsentativen Raumfahrzeug REXUS4-MIRIAM-1. Mit der Entwicklung und dem Start von MIRIAM-1 im Oktober 2008 machte das ARCHIMEDES Projekt große Fortschritte. Bereits der MIRIAM-1 Entwurf basierte nämlich weitgehend auf den für ARCHIMEDES entwickelten Konstruktionsprinzipien.

MIRIAM-1 ist ein im Maßstab 1:2,5 verkleinertes funktionell bereits weitgehend repräsentatives Modell von ARCHIMEDES einschließlich des Ballons mit integriertem Geräteträger. MIRIAM-1 wurde im Oktober 2008 in Kiruna in Nordschweden an Bord einer REXUS4 Rakete der DLR-Moraba gestartet und in eine Höhe von 175 km befördert. Der Ballon sollte im Weltraum entfaltet, aufgeblasen und freigesetzt werden und dann in einer ungesteuerten Parabelflugbahn in die Erdatmosphäre eintreten und zur Erdoberfläche absteigen. Leider verlief die Mission nicht wie geplant aufgrund einer verzögerten Trennung von MIRIAM-1 von der Trägerrakete, sodass die MIRIAM-1 Mission nur ein Teilerfolg war. Deshalb ist nun für 2016 eine weitere Mission geplant, die aufgrund ihrer Ähnlichkeit mit der MIRIAM-1 Mission MIRIAM-2 genannt wurde.

Ziel des MIRIAM-2 Programms ist es, die Richtigkeit der wissenschaftlichen Analysen zum Verhalten des Ballons beim Eintritt in die dünne Marsatmosphäre zu belegen sowie den auch für ARCHIMEDES gültigen Entwurf der Systeme für Verstauung, Entfaltung, Aufblasen und Freisetzen des Ballons zu verifizieren. MIRIAM-2 wird auf den mit MIRIAM-1 gewonnenen Erfahrungen aufbauen und auch eine Reihe von Verbesserungen beinhalten, die die Betriebszuverlässigkeit und die wissenschaftliche Ausbeute der Mission gegenüber der MIRIAM-1 Mission erhöhen.

Der MIRIAM-2 Entwurf ist weitgehend repräsentativ für den ARCHIMEDES Entwurf. Die Ergebnisse der MIRIAM-2 Mission sollen deshalb die Gültigkeit des Konzepts von ARCHIMEDES und der ARCHIMEDES Marsmission belegen.

Der Hauptunterschied zwischen MIRIAM und ARCHIMEDES besteht in dem unterschiedlich großen Ballon (10m Durchmesser für ARCHIMEDES, 4 m für MIRIAM-2) und den dafür benötigten unterschiedlich dimensionierten Systemen für Verstauung / Entfaltung / Aufblasen / Freisetzen des Ballons. Natürlich müssten alle Materialien und Komponenten für die Marsmission raumfahrtqualifiziert sein und die lange Missionsdauer von bis zu über zwei Jahren unbeschadet und funktionsfähig überstehen.

Bei der Auswertung der Ergebnisse der MIRIAM-2 Mission im Hinblick auf die Marsmission muss berücksichtigt werden,

dass sich die Bedingungen für MIRIAM-2 beim Eintritt in die Erdatmosphäre erheblich von den am Mars zu erwartenden unterscheiden, da Ballondurchmesser, Eintrittswinkel, Eintrittsgeschwindigkeit und die Zusammensetzung von Marsatmosphäre und Erdatmosphäre für MIRIAM-2 und ARCHIMEDES unterschiedlich sind. Daher sind Rückschlüsse von Ergebnissen der MIRIAM-2 Mission auf Bedingungen am Mars nur über Analogien und erhebliche Um- und Hochrechnungen zu erreichen. Außerdem ist die Flugzeit des Ballons in der mit der Marsatmosphäre vergleichbar dünnen Erdatmosphäre kürzer als während der Marsmission.

Es ist deshalb nicht auszuschließen, dass nach Auswertung der MIRIAM-2 Mission noch Fragen offen bleiben, die vor der Inangriffnahme der ARCHIMEDES Marsmission beantwortet werden müssen. Dann könnte ein weiterer Flugtest –MIRIAM 3- erforderlich werden, zum Beispiel mit einem größeren Ballon und einer flachen Eintrittsbahn mit einer höheren Eintrittsgeschwindigkeit als bei MIRIAM-2. Solch eine Mission würde erheblich aufwendiger sein, da dann der Ballon nicht nur in eine größere Höhe sondern auch in einen flacheren Bahnverlauf gesteuert werden müsste. Neben der dafür erforderlichen größeren und leistungsfähigeren Rakete würde das auch die Datenübertragung zum Boden aufwendiger machen, da sich die Eintrittsbahn des Ballons weit vom Startplatz entfernen würde (bei MIRIAM sind das nur etwa 70 km).

Eine solche weitere Mission würde mit den der MSD und seinen Partnern zur Verfügung stehenden Mitteln wohl kaum mehr realisierbar sein und möglicherweise weitergehende institutionelle Unterstützung erfordern, zum Beispiel von ESA oder DLR.

Entwurf, Bau, Test und Qualifikation der ARCHIMEDES Marssonde erfordern auf jeden Fall eine Unterstützung und Finanzierung durch Institutionen und Industrie, um die raumfahrttechnischen Anforderungen erfüllen zu können. Ein erfolgreiches Flugtestprogramm wäre hierfür die Voraussetzung.

MIRIAM-2 als „Mini-ARCHIMEDES“

Die wesentlichen für MIRIAM-2 entwickelten Komponenten sind im Entwurf und funktionell identisch mit denen für ARCHIMEDES. Die ARCHIMEDES Komponenten müssen jedoch nach Raumfahrtstandards ausgelegt und qualifiziert werden, was zum Beispiel die Verwendung anderer Materialien, Bauteile und Prozeduren und aufwendigere Tests zur Folge haben kann.

Sowohl ARCHIMEDES als auch MIRIAM-2 bestehen aus folgenden Untersystemen:

- MIRIAM-B, dem Ballon mit dem in ihn integrierten Geräteträger, dem eigentlichen wissenschaftlichen Raumfahrzeug
- Den im sogenannten „Service Spacecraft“ zusammengefassten Untersystemen für Verstauung, Ausbringung, Entfaltung, Aufblasen und Freisetzung des Ballons
- Einem Antriebssystem für die Abbremsung von ARCHIMEDES aus der Satellitenbahn in die erforderliche Marseintrittsbahn

- Der Vorrichtung zur Trennung des Service Spacecraft vom Ballon nach dem Aufblasen des Ballons in der Marseintrittsbahn
- Die dazugehörige Avionik und Software für den Geräteträger und den Betrieb des Service Spacecraft und zur Übertragung der Daten der wissenschaftlichen Instrumente und der ARCHIMEDES Betriebsdaten zum Mars Orbiter
- Den für die Boden- und den Flugtest erforderlichen Systeme und Software
- Das Bodensystems für Empfang und Auswertung der vom Mars Orbiter zur Erde gesendeten Daten

Diese einzelnen Bestandteile werden in den folgenden Abschnitten für MIRIAM-2 beschrieben. Sie dienen gleichzeitig als Basis für den ARCHIMEDES Entwurf.

MIRIAM-B, das Werkzeug der Wissenschaft



Ballon mit Geräteträger

Der 4-m MIRIAM-2 Ballon und Instrumententräger (Pod). Der Geräteträger ist schlüssig mit der Ballonoberfläche in die Ballonhaut eingefügt. Der Ballon ist mit Markierungen für die photogrammetrische Auswertung des Flugverhaltens des Ballons versehen. Der ARCHIMEDES Ballon wird weitgehend baugleich sein bei einem Durchmesser von 10m

Die Entwicklung des Ballons stellt die zentrale Entwicklungsaufgabe im ARCHIMEDES Programm dar, denn noch nie ist ein Ballon im Weltraum aufgeblasen worden, noch dazu nach einer langen Reise von bis zu 18 Monaten im Weltraum unter Vakuumbedingungen in einem eng verpackten Zustand, und noch nie ist ein Ballon als aerodynamische Bremse eingesetzt worden.

Das Entwicklungsprogramm des Ballons hatte von Anfang an die Anforderungen der Marsmission im Blick. Das heißt, dass auch die Ballons für die Flugversuche MIRIAM-1 und MIRIAM-2 möglichst weitgehend den Anforderungen der Marsmission entsprechen sollten, obwohl die Anforderungen für die MIRIAM Missionen alleine weniger anspruchsvoll sind, da die Missionsdauer nur wenige

Minuten beträgt und der Zeitraum, währenddessen der Ballon verstaute ist, nur einige Tage.

Der Ballon für MIRIAM-2 wird deshalb mit Ausnahme seines kleineren Durchmessers schon weitgehend dem Marsballon entsprechen.

Der Ballon als Träger der wissenschaftlichen Experimente muss eine Reihe von Anforderungen erfüllen, über die in dieser Kombination kein bisher entwickelter Ballon verfügt. Die Auslegung des Ballons war ist deshalb ein iterativer Prozess, bei dem eine ganze Reihe sich zum Teil widersprechender Auslegungskriterien eine Rolle spielen und in zahlreichen Modellrechnungen miteinander in Bezug gesetzt werden müssen. Kriterien sind:

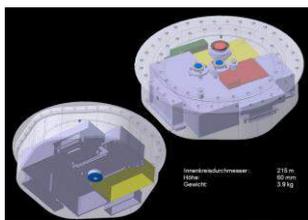
- Eine möglichst weitgehend sphärische Form des Ballons. Das stellt hohe Anforderungen an die Fertigung, die nur mit einer ausreichenden Anzahl einzelner Segmente (MIRIAM-2: 2x 32) und hoher Fertigungsgenauigkeit erreicht werden kann
- Verstaubarkeit in möglichst eng verpacktem Zustand bis zu 18 Monaten im Weltraum unter den Bedingungen von Vakuum und Strahlung, ohne dass sich die Eigenschaften des Ballons ändern
- die Art der Verpackung muss gewährleisten, dass der Ballon danach wieder voll funktionsfähig entfaltet und aufgeblasen werden kann
- Aushalten des beim Eintritt in die Marsatmosphäre entstehenden Überdrucks
- Beibehaltung der aerodynamisch glatten Oberfläche und der sphärischen Form auch nach dem Aufblasen am Mars
- Aushalten von Temperaturen bis zu 250 °C beim Eintritt in die Marsatmosphäre ohne Verformung des Ballons. Hierzu wurden aufwendige wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt
- Aushalten von Sonneneinstrahlung und Temperaturänderungen, denen der Ballon in der Mars-Umlaufbahn ausgesetzt ist
- Aushalten der mechanischen Belastungen beim mehrmaligen Durchqueren und Eintritt in die Marsatmosphäre entsprechend dem Missionsablauf
- die Masse des Ballons soll möglichst gering sein
- der Durchmesser des Ballons, seine Konstruktion und messtechnische Ausrüstung bestimmen den erforderlichen Stauraum sowie die erforderliche Gasfüllmenge und damit die Auslegung des Füllsystems
- Der Ballon muss möglichst weit einer sphärischen Form angenähert sein. Das stellt besondere Anforderungen an die Herstellung des Ballons
- Das Volumen des Ballons muss in gefaltetem Zustand möglichst klein sein, um ihn in der Trägersonde unterbringen zu können
- Die für gegebenes Ballonvolumen erforderliche Füllgasmenge und das zum Befüllen erforderliche Aufblassystem müssen kompatibel sein mit der von der Sonde zur Verfügung gestellten Volumen und der verfügbaren Gesamtmasse
- Dementsprechend muss das für den Ballon verwendete Material eine Reihe von sich zum Teil widersprechenden Anforderungen erfüllen

