Photogrammetric Week '93 Eds. D. Fritsch / D. Hobbie, Wichmann, Karlsruhe, 1993

Die Kamera-Experimente HRSC und WAOSS der Mission Mars 94/96

JÖRG ALBERTZ, Berlin, HEINRICH EBNER, München,
und GERHARD NEUKUM, Berlin

ZUSAMMENFASSUNG

Mit der russischen Mission Mars 94/96 werden zwei deutsche Kamerasysteme zum Mars fliegen. Die *Hochauflösende Stereokamera* (HRSC) und der *Optoelektronische Weitwinkel-Stereoscanner* (WAOSS) sind Fernerkundungsinstrumente zur Beobachtung der Planetenoberfläche. Photogrammetrische und kartographische Anwendungen stehen dabei im Mittelpunkt. Aus diesem Grunde sind beide Systeme als Dreizeilen-Kameras zur Aufnahme von Stereobilddaten konzipiert. Die HRSC dient darüberhinaus der spektrometrischen und photometrischen Analyse der Marsoberfläche, der WAOSS der Beobachtung großräumiger, insbesondere atmosphärischer Phänomene.

1. EINLEITUNG

1.1 Fernerkundung der Planeten

All unser Wissen über die Planeten ist durch verschiedene Methoden der Fernerkundung gewonnen (Neukum et al., 1984). Dabei spielen abbildende Fernerkundungssysteme eine zentrale Rolle. Zahlreiche Raumfahrzeuge trugen Kamerasysteme zu anderen Planeten und zu den Grenzen unseres Sonnensystems (z.B. in den Mariner-, Viking-, Voyager- und Venera-Missionen). Gegenwärtig und in der absehbaren Zukunft gilt das Hauptinteresse der weiteren Erforschung des Mars. Der amerikanische *Mars Observer* wurde am 25.9.1992 gestartet. Im Oktober 1994 und 1996 werden die beiden russischen Missionen Mars 94/96 folgen, bei denen Photogrammetrie und Kartographie im Mittelpunkt stehen.

Zur kartographischen Erfassung der Marsoberfläche haben vor allem die amerikanischen Missionen Mariner 9 and Viking beigetragen. Bilddaten der Mission Mariner 9 decken den ganzen Planeten ab, jedoch nur mit einer geringen Auflösung von etwa 1 km/Pixel. Durch Viking-Bilddaten wurde die geometrische Auflösung verbessert, so daß etwa 90 % der Marsoberfläche mit einer Auflösung von 100 – 150 m/Pixel erfaßt sind, wenige kleine Gebiete auch mit höheren Auflösungen bis zu 6 m/Pixel. Radiometrische und spektrale Eigenschaften können aus den Viking-Daten nur sehr beschränkt abgeleitet werden. Die Viking-Missionen waren nicht für die systematische Aufnahme von Stereo-Bilddaten konzipiert. Es ergaben sich nur wenige Stereobildpaare, oft mit großen Maßstabsunterschieden zwischen den Bildern, und nur kleine Gebiete konnten im Detail stereophotogrammetrisch ausgewertet werden. Deshalb ist auch das bislang vorliegende geodätische Kontrollnetz und das Digitale Höhenmodell des Planeten noch recht ungenau (etwa ± 1 km).

An Bord des *Mars Observer* befindet sich die *Mars Observer Camera* (MOC), die auch Bilder der Marsoberfläche und der Atmosphäre aufnehmen soll. Sie wird den Planeten flächendeckend mit etwa 7,5 km/Pixel erfassen und für kleine Gebiete von 2,8·2,8 km auch hochauflösende Bilddaten mit etwa 1,4 m/Pixel gewinnen. Stereoaufnahmen sind jedoch nicht möglich.

1.2 Zielsetzungen der Kameraexperimente von Mars 94/96

Trotz zahlreicher wissenschaftlicher Erkenntnisse bleiben viele offene Fragen über die Entstehung und die Geschichte des Roten Planeten, die mit der *High Resolution Stereo Camera* (HRSC) und dem *Wide Angle Optoelectronic Stereo Scanner* (WAOSS) direkt untersucht werden können

(Neukum et al. 1990; Oertel et al. 1991). Die Qualität der Bilddaten und die Abdeckung der Marsoberfläche durch die Kombination von HRSC and WAOSS wird wesentlich höher sein als bei den Viking-Missionen. Dadurch sind neue Dimensionen für detaillierte wissenschaftliche Untersuchungen lokaler und regionaler Phänomene zu erwarten. Die HRSC wird es ermöglichen, Teile der Marsoberfläche in stereo, multispektral und mit hoher Auflösung (panchromatisch bis zu etwa 10 m) zu beobachten.
Die Daten von HRSC und WAOSS werden zuerst einer systematischen Verarbeitung unterzogen und dann mit verschiedenen Methoden ausgewertet. Dazu gehören insbesondere

- die Photogrammetrie,
- die Kartographie,
- die Photoklinometrie (Shape-from-Shading),
- die Spektrophotometrie und
- die photogeologische Interpretation.