- Temperaturfestigkeit gegenüber der beim Eintritt in die Marsatmosphäre auftretenden maximalen Temperatur an der Ballonoberfläche
- ausreichende Festigkeit, um den Kräften in aufgeblasenem Zustand und beim Eintritt in die Marsatmosphäre standzuhalten
- hohe Festigkeit des Ballonmaterials, um mit möglichst dünnem Material eine möglichst niedrige Ballonmasse zu erreichen
- gute Verarbeitbarkeit des Ballonmaterials, um die Herstellung eines möglichst weitgehend sphärischen und dichten Ballons zu gewährleisten
- hohe Maßhaltigkeit des Ballonmaterials in verarbeitetem Zustand
- lange Lagerfähigkeit des Ballons in gefaltetem Zustand, damit der Ballon nach einem langen Verstauezeitraum von bis zu 18 Monaten noch sicher ausgebracht, entfaltet und aufgeblasen werden kann
- Widerstandsfähigkeit des Material gegenüber Vakuum und der Strahlung im Weltraum
- Verfügbarkeit des Ballonmaterials zu vertretbaren Kosten

Bereits für MIRIAM-1 und in verstärktem Maß für MIRIAM-2 wurde die Entwicklung des Ballons auf die Anforderungen für die ARCHIMEDES Marsmission ausgerichtet. Das betrifft alle Bereiche der Ballonentwicklung:

- Materialauswahl
- Aufblasmethodik („Windsock“)
- Die für eine gute sphärische Form erforderliche Anzahl von einzelnen Segmenten
- Die Einpassung des Geräteträgers und des Windsock in den Ballon
- Die für die Verbindung der einzelnen Segmente verwendete Schweiß- und Klebetechnik
- Die Fertigungsmethodik und –Genauigkeit

Die Geräteträger von ARCHIMEDES und MIRIAM-2 unterscheiden sich trotz ihres unterschiedlichen Missionsablaufs nur wenig.



Der MIRIAM-2 Geräteträger mit abnehmbarer Nasenkappe, die einen Zugang nach Einbau des Geräteträgers in den Ballon erlaubt. Die sphärische Form der Nasenkappe entspricht der Rundung des Ballons. Rechts der MIRIAM-2

Geräteträger mit einem Teil der wissenschaftlichen Instrumente

Der Geräteträger für den ARCHIMEDES Ballon wird dem von MIRIAM-2 ähneln. Er wird größer sein und, aber die Integration in den Ballon wird so bewerkstelligt werden, wie sie für MIRIAM-2 entwickelt und implementiert wurde.

Der Ballon mit seinem Geräteträger stellt ein voll autonomes Raumfahrzeug dar, das außer den wissenschaftlichen Instrumenten über alle für eine vollständige Autonomie erforderlichen Systeme verfügt. Der Geräteträger hat die folgenden Funktionen:

- Versorgung der wissenschaftlichen Experimente und der Bordelektronik mit elektrischer Leistung. Hierfür ist der Einsatz von Primärbatterien vorgesehen. Diese

können nicht wieder geladen werden, speichern aber mehr Energie pro Kilogramm und erfordern keinen Laderegler und Solarzellen nebst Struktur, was den Ballon entlastet und die Masse senkt und überdies die funktionelle Zuverlässigkeit erhöht im Vergleich mit wieder aufladbaren Batterien. Insoweit sind ARCHIMEDES und MIRIAM-2 identisch. In den Geräteträger für ARCHIMEDES wird zusätzlich, um die Primärbatterien des Geräteträgers zu entlasten, in der Nasenkappe eine eigene Primärbatterie eingebaut (Anmerkung: MIRIAM-2 hat keine abwerfbare Nasenkappe). Diese zweite Batterie wird die Instrumente so lange mit Energie versorgen, bis die Nasenkappe abgetrennt wird, und die Batterien des Instrumententrägers zum Einsatz kommen.

- Bordcomputer, der alle Datenverarbeitungsaufgaben des Geräteträgers übernimmt
 - Übernahme und Weiterverarbeitung der Daten der wissenschaftlichen Instrumente
 - Übernahme der Daten eingebauter Sensoren zur Messung von Temperaturen, Spannungen, Strömen, Beschleunigungen, Vibrationen, Ortung (GPS), dabei alleine 28 Temperatursensoren, die in den Ballon integriert sind. (Anmerkung: Art und Anzahl der Sensoren für den Ballon der Marsmission werden sich nach den Ergebnissen des MIRIAM-2 Flugversuchs richten)
 - Aufbereitung aller dieser Daten zu einem Datenstrom, der dem Sender zugeführt wird
 - Sender zum Übertragen aller dieser Daten in Echtzeit zum Boden bei MIRIAM-2, zum Satelliten für ARCHIMEDES. Um brauchbare Datenraten zu erzeugen, wird für ARCHIMEDES eine Übertragungsfrequenz von 145 MHz angestrebt. Damit wird die höchstmögliche Datenübertragungsrate erreicht. Die beträgt bei einer maximalen Sendeleistung von ca. 1-2 Watt, bei geschickter Codierung und einer maximaler Entfernung von ca. 25 000 Kilometern (Orbiter im Apozentrum) etwa 4 Kilobit pro Sekunde.
 - Antennen. Wegen der unbestimmten Lage des aufgeblasenen Ballons (nur für ARCHIMEDES: auch wegen der sich ändernden Position des die Daten vom Ballon empfangenden Satelliten) müssen für den Ballon (ARCHIMEDES: auch für den Satelliten) Rundstrahlantennen verwendet werden, um eine sichere Funkverbindung aufzubauen. Für MIRIAM-2 kann am Boden eine Empfangs-Antenne mit Richtwirkung verwendet werden, da die Flugbahn des Ballons ausreichend genau bekannt ist.
 - eine Funkbake, die zur Aufspürung des Geräteträgers nach der Mission sorgen soll, um die Bergung der Daten der Videokamera zu ermöglichen, die das Verhalten des Ballons gefilmt hat. (Anmerkung: für MIRIAM-2, nicht für ARCHIMEDES)
- In den Ballon integriert ist der wissenschaftliche Geräteträger mit den wissenschaftlichen Instrumenten und der für die Übertragung der wissenschaftlichen und technischen Daten erforderlichen Avionik. Der Geräteträger muss vielfältige Anforderungen erfüllen:
- Den Anforderungen der einzelnen wissenschaftlichen Experimente an Volumen, Platzbedarf, Gewicht, Leistungsbedarf, Umgebungstemperatur,

Datenverarbeitung und Datenübertragung zum Boden genügen

- Den Bahnverlauf des Ballons mithilfe von Beschleunigungssensoren und radiometrischen Messungen messen und zur Erde senden, damit die Messergebnisse der Instrumente mit dem Bahnverlauf korreliert werden können
- Die Position des Geräteträgers mit Bezug auf die Bahn des Ballons bestimmen und zur Erde senden, damit die Messergebnisse der Instrumente mit der Position des Geräteträgers zum Zeitpunkt der Messung korreliert werden können
- Alle diese Daten in Echtzeit an die den Mars umkreisende Sonde senden zur direkten Weiterleitung zur Erde oder zur Speicherung an Bord der Sonde für die spätere Übertragung zur Erde. Eine Speicherung von Daten im Geräteträger selbst wäre zwar möglich, die Daten würden jedoch durch das Auftreffen des Ballons auf dem Mars mit ziemlich hoher Geschwindigkeit höchstwahrscheinlich verlorengehen. Außerdem müsste dann die Stromversorgung des Geräteträgers verstärkt und damit dessen Gewicht vergrößert werden

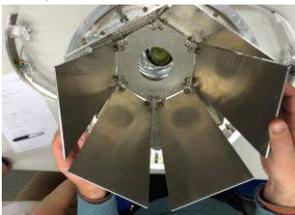
Die Implementierung aller dieser Anforderungen ist technisch mit den heute verfügbaren Technologien möglich, jedoch verlangen die Platz- und Gewichtseinschränkungen einen stark miniaturisierten Aufbau des Geräteträgers. Da der Geräteträger lange Zeit nicht aktiviert ist, muss die Stromversorgung über Batterien mit sehr hoher Lebensdauer erfolgen. Die Aktivierung des Geräteträgers darf erst am Mars erfolgen, etwa dann wenn ARCHIMEDES in die Marsabstiegsbahn abgebremst wird, da eine Versorgung von außen aufgrund der aero-thermodynamischen Anforderungen an den Geräteträger nicht möglich ist, der ja die thermischen Belastungen beim Eintritt in die Marsatmosphäre überstehen muss.

Das Service Spacecraft

Verstauung, Ausbringung, Entfaltung, Aufblasen und Aussetzen des Ballons

Die Auslegung der Systeme für Verstauung, Ausbringung, Entfaltung, Aufblasen und Freisetzen des Ballons hängt weitgehend von den Eigenschaften und dem Verhalten des Ballons während der verschiedenen Missionsphasen ab.

Der Ballon wird eng verpackt zum Mars transportiert. Der Ballonbehälter ist in Form einer „Blüte“ ausgeführt mit sechs „Blütenblättern“, die in gefaltetem Zustand den Transportbehälter bilden



Verstauung des Ballons in einem Behälter, aus dem er später vollautomatisch freigesetzt wird, um aufgeblasen zu werden (hier: der MIRIAM-2 Ballonbehälter). Die oben sichtbare „Scheibe“ simuliert den Geräteträger



Der Ballon muss so gefaltet und verpackt werden, dass er sich später wieder frei entfalten kann. Zu diesem Zweck ist er in zwei Paketabschnitten verpackt: Zu zwei Dritteln im Hauptpaket, zu einem Drittel in einer Vorentfaltungsstrecke.



Der MIRIAM-2 Ballonbehälter bei geöffneter „Blüte“. ARCHIMEDES Ballonbehälter und Auswurfmechanismen werden sehr ähnlich aussehen für den größeren ARCHIMEDES Ballon

In der ersten Stufe wird das Ballonpaket zusammen mit dem Instrumententräger in den freien Weltraum hinaus stoßen, wobei sich durch die Vorwärtsbewegung des Hauptpaketes die Vorentfaltungsstrecke öffnet. Anschließend bläst eine Niederdruck-Stufe des Aufblassystems eine kleine Menge Helium in die Vorentfaltungsstrecke ein, so dass diese sich weiten kann. Nach einer gewissen Zeit wird dann die Haupt-Stufe des Aufblassystems den Druck erhöhen und den Ballon vollständig aufblasen. Danach wird der Ballon vom Aufblassystem abgetrennt.

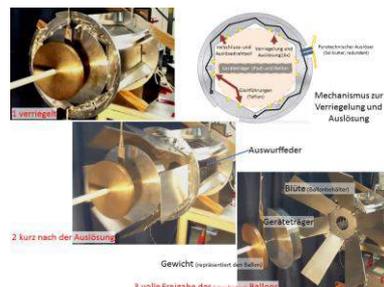


REGINA-REXUS vor dem Start

Das Aufblasen erfolgt über einen sogenannten „Windsock“. Das ist ein in den Ballon integrierter Aufblasschlauch mit seitlichen Löchern. Wenn der Ballon aufgeblasen und der Aufblasschlauch vom Aufblassystem getrennt wird, verschließt der im Ballon verbleibende Aufblasschlauch aufgrund des Innendrucks des Ballons automatisch die Aufblasöffnung. Dazu wurden umfangreiche Untersuchungen, Tests und Computersimulationen vorgenommen. Auf die erforderlichen Eigenschaften des Ballons und die Kriterien zur Auswahl des Ballonmaterials wurde im vorherigen Kapitel eingegangen.

Das Verhalten eines Ballons beim Aufblasen unter Schwerelosigkeit ist schwer vorhersehbar. Der optimale Entwurf muss durch Tests unterschiedlicher Auslegungen der Systeme und unterschiedliches stufenweises Aufblasen des Ballons ermittelt werden.

Der Behälter zum Transport des gepackten Ballons muss so konstruiert sein, dass der Ballon möglichst ungehindert anfänglich freigesetzt werden kann, sodass er sich erst einmal entfaltet, bevor der Aufblasvorgang beginnt. Das Konstruktionsprinzip wurde im Februar 2014 mit dem Flugtest REGINA verifiziert.

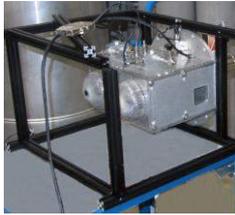


Im Februar 2014 durchgeführter Funktionstest des Ballonauswurfs mit der simulierten Masse von Ballon und Geräteträger

Der Auswurf des Ballons erfolgt in zwei Stufen, um

eine sichere Entfaltung des Ballons besonders nach langer Verstauung wie bei einer Marsmission zu gewährleisten. Ein Test dieser Funktion ist nur unter Schwerelosigkeit möglich.

Hierzu wurde Mitte 2005 ein erster Flugtest mit Parabelflügen mit kurzer Testdauer (ca. 30 sec) durchgeführt, dann mittels einer Höhenforschungsrakete Anfang 2006 im Rahmen des Projekts REXUS3-REGINA in einem Weltraumtest unter realen Umgebungsbedingungen.



Prototyp des Aufblassystems für den MIRIAM-2 Ballon. Die Funktion ist identisch mit der für ARCHIMEDES geplanten

Für die MIRIAM Flugteste wurde das REGINA-System für Verstaung und Auswurf des Ballons weiter entwickelt und um alle diejenigen Funktionen erweitert, die für das Aufblasen und die Freisetzung des Ballons erforderlich sind.

Das Aufblassystem muss das stufenweise Aufblasen des Ballons ermöglichen. Das kann z.B. durch mehrere parallele Ventile erreicht werden, die nacheinander oder gemeinsam geöffnet werden. Druckstöße während des Öffnens der Ventile müssen durch ein Druckausgleichsvolumen verringert werden. Das Aufblasen erfolgt über einen langen in den Ballon hineinragenden Füllschlauch mit genau berechneten seitlichen Löchern, den sogenannten "Windsock". Das ist ein bereits erprobtes Prinzip, muss aber auf die ARCHIMEDES und MIRIAM Ballons angepasst und über Aufblastests erprobt werden.

Das Freisetzen des Ballons nach dem Aufblasen ist demgegenüber ein relativ einfacher Vorgang. Nach dem Durchtrennen des Aufblasschlauchs sorgt der Überdruck im Ballon dafür, dass der Windsock sich selbsttätig verschließt und den Ballon dicht hält

Datenübertragung

Wegen der unbestimmten Lage des aufgeblasenen Ballons müssen für den Ballon Rundstrahlantennen verwendet werden, um eine sichere Funkverbindung aufzubauen.

Sendefrequenz und Sendeleistung sind unterschiedlich für MIRIAM-2 und ARCHIMEDES. Für ARCHIMEDES wird eine Übertragungsfrequenz von 145 MHz angestrebt. Damit wird die höchstmögliche Datenübertragungsrate erreicht. Die beträgt bei einer maximalen Sendeleistung von ca. 1-2 Watt, bei geschickter Codierung und einer maximaler Entfernung von ca. 25 000 Kilometern (Orbiter im Apozentrum) etwa 4 Kilobit pro Sekunde.

Energieversorgung

Sowohl für MIRIAM-2 als auch für die Mission ARCHIMEDES ist der Einsatz von Primärbatterien vorgesehen. Diese können nicht wieder geladen werden, speichern aber mehr Energie pro Kilogramm, halten die Ladung über lange Zeit und erfordern keinen Laderegler und Solarzellen nebst Struktur, was den Ballon entlastet und die Masse senkt.

Bahnkorrektursystem zum Erreichen der Balloneintrittsbahn

Für MIRIAM-2 ist kein Bahnkorrektursystem vorgesehen, da MIRIAM-2 eine Parabelflugbahn fliegt, die den Eintrittswinkel und die Eintrittsgeschwindigkeit bestimmt.

Für ARCHIMEDES wird demgegenüber ein eigenes Antriebssystem benötigt, um ARCHIMEDES in eine Marseintrittsbahn zu steuern. Das Antriebssystem muss nicht besonders aufwendig sein und kann mit bekannten Komponenten aufgebaut werden.

Der MIRIAM/ARCHIMEDES Ballon-ein High Tech Produkt

Das Ballon Technologie- und Testprogramm

Das Technologieprogramm für die ARCHIMEDES und MIRIAM Ballone besteht aus einer Reihe von Entwicklungsschritten, die zum Teil parallel ausgeführt wurden, um die Entwicklungszeit zu begrenzen:



1. Test-Ballons wurden zunächst vom Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtstrukturen der TU Stuttgart (Prof. Kröplin) hergestellt, das auch eine erste von der ESA finanzierte Studie zu Ballonmaterialien der ARCHIMEDES Mission durchgeführt hat.
2. Danach wurde die Technologie der Ballonherstellung nach München verlagert, da diese Technik auch maßgeblich von den Ergebnissen anderer in München durchgeführter Untersuchungen beeinflusst wurde.
3. Aufblas- und Entfaltungsversuche wurden zwischen 2003 und 2005 im Raumfahrttestzentrum der IABG sowie in der Olympiahalle München durchgeführt. Diese Hallen konnten vom ARCHIMEDES Team unentgeltlich genutzt werden. Aufblasversuche mit verschiedenen Paketformen wurden mit PE-Ballonen in 2004 und 2005 mit verschiedenen

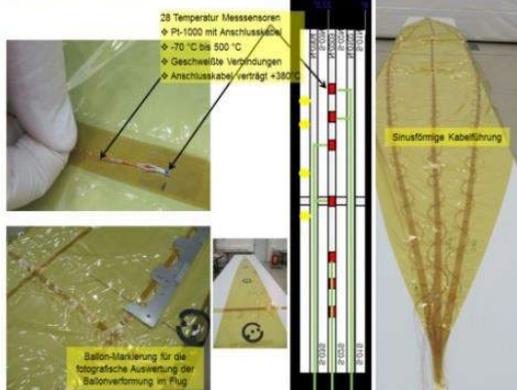


Entfaltungstests in der Münchener Olympiahalle
Bild: Mars Society Deutschland

großen Ballonen und verschiedenen Ballonmaterialien durchgeführt, wobei die Materialauswahl von Materialtests erfolgte, da hier erst einmal nur das Aufblasverhalten sowie verschiedene Fertigungs- und Faltmethoden von Ballons ausprobiert wurden. Hierfür wurden zum Teil große Räume benötigt, so fand einer der Aufblastests in der Münchner Olympiahalle statt.

4. Faltversuche wurden unter Reinraumbedingungen bei der IABG durchgeführt.
5. In Schleppversuchen wurde festgestellt, dass Ballons sich grundsätzlich unter Strömungseinfluss chaotisch verhalten, da schon kleinste Unterschiede in der Oberfläche eines Ballons und geringe
6. Unterschiede im Strömungsverlauf ausreichen, um den Ballon unkontrolliert zu bewegen. Das kann auch auf den Aufblasvorgang unter Schwerelosigkeit übertragen werden, da ein vollkommen symmetrisches Aufblasen eines großen Ballons unmöglich ist. Es ist also zu erwarten, dass der Ballon beim Aufblasen unter Schwerelosigkeit nicht vorhersagbare Ausweichbewegungen machen wird. Das muss bei der Auslegung berücksichtigt werden.
7. Weitere Ballontests wurden oder werden im Rahmen der Flugversuche durchgeführt
8. Materialtests zur Bestimmung des am besten geeigneten Ballonmaterials wurden bereits für die Auswahl des Ballonmaterials für den MIRIAM-1 Flugversuch durchgeführt. Dabei spielte auch die Verfügbarkeit von Materialien auf dem freien Markt eine Rolle. Diese Tests und ihre Ergebnisse sind weiter unten dargestellt. Ausgewählt wurde das Material UPILEX 25RN.
9. Verschiedene Fertigungs-Methoden und -Techniken wurden analysiert, um der gewünschten sphärischen Form möglichst nahe zu kommen und um den Geräteträger und den Aufblasschlauch (Windsock) möglichst störungsfrei, das heißt ohne Verwerfungen der sphärischen Ballonoberfläche, in die Ballonoberfläche einzufügen. Eine möglichst sphärische Form ist mit einem flächigen Material wie UPILEX 25 RN nur durch das Aneinanderfügen von möglichst vielen einzelnen Segmenten zu erreichen. Begrenzt wird die Anzahl der möglichen Segmente durch die erforderlichen Verbindungen der einzelnen Segmente untereinander. Schließlich wurde eine

Messung von Oberflächentemperatur und Verformung des Ballons



Fertigungsmethodik ausgewählt, bei der jeweils eine Halbkugel aus jeweils 32 einzelnen Segmenten zusammengefügt wird. Anschließend werden die beiden Hälften zusammengefügt und Geräteträger und Aufblasschlauch eingefügt.