Dreidimensionale Informationen über die Marsoberfläche sind unbedingt erforderlich zur Interpretation der Topographie, zum Verständnis der Prozesse, welche die verschiedenen morphologischen Formen erzeugt haben, oder auch zur Suche und Überprüfung von zukünftigen Landeplätzen. Deshalb muß es eines der wichtigsten Ziele künftiger Mars-Missionen sein, solche Informationen zu gewinnen. Nur auf diese Weise kann man hoffen, die geologische Geschichte des Mars weiter enträtseln zu können. Darüberhinaus werden WAOSS-Stereobilder die Möglichkeit bieten, atmosphärische Prozesse zu verfolgen. Die Beobachtung des Wettergeschehens, die Abschätzung von Wolkengrößen und -geschwindigkeiten und sogar die Entwicklung von Staubstürmen werden Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen sein.
Aus diesem Grunde liegt bei den Experimenten HRSC und WAOSS (Bild 1) das Schwergewicht auf der Gewinnung von geeigneten Daten zur Unt ersuchung der Marsoberfläche und der Atmosphäre. Dies wird durch den erstmaligen Einsatz der Drei-Zeilen-Stereoaufnahme in beiden Experimenten und durch die photometrischen und Farb-Informationen der HRSC-Bilder ermöglicht. Im ersten Fall werden Methoden der Digitalen Photogrammetrie angewandt; im zweiten Fall werden neue photometrische Modelle der diffusen Reflexion der Marsoberfläche benutzt, um Informationen über die örtliche Geländeneigung (Photoklinometrie) und die Bodenmaterialien zu gewinnen. Ein neuer methodischer Ansatz ist die Kombination der Ergebnisse der Digitalen Photogrammetrie und der Photoklinometrie (Shape-from-Shading) des HRSC-Experiments, um Digitale Geländemodelle abzuleiten, von denen erwartet werden kann, daß sie besser sind als die durch eine der beiden Methoden getrennt gewonnenen.

1.3 Beteiligte Institutionen

Die Experimente HRSC und WAOSS der Mission Mars 94/96 stellen den deutschen Beitrag zu diesem multinationalen Raumforschungsprogramm dar und werden von der *Deutschen Agentur für Raumfahrtangelegenheiten* (DARA) gefördert. Der Principal Investigator für das kombinierte HRSC/WAOSS-Experiment ist Prof. Dr. Gerhard Neukum von der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR). Er ist unter anderem für die wissenschaftliche Leitung der Experimente und die Koordination der verschiedenen beteiligten Arbeitsgruppen verantwortlich.
Ursprünglich war die DLR in Oberpfaffenhofen bei München für die Koordination und die Entwicklung der HRSC zuständig, die von einem Industrieunternehmen gebaut wird. Das WAOSS-System wurde durch das frühere Institut für Kosmosforschung in Berlin-Adlershof entwickelt. 1992 wurden die beiden Experimente zusammengeführt und die Arbeitsgruppe von Oberpfaffenhofen ist nach Berlin umgezogen. Das Gesamtprojekt wird nun durch zwei neue Institute der DLR in Berlin-

Photogrammetric Week '93 Eds. D. Fritsch / D. Hobbie, Wichmann, Karlsruhe, 1993

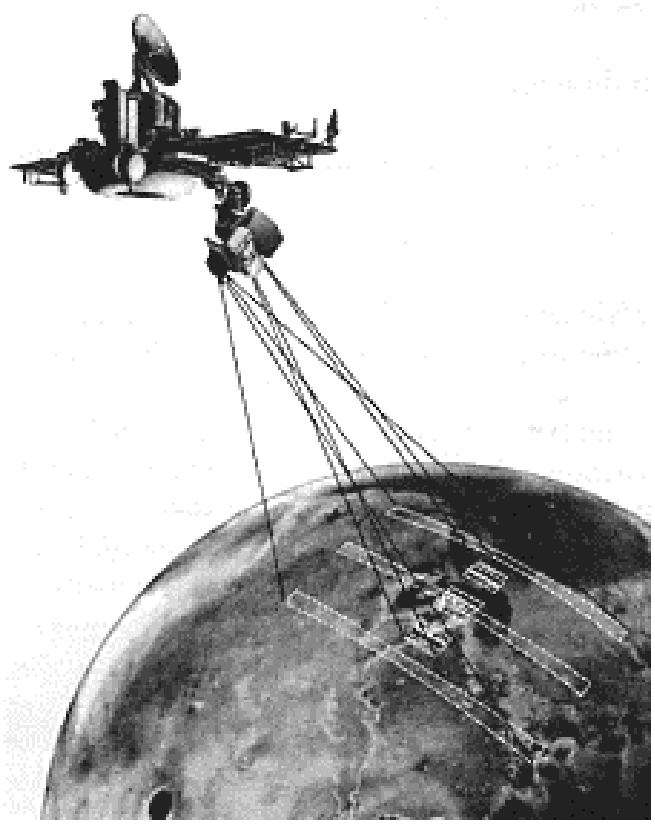


Bild 1: Das Raumfahrzeug der Mission Mars 94/96 mit den Bodenspuren von HRSC und WAOSS.

Adlershof betreut, das *Institut für Planetenerkundung* und das *Institut für Weltraumsensorik.*
Die Kameraexperimente haben auf nationaler und internationaler Ebene breites wissenschaftliches Interesse gefunden. Deshalb wirkt eine interdisziplinäre Gruppe von Wissenschaftlern an der Auswertung und Interpretation der Daten mit. Ihm gehören Experten der Planetenforschung, Geologie, Geophysik, Geomorphologie, Meteorologie usw. an. Dabei sind Photogrammetrie und Kartographie von zentraler Bedeutung.
Der Arbeitsgruppe für Photogrammetrie und Kartographie für beide Experimente gehören das Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie der Technischen Universität Berlin (Prof. Dr.-Ing. Jörg Albertz), der Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung an der Technischen Universität München (Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner) sowie das Institut für Photogrammetrie und Kartographie der Universität der Bundeswehr München (Prof. Dr.-Ing. Gustav Neugebauer und Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer) an. Einer photogrammetrischen Arbeitsgruppe bei der DLR in Berlin-Adlershof obliegt die Integration mit den anderen wissenschaftlichen Disziplinen der Experimente. Die Hauptziele der photogrammetrisch/kartographischen Arbeitsgruppe sind die photogrammetrische Auswertung, die Gewinnung von digitalen Geländemodellen, die Herstellung von Orthobildern und Bildkarten sowie die Ableitung von verschiedenen Folgeprodukten.

Photogrammetric Week '93 Eds. D. Fritsch / D. Hobbie, Wichmann, Karlsruhe, 1993

2. DIE MISSION MARS 94/96

2.1 Das Mars 94/96-Raumfahrzeug

Die Mission Mars 94/96 ist Teil des langfristig geplanten russischen Programms zur Erforschung des Mars. Dieses reicht bis weit über das Jahr 2000 hinaus, umfaßt mehrere Einzelmissionen und hält als Fernziel eine bemannte Mission zum Mars für möglich.
Die Mission ist für den Einsatz von zwei Raumfahrzeugen konzipiert. Nach der gegenwärtigen Planung soll das erste Raumfahrzeug im Oktober 1994 starten. Ein zweites, im wesentlichen identisches Raumfahrzeug wird 1996 folgen und ebenfalls eine HRSC und ein WAOSS-System an Bord haben.
Das Raumfahrzeug selbst ist ähnlich dem bei der Phobos-Mission 1989 eingesetzten Typ (Bild 2). Verbesserungen wurden hinsichtlich der mechanischen Strukturen und des Kontrollsystems eingeführt. Das Raumfahrzeug ist (mit guter Näherung) inertial stabilisiert, wobei eine Achse zur Sonne und eine andere Achse zu Canopus zeigt. Da Canopus 28° vom Südpol der Ekliptik entfernt liegt, wird das Fahrzeug während eines Marsjahres eine langsame Taumelbewegung ausführen.

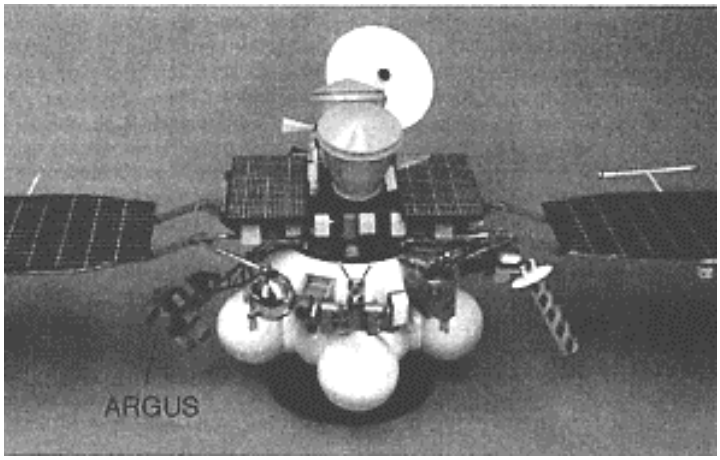


Bild 2: Raumfahrzeug der Mission Mars 94/96 mit der ARGUS-Plattform links unterhalb des Solarpaddels.