10. Die Verbindung der einzelnen Segmente untereinander muss hohen Anforderungen an Dichtigkeit, Zugfestigkeit unter Überdruck, Formhaltigkeit, Dauerhaltbarkeit und Maßhaltigkeit genügen. Am besten erfüllt eine doppelseitige Naht diese Anforderungen. Dabei ist eine Schweißverbindung



vorzuziehen, bei der ein gewisses "Fließen" bei Dauerbelastung auftreten kann. Für den MIRIAM-1 Ballon wurden noch Klebeverbindungen angewendet, die für die kurze Missionsdauer sicherlich ausgereicht hätten. Für die Fertigung des MIRIAM-2 Ballons wurde aber bereits die Schweißtechnik angewendet und hierfür eine spezielle Schweißvorrichtung entwickelt. Ebenfalls für MIRIAM-2 wurden Fertigungsvorrichtungen entwickelt, die eine hohe Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit der Fertigung und Faltung des Ballons erlauben. Damit wird der MIRIAM-2 Ballon dem Marsballon schon sehr ähnlich sein und deshalb eine wertvolle Grundlage für die Entwicklung des Marsballons bilden.

11. Für das Einfügen von Temperatursensoren und der Antennen in die Ballonhaut wurden ebenfalls für MIRIAM-2 neue Techniken entwickelt, die erwarten lassen, dass die Sensoren und deren Zu- und Ableitungen unbeschädigt das Aufblasen sowie die Faltung und Verstauung des Ballons in seinem Transportbehälter überstehen. Zu diesem Zweck werden die Leitungen sinusförmig verlegt.
12. Da geplant ist, das Verhalten des Ballons mit einer in den Ballon blickenden Kamera zu dokumentieren, werden Markierungen innerhalb des Ballons auf die Ballonhaut aufgebracht, deren Bewegungen registriert werden und so einen Rückschluss auf die dynamischen Verformungen des Ballons unter Atmosphäreneinfluss erlauben. Die Abbildungen zeigen den Marker und einen Ausschnitt der Orte, an denen insgesamt 28 Marker aufgebracht werden.

Die Verpackung und Verstauung eines 10-m Ballons mit dem in ihn integrierten Geräteträger und seiner Ausrüstung mit Sensoren und Antennen stellen eine besondere Herausforderung dar, da der Ballon nach seinem Transport zum Mars ja auch wieder sicher entfaltet und aufgeblasen werden muss. Deshalb wurden von 2003-2005 eine Reihe unterschiedlicher Tests mit unterschiedlich großen Ballons durchgeführt, um zu optimalen Lösungen für die Faltung und Verpackung des Ballons zu finden.

Erste Verpackungs- und Entfaltungstests für den ARCHIMEDES Ballon wurden 2003 begonnen. Hierbei konnten die Räumlichkeiten des Raumfahrttestzentrums der

IABG in Ottobrunn kostenlos genutzt und auch die Herstellung von Ballonen in Reinräumen der IABG durchgeführt werden. Der spätere ARCHIMEDES Ballon muss sehr kompakt gefaltet werden, um eine optimale Ausnutzung des limitierten Platzes auf der P5-A Marssonde zu ermöglichen. Gleichzeitig muss jedoch auch eine reproduzierbare Faltung erreicht werden, die ein problemloses Aufblasen im Welttraum gewährleistet. Hierzu wurden verschiedene Faltmethoden getestet und diverse die



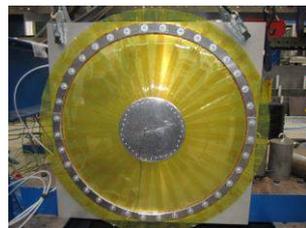
Schwerkraft kompensierende Plattformen zum Aufblasen des Ballonpakets entwickelt.

Einer der vielen Faltversuche zum Ermitteln des Verhaltens des Ballons während des Aufblasvorgangs

Für Ballonmodelle in voller Größe wurde uns die Münchner Olympiahalle zur

unentgeltlichen Nutzung überlassen. Ein wesentlicher erster Praxiserfolg war bereits die Integration eines Testballons in halber Größe (5 m Durchmesser) in das REGINA Modul für den REGINA Flugtest.

Belastungsversuch der Schnittstelle zwischen Ballon und Geräteträger für den MIRIAM-2 Ballon

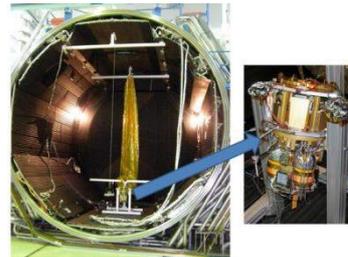


Die Schnittstelle zwischen Ballonhaut und Geräteträger ist besonders kritisch. Eine sehr genaue Einpassung des Geräteträgers ist erforderlich, um keine örtlich hohen Spannungen im Material zu erzeugen, die zu einem Riss der Ballonhaut führen könnten. Deshalb wurde eine spezielle Testeinrichtung entwickelt, mit der das Verhalten unter Belastung und die maximal zulässigen Kräfte ermittelt wurden.

Material-Entwicklungstests

Die Auswahl des Ballonmaterials für ARCHIMEDES erforderte umfangreiche Tests, um ein für die Marsmission geeignetes Ballonmaterial zu finden. Bereits für den MIRIAM-1 Flugtest sollte dieses Material soweit wie möglich den Anforderungen an die Marsmission erfüllen. Getestet wurde unter anderem die Temperaturfestigkeit, die entsprechend den Analysen für die Marsmission mindestens 300 °C betragen sollte. Auch die Reißfestigkeit, Verformbarkeit, Verarbeitbarkeit und Faltbarkeit sowie die Lagerfähigkeit wurden getestet. Als Ergebnis dieser Tests wurde das Material Upilex 25 RN ausgesucht, das alle diese Anforderungen in ausreichendem Maß erfüllt und darüber hinaus verfügbar und für die MSD erschwinglich war.

2006 wurde als Teil der Entwicklung von MIRIAM-1 der erste Test eines voll funktionsfähigen Ballons durchgeführt. Hierzu wurde der für MIRIAM-1 entwickelte 4-m Ballon einem Aufblastest unter Vakuumbedingungen in der 5-m Vakuumkammer der IABG unterzogen.



Erster Test eines kompletten Flugsystems – der 4-m Ballon von MIRIAM-1

Für den Test des ARCHIMEDES Ballons mit 10 m Durchmesser gibt es keine dafür geeignete

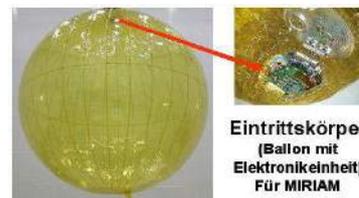
Vakuumkammer. Deshalb muss der 4-m Ballon von MIRIAM möglichst in allen seinen Eigenschaften dem späteren ARCHIMEDES Ballon entsprechen und auch entsprechend gefertigt und getestet werden. Deshalb wird der MIRIAM-2 Ballon einem sehr umfangreichen Test in der 5-m Vakuumkammer der IABG unterzogen, wobei der gesamte Aufblasvorgang simuliert wird.

MIRIAM-2 Ballon während des Tests im Februar 2014 in der 5-m Vakuumkammer der IABG



Der 4-m Ballon für MIRIAM-1 wurde bereits nach den Vorgaben der ARCHIMEDES Marsmission gefertigt, da der Ballon ja das Flugverhalten des ARCHIMEDES Marsballons in der dünnen Erdatmosphäre nachbilden sollte, wenn auch in verkleinertem Maßstab. Außerdem wurde das für MIRIAM-1 entwickelte Aufblssystem benutzt, das dem der Marsmission möglichst ähnlich sein sollte.

Für die Entwicklung und den Test des MIRIAM-2 Ballons wird dementsprechend ein Aufwand betrieben, wie er auch für



Eintrittskörper (Ballon mit Elektronikeinheit) Für MIRIAM

den ARCHIMEDES Ballon erforderlich ist, obwohl der MIRIAM Ballon bei weitem nicht den gleichen Bedingungen ausgesetzt ist. So

entfällt, verglichen mit der ARCHIMEDES Mission, die lange Lagerzeit, und die Missionsdauer des voll aufgeblasenen Ballons beträgt lediglich einige Minuten.

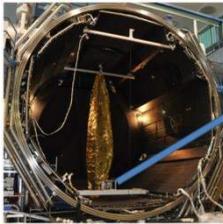
2007 wurde der MIRIAM-1 Ballon im Rahmen der Vorbereitung der REXUS4/ MIRIAM-1 Mission in der 5-m Vakuumkammer der IABG getestet, die der Mars Society Deutschland von der IABG kostenlos zur Verfügung gestellt wurde. Dabei handelte es sich um das Flugmodell sowohl des Ballons als auch des kompletten Fluggeräts mit den dazugehörigen Boden-Testgeräten.

Dieser Ballon entsprach bereits dem Marsballon in seiner grundlegenden weiter oben beschriebenen Konstruktion.

Für die im November 2016 geplanten MIRIAM-2 Mission wurde der Ballon aber wesentlich weiter entwickelt unter Berücksichtigung der Anforderungen an den Marsballon. Das betrifft besonders die neu entwickelte weiter oben beschriebene Schweißtechnik, die Integration von Sensoren und Antenne in die Schweißnähte und die genaueren und

besser reproduzierbaren Fertigungsverfahren und Prozeduren.

Ein erstes Entwicklungsmodell des MIRIAM-2 Ballons wurde im Februar 2014 wiederum in der 5-m Vakuumkammer der IABG getestet. Dabei kam ein funktionell repräsentatives Entwicklungsmodell des von der Universität der Bundeswehr neu entwickelten Aufblassystems zum Einsatz.



Die 5-m Vakuumkammer der IABG mit dem MIRIAM-2 Ballon und dem Aufblassystem

Fertigung des Ballons

Modell-Ballons wurden zunächst vom Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtstrukturen der TU Stuttgart (Prof. Kröplin) hergestellt, welches auch eine von der ESA finanzierte Studie zu Ballonmaterialien der ARCHIMEDES Mission durchgeführt hat. Danach wurde die Technologie der Ballonherstellung nach München verlagert, da diese Technik auch maßgeblich von den Ergebnissen anderer in München durchgeführter Untersuchungen beeinflusst wird.



MIRIAM-1 Ballon während des Aufblastests bei IABG

MIRIAM-1 Ballon während des Aufblastests bei IABG

Aufblasversuche wurden bereits mit PE-Ballonen in 2004 und 2005 durchgeführt. Diese Hallen konnten vom ARCHIMEDES Team unentgeltlich genutzt werden. Aufblasversuche mit verschiedenen Paketformen wurden bereits mit PE-Ballonen in 2004 und 2005 durchgeführt.

Die Fertigung des Ballons stellt eine besondere Herausforderung dar. Fertigungsgenauigkeit und –Ablauf müssen einerseits das Erreichen einer möglichst weitgehend sphärischen Form des Ballons gewährleisten und andererseits erlauben, die zahlreichen Sensoren, die Antenne, den Aufblasschlauch, die optischen Markierungen und den Geräteträger in die Ballonhaut zu integrieren. Gleichzeitig müssen die Maßhaltigkeit und lange Lagerfähigkeit des Ballons gewährleistet sein.

Die sphärische Form des Ballons wird durch eine Aufteilung in 32 gleiche Segmente für jeweils eine Halbkugel erreicht. Die beiden Halbkugeln werden anschließend am „Äquator“ miteinander verklebt, während die einzelnen Bahnen miteinander verschweißt werden über eine doppelte Schweißnaht, wie weiter oben dargestellt

Die Fertigung des MIRIAM-2 Ballons orientiert sich weitestgehend an den Anforderungen für den ARCHIMEDES Marsballon mit Ausnahme der unterschiedlichen Durchmesser (ARCHIMEDES: 10m, MIRIAM: 4m). Die Fertigung des Ballons erfolgt in Reinräumen und erfolgt in genau festgelegten Schritten und Prozeduren, um die Reproduzierbarkeit der Fertigung zu gewährleisten, ohne die

eine ständige Perfektionierung der Fertigung nicht möglich wäre. Die verschiedenen Schritte des Fertigungsablaufs für den Ballon sind in der nebenstehenden Abbildung dargestellt (hier für MIRIAM). Besondere Herausforderungen sind



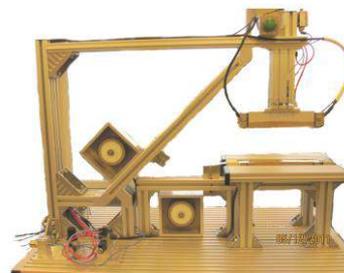
Fertigung des MIRIAM-2 Ballons im Reinraum der IABG



- das Erreichen einer fast perfekten Kugelform. Dafür werden 2x32 einzelne Bahnen miteinander verklebt (MIRIAM-1) bzw. verschweißt und anschließend über eine Äquatornaht miteinander verbunden
- Die Schweißtechnik zur Verbindung der Ballonbahnen. Es hat sich gezeigt, dass nur mit einem Schweißverfahren der Bahnen die erforderliche Maßhaltigkeit über einen längeren Zeitraum eingehalten werden kann.
- Das Einfügen des Geräteträgers und des Aufblasschlauchs (Windsock) an den beiden Polen des Ballons
- die Integration von Sensoren und Antennen mit ihren Zu- und Ableitungen in den Nähten
- die Faltmethodik für den Ballon, um eine lange Lagerzeit und anschließende sichere Entfaltung zu gewährleisten

Dabei müssen die Übergänge zwischen den einzelnen Bahnen, zum Geräteträger und dem Aufblasschlauch möglichst ohne jede Kante und Verformung verlaufen, um aerodynamische Verwirbelungen und Erwärmung zu vermeiden.

Für die meisten Fertigungsschritte wurden spezielle Fertigungsvorrichtungen entwickelt, zum Beispiel für das Schneiden und Verschweißen einzelner Bahnen miteinander, für das Koronieren (Oberflächenbehandlung vor dem Kleben bzw. Schweißen), und für die Faltung des Ballons vor dem Verstauen im Ballonbehälter des Fluggeräts.



speziell für MIRIAM-2 entwickelte Ballon-Schweißanlage

Die Fertigung und das Verpacken des Ballons müssen in Reinräumen vorgenommen werden, um Verschmutzungen zu vermeiden, die zu Undichtigkeiten oder Beschädigung des Ballons beim Falten und Verstauen entstehen könnten.

Das bisherige Flugtestprogramm

Im Rahmen des ARCHIMEDES Programms wurden bisher schon eine Reihe von Flugtests mit Komponenten für

ARCHIMEDES und MIRIAM sowie ein Raumflug-Simulationstest mit dem voll funktionsfähigen ARCHIMEDES Simulationsmodell MIRIAM-1 durchgeführt. Ein weiterer Flugtest MIRIAM-2 ist in Vorbereitung. Je nach der Schlüssigkeit der Ergebnisse des MIRIAM-2 Flugtests könnten darüber hinaus weitere Flugversuche erforderlich werden.

Parabelflüge



Zunächst geht der Airbus in einen extremen Steigflug.
Bild: NOVESPACE

O-G Flugtests im Airbus A-300

Zwischen dem 28. und 30. Juni 2005 fanden insgesamt drei Parabelflüge statt an Bord des von ESA und CNES für 0-g Parabelflüge ausgerüstetem und gemeinsam betriebenen

Airbus A 300. Jeder der Flüge beinhaltete 31 Parabeln. Bei diesen Flügen fliegt das Flugzeug eine exakte Wurfparabel nach, so dass sich für alle Gegenstände innerhalb des Flugzeugs für ca. 20 Sekunden die Schwerelosigkeit einstellt. Durchgeführt werden die Parabelflüge von der Firma "NOVSPACE" vom Flughafen Bordeaux Mérignac aus.

Für die Tests des Systems zur Verstauung und Vorentfaltung wurde in 5-m Testballon benutzt. Die Schwerelosigkeit ist bei diesem Test ein entscheidender Faktor, der auf der Erde nicht ohne weiteres simuliert werden kann. Wegen der kurzen möglichen Testzeit eignen sich für diese Tests besonders die Bedingungen, wie sie in Parabelflügen hergestellt werden können. Das Testprogramm wurde überaus erfolgreich abgeschlossen.



Das Trainingsfeld während der Vorbereitungen auf dem Gelände der UniBw-München

Diese erste Versuchsserie wurde von NOVSPACE zusammen mit der Mars Society Deutschland e.V., dem Institut für Raumfahrttechnik und dem Institut für Leichtbau der Universität der Bundeswehr München sowie mit Unterstützung



Das ARCHIMEDES Parabelflug-Team mit dem Flug-Kapitän während des Rückflugs nach Bordeaux - v.l.n.r.: Jens Birkel, Cpt. Gilles Le Barzic, Hannes S. Griebel, Klaus Bayler
Bild: ESA

der Firma IABG mbH in Ottobrunn durchgeführt. Dabei flog das Testmodell mit. Das ARCHIMEDES Team konnte hierbei untersuchen, ob der Auswurfmechanismus wie vorgesehen funktioniert. Hierbei wurden verschiedene Betriebsmodi und Fehlerfälle



Das ARCHIMEDES Testsystem beim Auslösen in der Schwerelosigkeit
Bild: ESA

simuliert, und Beobachtungen unternommen, die es zulassen, die mathematischen Modelle für den Auswurfvorgang zu verbessern, indem die Parameter des Vorhersagemodells an die Wirklichkeit angepasst werden können. Diese Modelle dienen zur Berechnung der Trennsequenzen und zur Bestimmung des optimalen Zeitpunkts für die Aktivierung des Aufblässystems.

REXUS 3-REGINA Raketenflugtest

Bei der Vorbereitung und Durchführung von REGINA (hier im Bild) wurden wertvolle Erfahrungen für Nachfolgetests gewonnen



Durch REGINA (RESidual Gas INflation test for ARCHIMEDES) sollte der Auswurfmechanismus des Ballons im Weltraum getestet werden und die Frage geklärt werden, wie die Ausbringung und Vorentfaltung Ballonpakets (mit Restgas) unter dem Vakuum des Weltraums bei gleichzeitig herrschender Schwerelosigkeit ablaufen wird. Diese Informationen werden für die spätere Ausbringung und das anschließende Aufblasen des ARCHIMEDES Ballons vor dem Eintritt in die Marsatmosphäre benötigt. Zusätzlich war REGINA ein entscheidender Test für das ARCHIMEDES Team bezüglich der Teamorganisation, die Zeitplanung und Aufgabenbewältigung.

Wiederum übernahm die UBW die Entwicklung und Fertigung des Flugtestgeräts. Die DLR-Moraba (Mobile Raketen Basis) stellte die Mitflugmöglichkeit auf einer REXUS 3, einer "Nike Improved Orion" Höhenforschungsrakete, zur Verfügung. Das Testsystem REGINA wurde in einem Zeitraum von sechs Monaten durch das ARCHIMEDES Team und die UBW München geplant und konstruiert. Das REGINA Modul enthielt einen PE Testballon und wurde über einen Ring mit 10 Kameras, die den Testverlauf beobachten sollten, in der Nutzlastsektion von REXUS 3 unmittelbar hinter der Nasenkappe integriert. Nach Absprennen der Nasenkappe sollte REGINA vom Kameraring getrennt werden und der Auswurf der Vorentfaltungsstrecke des Ballons ausgelöst werden. Der auf REXUS 3 verbliebene Kameraring sollte diesen Vorgang aufzeichnen und nach dem Zurückstürzen auf den Erdboden geborgen und die Daten ausgelesen werden.



Start der REXUS 3 Rakete mit REGINA vom SCC Esrange in Kiruna

Am 5. April 2006 um 7.56 Uhr startete REXUS 3 in den klaren Himmel von Kiruna über dem SCC Esrange Center. Wie

geplant erfolgte die Trennung der REGINA-Kapsel bei T + 66 Sekunden, drei Sekunden nach jojo-despin und sechs Sekunden nach der Nasenkappentrennung. REGINA begann unmittelbar mit der Datenübertragung und das Signal wurde

in guter Intensität erhalten, jedoch durch die Interferenz einer Störquelle beeinträchtigt.

Leider wurde der Raketentrieb nur drei Sekunden nach dem Aussetzen von REGINA abgesprengt. Dadurch erhielt das Nutzlastsegment einen Vorwärtsschub und prallte mit einer Geschwindigkeit von rund zwei Meter pro Sekunde auf das REGINA Modul, wobei vermutlich zwei Kameras funktionsunfähig wurden und REGINA aus dem Sichtfeld des Kamerarings geschleudert wurde. Der Auswurfvorgang konnte daher nicht beobachtet werden. Immerhin konnte die Kamerasektion geborgen werden und sieben der zehn Kameras konnten ohne Probleme ausgelesen werden. Der Unfallhergang wurde durch die weiteren Experimente auf REXUS 3, einen Beschleunigungsmesser sowie eine seitlich angebrachte Fischaugenkamera (RexCam) rekonstruiert.



Panorama von Nordschweden mit dem REGINA Modul bei einem Test im erdnahen Weltraum. Das Panorama wurde

aus Einzelaufnahmen eines Kamerarings auf der REXUS 3 Rakete zusammengesetzt



Nach genauer Auswertung aller vorhandenen Daten konnten dennoch wichtige Ergebnisse für das ARCHIMEDES Projekt gewonnen werden. Radar und optische Verfolgung bestätigten eine nominale Systemfunktion von REGINA bis zum Zusammenstoß sowie die Initiierung der Ausbringungssequenz des Ballonpakets exakt zum geplanten Zeitpunkt. Die erhaltenen Resultate sind als entscheidende Validierung des Flugsystems sowie den Betrieb zu werten, die damit für zukünftige Tests verwendet werden können. Ebenfalls konnten angestrebte Verbesserungen für weitere Missionstests definiert werden. Doch nicht nur für die Hard- und Software sowie für den Betrieb war REGINA ein Erfolg. Es war auch der erste große Test für das ARCHIMEDES Team selbst, der zeigte, dass trotz des straffen Zeitplans alle Aufgaben rechtzeitig erfüllt werden konnten.

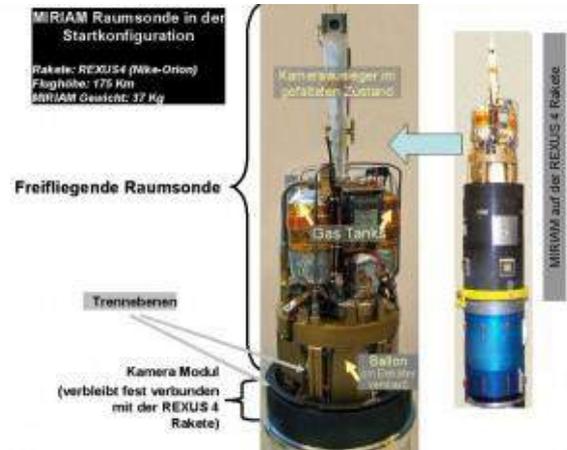
Zusätzlich konnte aus Einzelbildern des Kamerarings noch ein erstaunlich schönes Panorama konstruiert werden, welches das REGINA Modul hoch über Nordschweden zeigt. Besonderer Dank gilt hier dem DLR MoRaBa Team, dem gesamten SCC ESRANGE Personal für deren Unterstützung, dem REGINA Flight Operations Team sowie allen Mitgliedern des ARCHIMEDES Teams, die zum Projekterfolg beitrugen.

REXUS 4-MIRIAM 1 Weltraumtest

Der nächste Schritt in der Entwicklung von ARCHIMEDES war das Flugtestprogramm MIRIAM-1. In Erweiterung der Versuche mit den Parabelflügen und dem Raketentestprogramm REGINA sollten mit MIRIAM-1 die Funktion des Ballonsystems und das Verhalten des Ballons während des Eintritts in die dünne obere Erdatmosphäre unter Flugbedingungen gemessen werden. Die gewonnenen

umfangreichen Messdaten sollten Rückschlüsse auf das Verhalten des Ballons am Mars erlauben.

MIRIAM-1 ist ein im Maßstab 1:2,5 verkleinertes, aber in seinem Flugverhalten repräsentatives Modell von ARCHIMEDES. MIRIAM besteht aus



- dem eigentlichen Ballon mit dem Geräteträger und der dazugehörigen Elektronik zur Übertragung der Daten zur Erde. Die in der Elektronikeinheit mitgeführten Messinstrumente zur Vermessung der Atmosphäre und des Magnetfelds sind vergleichbar mit denen der Marsmission.
- dem für das Verstauen, den Transport in den Weltraum sowie Entfalten, Aufblasen und Freisetzen des Ballons im Weltraum außerhalb der Erdatmosphäre erforderlichen Systemen.

Aus den mit der MIRIAM-1 Mission gewonnenen Daten kann man Rückschlüsse auf die Marsmission ziehen und in bestimmten aerodynamischen Bereichen die Richtigkeit der theoretischen Grundlagen für die Berechnung des Eintritts und Abstiegs eines Ballons zum Mars belegen. Außerdem sollte die Funktion der Messinstrumente getestet werden. Gleichzeitig werden die Systeme für Aufbewahrung, Entfaltung, Aufblasen und Freisetzen des Ballons getestet.

Das Flugtestgerät wurde wiederum von der UBW entwickelt und hergestellt und bei der IABG getestet.

Planung der Mission

Ziel war es, im Weltraum den Ballon mit dem Instrumententräger auf einen Überdruck von etwa 20 mbar aufzublasen und den Ballon im freien Flug mit Videokameras zu beobachten, während er in die dünne obere Erdatmosphäre eintritt und beginnt, zur Erdoberfläche abzustiegen. Dabei werden Druck, Temperatur, Plasma, Form und Verhalten des Ballons, Magnetfeld, Atmosphärendaten fortlaufend gemessen und zur Erde übertragen.

MIRIAM-1 wurde am 22. Oktober 2008 auf dem Startzentrum in unmittelbarer Nähe der Stadt Kiruna in Nordschweden mit einer zweistufigen REXUS 4 Rakete der DLR-MORABA gestartet. Kiruna ist das Startzentrum der Schwedischen Raumfahrtbehörde, der ESA und der DLR-Moraba für Höhenforschungsprojekte mit mehreren Startrampen für große, mittlere und kleine Höhenforschungsraketen. Der Start von MIRIAM-1 wurde von der DLR-Moraba

durchgeführt, die dort alle dafür erforderlichen Einrichtungen bereithält.

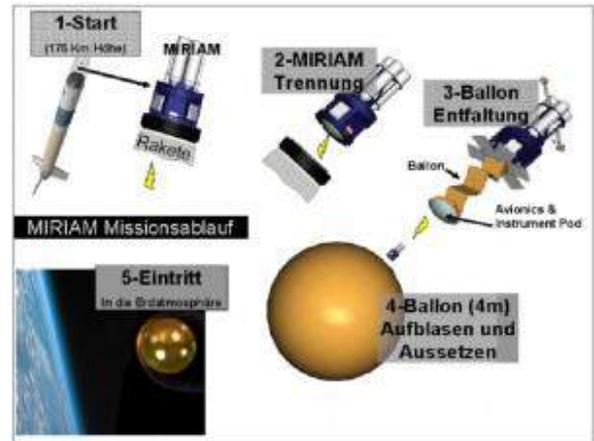
Die Ausrüstung der Basis und der für die Vorbereitung und Durchführung von Missionen mit Höhenforschungsraketen erforderliche Aufwand stehen kaum dem für eine Ariane Mission nach, nur ist alles eben „etwas kleiner“. Das schließt ein:

- Einrichtungen für
 - Vorbereitung der Rakete
 - Vorbereitung der Nutzlasten
 - Zusammenbau und End-Test der kompletten Nutzlast
 - Zusammenbau von Nutzlast und Rakete
 - Überwachung des Starts
 - Countdown
 - Start
 - Beobachtung des Starts mit Videokameras
 - Bahnverfolgung
 - Empfang von Daten
 - Bergung der Raketenreste
 - Die Bergung der Nutzlastverkleidung und des Nutzlastteils der Rakete (beide werden wieder verwendet)
- Unterbringungsmöglichkeiten für die Raketen- und Nutzlastmannschaften
- Transportmöglichkeit innerhalb des Startzentrums
- Vorkehrungen und Vorschriften für die Sicherheit. So hat z.B. ab dem Beginn des Zusammenbaus der Rakete der örtliche Sicherheitsbeauftragte „das absolute Sagen“. Ohne sein OK gibt es keine Mission
- Der aus Sicherheitsgründen erforderliche Abstand zwischen Startplatz und Missionskontrollzentrum. Im Fall von Kiruna etwa 2 km.
- Die organisatorischen Abläufe. Unter anderem
 - tägliche Treffen (Briefings) der Raketen- und Nutzlastmannschaften während der Startvorbereitungsphase, um den Stand, etwaige Probleme und den weiteren Ablauf festzulegen und die Startbedingungen zu untersuchen, besonders die für einen Start sehr kritischen Windverhältnisse. Windrichtung und -Stärke sind ausschlaggebend für die Startfreigabe
 - Probelaufe für den Countdown und die Missionskontrolle. Dabei wird die gesamte Funktionskette Nutzlast – Sender – Empfang am Boden – Darstellung der empfangenen Daten – Bewertung der Daten simuliert. MIRIAM befand sich dafür in der Flugkonfiguration

Der Umfang und die Qualität der von Esrange für die Mission zur Verfügung gestellten Einrichtungen ist beeindruckend. So hatte MIRIAM-1 einen großen eigenen Bereich in der Nutzlast-Integrationshalle für den Vorflugtest von MIRIAM-1 zur Verfügung und einen Platz in der ersten Reihe im Wissenschafts- und Missionskontrollzentrum. Alleine 5 Bildschirme des Telemetrie-Empfangszentrums waren für MIRIAM-1 reserviert.

Missionsablauf

Der Ablauf der MIRIAM-1 Mission ist komplex und kritisch im zeitlichen Ablauf:



- Nach Brennschluss der Rakete, Trennung des Antriebsteils der Rakete von ihrem Experimenten Modul und dem Abwurf der Nasenkappe wird MIRIAM-1 in etwa 120 km Höhe von dem mit dem Experiment Modul fest verbundenen Kamera Modul getrennt, um danach die Mission im freien Flug unter Schwerelosigkeit fortzusetzen bis in eine Flughöhe von ca. 175 km.
- Nach der Trennung entfernt sich MIRIAM-1 von dem Kamera Modul aufgrund eines Trennimpulses über Federmechanismen. Dieser Vorgang wird von den auf dem Kamera Modul befestigten Videokameras festgehalten.
- Wenige Sekunden nach der Trennung wird während des Steigflugs der Ballonbehälter geöffnet, der Ballon entfaltet und der Aufblasvorgang gestartet. Gleichzeitig entfalten sich die beiden Ausleger von MIRIAM-1 mit den hoch auflösenden Videokameras und Antennen zur Übertragung der Mess- und Videodaten zur Erde in Echtzeit.
- Der Ballon wird in mehreren aufeinander folgenden Schritten aufgeblasen, um ihn nicht zu beschädigen. Dabei beschreibt er eine Parabelflugbahn mit einer Scheitelhöhe von ca. 175 km. Erst kurz vor dem Eintritt in die obere dünne Erdatmosphäre ist der Ballon voll aufgeblasen.

Die eigentliche Mission ist beendet, sobald der Ballon in dichtere Schichten der Erdatmosphäre eingetreten ist und aufgrund des äußeren Überdrucks soweit zusammengedrückt wird, dass er aufgrund von Überhitzung funktionsunfähig wird.

Das Kamera Modul mit den Aufnahmen aus der frühen Missionsphase wird zusammen mit dem Experiment Modul der Rakete geborgen, während MIRIAM verloren ist.

Ablauf der Mission: Start, Trennung des Experiment Moduls der Rakete mit MIRIAM-1 und der Abwurf der Nasenkappe verliefen bilderbuchmäßig.

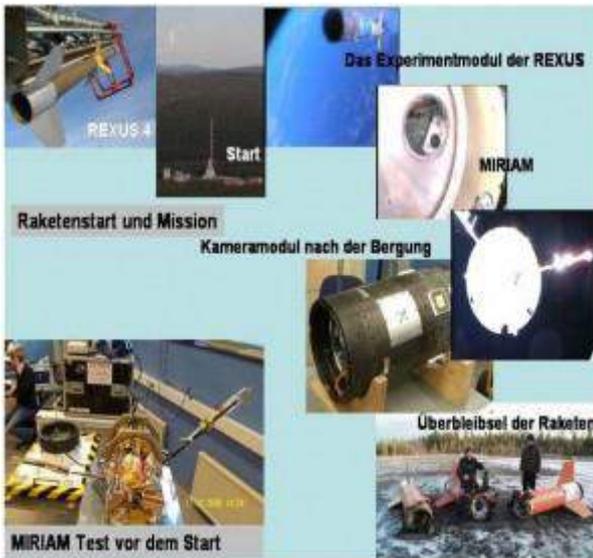
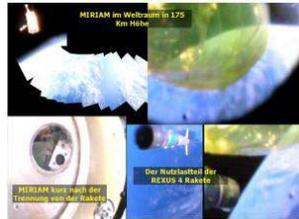
Startrampen in Kiruna



Leider wurde dann aber die Trennung von MIRIAM vom Kamera Modul durch einen Fehler im Trennmechanismus um etwa 20 s verzögert. Das hatte zur Folge, dass der Ballonbehälter sich zu früh öffnete und damit der Aufblasvorgang in Gang gesetzt wurde, bevor MIRIAM-1 sich vollständig vom Kamera Modul getrennt hatte. Dadurch wurde der Ballon nur wenig aufgeblasen und beschädigt und riss schließlich ab vom Aufblassystem, bevor er vollständig aufgeblasen war.

Von den MIRIAM-1 Kameras aufgenommene Bilder im Weltraum

Von dem Instrumententeil des Ballons wurden keine Daten empfangen. Deshalb konnten die Funktion des Ballons und sein Verhalten beim Eintritt in die Erdatmosphäre nicht nachgewiesen werden. Trotzdem wurden umfangreiche Daten und spektakuläre Videoaufnahmen aus dem Weltraum empfangen. Damit konnten wichtige Funktionen von MIRIAM-1 nachgewiesen werden.



Eindrücke von der MIRIAM-1 Startkampagne

Aufgrund dieses Teilerfolgs wurde deshalb beschlossen, die MIRIAM-1 Mission mit erweitertem Funktionsumfang zu wiederholen. Diese für 2016 geplante Mission wurde MIRIAM-2 getauft (siehe nächstes Kapitel).

Der geplante MIRIAM2 Weltraumtest

Von MIRIAM 1 zu MIRIAM 2



Das MIRIAM-2 Programm baut auf den Erfahrungen mit der nur teilweise erfolgreichen MIRIAM 1 Mission auf.

Der Start von MIRIAM 2 ist für November 2016 geplant. Wiederum stellt die DLR-MoRaBa einen passenden Träger und die

gesamte Startkampagne in Kiruna in Nordschweden zur Verfügung

Eine Reihe von Änderungen für MIRIAM-2 gegenüber MIRIAM 1 sollen diesmal einen vollen Missionserfolg garantieren:

- ein leistungsfähigerer Träger der DLR-MoRaBa (TAURUS/IMPROVED ORION) ermöglicht eine Ausdehnung der Dauer der MIRIAM-2 Mission um mehr als 25%. Das erleichtert die Missionsablaufplanung und erlaubt zum Beispiel, einen größeren zeitlichen Sicherheitsabstand zwischen der Trennung von MIRIAM-2 von der Rakete und der Entfaltung des Ballons vorzusehen. Das verringert ein Kollisionsrisiko zwischen MIRIAM-2 und Rakete, wie er bei MIRIAM-1 erfolgte aufgrund einer verzögerten Trennung, und erhöht die Eintrittsgeschwindigkeit des Ballons in die Erdatmosphäre, was die Relevanz der Messungen für die Marsmission erhöht
- MIRIAM-2 ist diesmal der einzige "Passagier" der Rakete. Das erlaubt eine flexiblere Missionsplanung als wenn, wie bei MIRIAM-1, noch weitere Passagiere an Bord wären
- DLR-Moraba stellt für MIRIAM-2 eine eigene Raketennase zur Verfügung. Das gestattet eine feste Integration von MIRIAM-2 in die Raketennase, erfordert allerdings konstruktive Änderungen von MIRIAM-2 gegenüber MIRIAM-1. Andererseits wird dadurch gegenüber MIRIAM-1 ein Trennvorgang eliminiert, was die Konstruktion des Service Spacecraft vereinfacht
- Die Trennung von MIRIAM-2 von der Rakete erfolgt diesmal mit einem bewährten Trennsystem der DLR-Moraba. Das erhöht ebenfalls die Wahrscheinlichkeit eines Missionserfolgs, da bei MIRIAM-1 der dabei verwendete und zuvor nicht in einer Mission erprobte Trennmechanismus aufgrund einer verspäteten Trennung zu einem teilweisen Misserfolg der Mission führte verursachte
- Für die Entfaltung und Freisetzung des Ballons wurden gegenüber vereinfachte und zuverlässigere Mechanismen entwickelt auf der Basis bewährter pyrotechnischer „cable cutter“
- der in den Ballon integrierte Geräteträger ist diesmal so konstruiert, dass eventuell noch am Startplatz die Batterien ausgetauscht werden können -zum Beispiel nach einem Startabbruch oder längeren Startverzögerungen-, oder dass noch am Startplatz Reparaturen oder Abgleichungen vorgenommen werden können. Das war bei MIRIAM-1 nicht möglich, da es hierzu erforderlich gewesen wäre, den Ballonbehälterkomplett auszubauen, den Ballon auszupacken und den Geräteträger aus dem Ballon auszubauen, und nach dem Eingriff alles wieder zusammenzubauen und den Ballon neu zu verstauen. Das wäre am Startplatz nicht möglich gewesen, die Mission hätte abgebrochen werden müssen.
- für das Aufblassystem werden erprobte und verfügbare Ventile verwendet (für MIRIAM-1 wurde ein eigens modifiziertes Spezialventil benutzt, das einige Probleme während der Entwicklung bereitet hat). Das führt zu einem neuen Entwurf des Aufblassystems

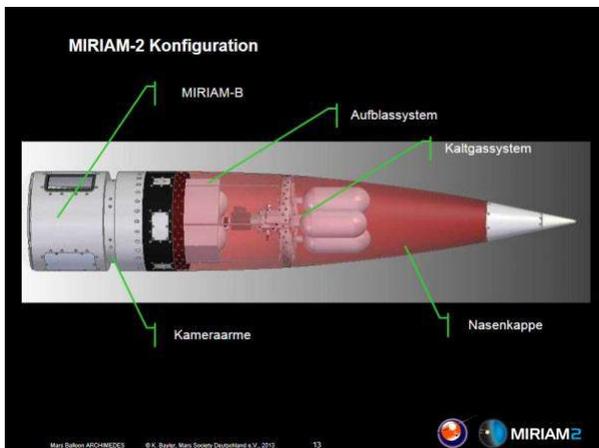
- Der Zusammenbau von Rakete und MIRIAM-2 ist einfacher aufgrund des einfacheren und erprobten Trennsystems
- Weitere an der UBW durchgeführte wissenschaftliche Arbeiten mit Bezug auf das Verhalten des Ballons während des Aufblasens und nach der Trennung vom Service Spacecraft konnten im Entwurf und in der Planung des Missionsablaufs berücksichtigt werden

Außerdem ist der zur Verfügung stehende Entwicklungszeitraum für MIRIAM-2 mit etwa 6 Jahren mehr als doppelt so lang wie für MIRIAM-1 und erlaubt deshalb ausführlichere Tests, als das bei MIRIAM-1 aufgrund des Zeitdrucks möglich war. Die Erfahrung mit MIRIAM-1 hatte gezeigt, dass bei einem auf freiwilliger Mitarbeit beruhenden Projekt, in dem fast alle Mitarbeiter beruflich tätig oder Studierende sind, längere Entwicklungszeiten erforderlich sind als für MIRIAM-1 zur Verfügung stand (der Zeitplan war durch den Starttermin bestimmt).

Der längere Entwicklungszeitraum erlaubt auch eine flexiblere Projektplanung, wenn zum Beispiel Tests nicht oder nicht mehr zu dem geplanten Zeitpunkt durchgeführt werden können, da die Testeinrichtungen für kommerzielle Programme benötigt werden, die Vorrang haben.

Der längere Entwicklungszeitraum erlaubt darüber hinaus die Durchführung weiterer theoretischer und wissenschaftlicher Untersuchungen und Analysen, die in den Entwurf einfließen und ihn funktionsicherer machen als das bei MIRIAM-1 möglich war. Das betrifft unter anderem das Verhalten des Ballons während des Aufblasens und nach seiner Trennung vom Aufblssystem.

MIRIAM-2 Flugtest Konfiguration



Die Konfiguration von MIRIAM-2 spiegelt die Änderungen wider, die sich gegenüber MIRIAM-1 aufgrund der oben beschriebenen Unterschiede ergeben, insbesondere die Möglichkeit der festen Verbindung von Service S/C und Nutzlastverkleidung und die neue Trennvorrichtung. Das erfordert aber eine andere Lösung für die ausklappbaren Kameraarme, die sich jetzt unterhalb des der Nutzlastverkleidung befinden und so konstruiert sind, dass sie während des Starts nicht den aerodynamischen Kräften ausgesetzt sind.

Insgesamt verspricht die Konstruktion von MIRIAM-2 eine zuverlässige Funktion aufgrund eines gegenüber MIRIAM-1 wegfallenden Trennvorgangs -die Nutzlastverkleidung bleibt

mit dem Service S/C fest verbunden und der Verwendung erprobter Trennvorrichtungen.

MIRIAM-2 Mission

Diesmal wird MIRIAM-2 der einzige Passagier der Rakete sein, die diesmal das gegenüber der MIRIAM-1 Mission leistungsfähigere zweistufige Modell TAURUS/IMPROVED ORION sein wird. Bei der MIRIAM-1 Mission musste sich MIRIAM-1 die Rakete mit weiteren Experimentatoren teilen, weshalb MIRIAM-1 einige Einschränkungen in Kauf nehmen musste bezüglich des Missionsablaufs und der erreichbaren Höhe.

Die von der Mobilen Raketenbasis der DLR (DLR-MoRaBa) zur Verfügung gestellte Rakete für die MIRIAM-2 Mission



Daher kann MIRIAM-2 optimal an die Möglichkeiten der Rakete angepasst werden.

Aufgrund der Erfahrungen mit MIRIAM-1 wird diesmal für die Trennung von MIRIAM-2 von der Rakete eine erprobte Trennvorrichtung der DLR-Moraba verwendet. Außerdem stellt die DLR-Moraba eine Nutzlastverkleidung (nosecone) zur Verfügung, in die MIRIAM-2 fest installiert werden kann. Dadurch wird ein kritischer Trennvorgang vermieden.

Der Start von MIRIAM2 ist für November 2016 geplant. Der Missionsablauf ist weitgehend identisch mit dem von



MIRIAM-1. Der Abschusswinkel der Rakete und die erreichte Höhe bestimmen die Flugzeit, die Eintrittsgeschwindigkeit und den Eintrittswinkel des aufgeblasenen Ballons. Die für die Entfaltung des Ballons zur Verfügung stehende Zeit von weniger als 6 Minuten erfordert eine optimale Auslegung der Aufblas- und Trennsysteme von MIRIAM-2. Die genaue Registrierung dieser Funktionsabläufe ist deshalb, neben dem eigentlichen Ballon-Eintritt, ein sehr wichtiges Missionsziel. Dafür sind mehrere Kamerasysteme vorgesehen:

- 3 Kameras, die auf dem mit der Rakete fest verbunden bleibendem Kameramodul angebracht sind und den Trennvorgang von MIRIAM-2 und den Beginn des Aufblasvorgangs festhalten sollen. Deren Daten werden über die Sender der Rakete zum Boden übertragen

- zwei Videokameras am Service S/C, die an zwei ausklappbaren Kameraarmen befestigt sind und den gesamten Aufblas- und Trennvorgang festhalten sollen. Deren Daten werden in Echtzeit mit einem eigenen Sender zum Boden übertragen
- Die oben erwähnte in den Ballon schauende Videokamera wird während der ganzen Mission Aufnahmen auf einen integrierten Datenträger vornehmen. Diese Daten können aufgrund der hohen Datenrate nicht in Echtzeit zum Boden übertragen werden. Deshalb muss die Kamera bzw. der Datenträger nach Ende der Mission geborgen werden, was trotz des zu erwartenden harten Aufschlags des Geräteträgers auf den Boden möglich ist, wie die Ergebnisse der MIRIAM-1 Mission gezeigt haben, bei der die Bordcomputer mit den aufgezeichneten Daten geborgen und ausgewertet werden konnten. Um die Bergung zu ermöglichen wird der Geräteträger mit Funkbaken ausgerüstet, die dessen Ortung gestatten. Außerdem wird der Bahnverlauf des Ballons aufgrund der Ausstattung mit GPS und Beschleunigungsmessern recht genau rekonstruierbar sein. Diese Daten werden zusammen mit anderen Sensordaten wie Temperaturen, Spannungen, Ströme in Echtzeit zum Boden übertragen. Da der Ballon bis etwa 70 km vom Startort entfernt herunter kommt und die Sendeleistung begrenzt ist, sind die zu empfangenden Datenraten begrenzt.

Die Funktionen des Service S/C werden ebenfalls genau registriert und in Echtzeit zum Boden übertragen, da das Service S/C ebenso wie der Ballon ungebremst in die Atmosphäre eintritt und zum Boden stürzt.

Aufgrund des steilen Startwinkels der Rakete –wie er für Kiruna erforderlich ist- und des parabolförmigen Missionsprofils hat der MIRIAM-2 Ballon einen steilen Eintrittswinkel in die Erdatmosphäre von über 45 Grad, während für die Marsmission ein Eintrittswinkel von etwa 7 Grad erforderlich ist. Auch die Eintrittsgeschwindigkeit ist kleiner als bei der Marsmission. Deshalb befindet sich der MIRIAM-2 Ballon nur weniger als eine Minute unter ähnlichen Bedingungen in der dünnen oberen Erdatmosphäre, wie er ihn bei der Marsmission vorfinden würde. Die während der Mission gemessenen aerothermodynamischen Daten müssen dementsprechend auf eine Marsmission „hochgerechnet“ werden.

MIRIAM-2 Zeitplan

Für Entwicklung und Test von MIRIAM-2 werden etwa 7 Jahre veranschlagt. Die Erfahrung mit MIRIAM-1 hatte nämlich gezeigt, dass für ein solch komplexes und von Freiwilligen und Studierenden betriebenes Projekt viel mehr Zeit benötigt wird als für MIRIAM-1 zur Verfügung stand. Der Starttermin für MIRIAM-1 lag unveränderbar fest, sodass nur etwa 3 Jahre für die Entwicklung des Fluggeräts zur Verfügung standen. Deshalb steht für MIRIAM-2 ausreichend Zeit für Tests und daraus resultierende Korrekturen zur Verfügung.

Die Entwicklung von MIRIAM-2 hat Mitte 2009 begonnen mit der Fertigung und dem Test von Ballonelementen, der

Weiterentwicklung des Elektronikbehälters des Ballons und seiner Elektronik und Software, Untersuchungen zur Gesamtkonfiguration von MIRIAM-2 und dem Ballon-Aufblassystem, und einer Fortführung der Ballonentwicklung mit Material- und Fertigungstests. Im Mai 2011 wurden die Anforderungen an MIRIAM-2 über eine formelle Projektüberprüfung (PRR-Preliminary Requirements Review) überprüft und festgeschrieben.

Ende 2012 wurde der endgültige Entwurf festgeschrieben. Im November 2013 wurden die Fertigung des Ingenieurmodells des MIRIAM-2 Ballons und eines ersten Prototyps der Aufblasvorrichtung fertiggestellt und der Ballon zu Testzwecken aufgeblasen. Parallel hierzu wurde das System für Verstauung, Ausbringung, Aufblasen und Freisetzen des Ballons erfolgreich im September 2013 in einem ersten Test erprobt.

Im Februar 2014 wurde dann ein kompletter Aufblastest in der 5- Vakuummkammer der IABG durchgeführt mit einem repräsentativen Aufblassystem, der erfolgreich verlief. Die Fertigung des Flugballons begann bereits parallel hierzu.

Für April 2015 ist ein erneuter Parabelflug geplant, diesmal zum Test des MIRIAM-2 Ballon-Auswurfsystems. Der Test soll in den USA in Florida stattfinden.

Die wesentlichen Meilensteine im weiteren Verlauf des MIRIAM-2 Programms bis zum Start sind:

Test des Ballon-Auswurfsystems in einem Parabelflug Test in den USA	April 2015
Fertigstellung aller Komponenten des Ingenieurmodells einschl. Software und Dokumentation	Ende Juli 2015
1. Test des Ingenieurmodells mit DLR	September 2015
Qualifikationstests des Ingenieurmodells	Okt 2015 bis Feb 2016
Aufbau des Flugmodells	März 2016 bis Mai 2016
2. Test des Ingenieurmodells mit DLR / Info Veranstaltung bei DLR	Juni 2016
Qualifikationstest des Flugmodells	Mai-Aug 2016
Startvorbereitung (Transport zum Startort, Aufbau und End-to-End Test)	Sep-Okt 2016
Start und Mission	November 2016

Weitere Flugtests

MIRIAM-3 Flugtest mit flacher Eintrittsbahn

Es muss abgewartet werden, ob der Flugtest MIRIAM-2 genügend aussagekräftige Ergebnisse ergibt, um eine Marsmission mit genügend geringem Risiko in Angriff nehmen zu können. Eventuell könnte ein weiterer Flugtest erforderlich werden. Dabei müsste eine längere Flugdauer erreicht werden unter Geschwindigkeits- und Flugbedingungen, die denen am Mars näher kommen als das mit MIRIAM-2 möglich ist. Außerdem sollte auch ein Ballon mit 10 m Durchmesser zum Einsatz kommen. Damit würden dann sowohl der Ballon wie auch die für die Verstauung, Entfaltung, Aufblasen und Freisetzung des Ballons erforderlichen Systeme weitgehend denen der Marsmission entsprechen. MIRIAM-3 würde dann funktionell weitgehend der ARCHIMEDES Marssonde entsprechen. Aufgrund der kurzen Missionsdauer wäre allerdings eine

Raumfahrtqualifizierung nicht erforderlich, was die Kosten einer solchen Mission in Grenzen halten würde.

Um eine höhere der Marsmission ähnlere Eintrittsgeschwindigkeit und einen der Marsmission ähnlichen Eintrittswinkel zu erreichen, müsste eine Trägerrakete zum Einsatz kommen, die MIRIAM-3 mit hoher Geschwindigkeit in eine flache Eintrittsbahn befördern kann, wie das mit einer Parabelbahn wie bei MIRIAM nicht möglich ist. Eine solche Mission könnte zum Beispiel mit einer Rakete des Typs VLM-1 der DLR-MoRaBa erreicht werden, die eine steuerbare Oberstufe besitzt. Die Bord- und Bodensysteme von MIRIAM-3 müssten auf die viel längere Flugbahn und Missionsdauer ausgelegt werden.

Der für MIRIAM-3 erforderliche Entwicklungs- und Testaufwand wäre also wesentlich höher als für MIRIAM-2 und die Unterstützung der Entwicklung und Erprobung durch Institutionen und/oder die Industrie erforderlich machen.

Autor: Jürgen Herholz (Mars Society Deutschland)