Die Umlaufbahn um den Mars wird während der Mission elliptisch und hochgradig exzentrisch sein (Bild 3). Im Perizentrum ist die Flughöhe etwa 300 km, im Apozentrum etwa 22.000 km. (Buma et al. 1991). Die Umlaufzeit liegt bei 12 Stunden. Aufgrund der Abplattung der Mars wird die Umlaufbahn driften, was zu wechselnden Beobachtungsmöglichkeiten führt.
Für ein Raumfahrzeug in einer so stark elliptischen Umlaufbahn müssen zwei Besonderheiten beachtet werden. Erstens ändert sich die Flughöhe über Grund zwischen dem Perizentrum und den Polen um den Faktor 10. Bei der Bildaufnahme führt dies zu entsprechenden Änderungen der Pixelgröße und der Geländeabdeckung. Zweitens ändert sich auch die Bahngeschwindigkeit des Raumfahrzeuges, in diesem Bereich etwa um den Faktor 1,4. Beide Effekte haben unmittelbar Einfluß auf die Bilddatenaufnahme. Die Integrationszeiten der Sensoren müssen entsprechend angepaßt werden.
Jedes der beiden Raumfahrzeuge wird eine Anzahl von wissenschaftlichen Instrumenten mitführen. Einige von ihnen sind in den Hauptkörper des Raumfahrzeugs integriert (z.B. das »Planetary Infrared Fourier Spectrometer«), andere wie Ballons und Landegeräte werden abgesprengt. Die Beobachtungs- und Navigationsinstrumente werden auf einer ausklappbaren Plattform montiert, die

Photogrammetric Week '93 Eds. D. Fritsch / D. Hobbie, Wichmann, Karlsruhe, 1993

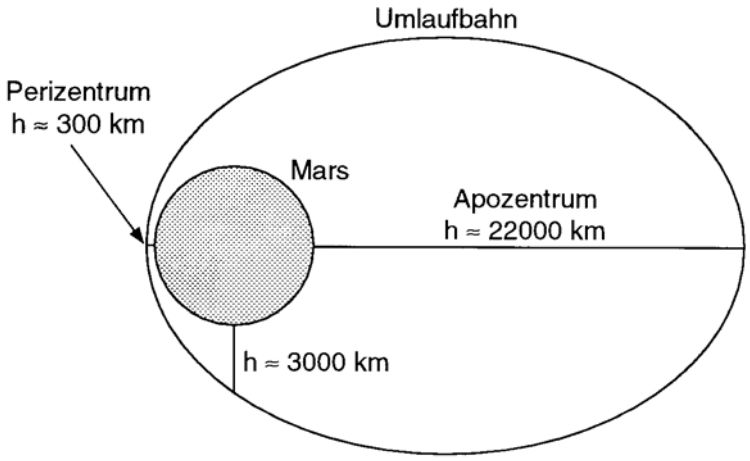
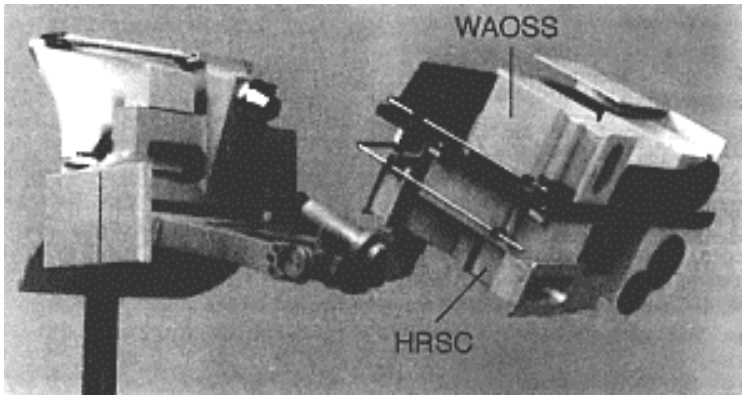


Bild 3: Die Umlaufbahn der Missionen Mars 94/96.

ARGUS-Plattform genannt wird. Zu diesen Instrumenten gehören:

- die Hochauflösende Stereokamera HRSC (High Resolution Stereo Camera),
- der Optoelektronische Weitwinkel-Stereoscanner WAOSS (Wide Angle Optoelectronic Stereo Scanner)
- das Abbildende Spektrometer OMEGA-VIMS (Imaging Spectrometer) und
- die Navigationskamera NC (Navigation Camera)

Die ARGUS-Plattform verfügt über drei Antriebe zur Kontrolle ihrer Achsen (Bild 4). Während des Betriebs der Instrumente bleibt die ganze Plattform in Nadirrichtung orientiert, so daß die einzelnen Instrumente keine mechanischen Einrichtungen zur Orientierung benötigen. Die Plattform enthält mechanische und elektrische Schnittstellen und bietet ein thermisch kontrollierte Umgebung.



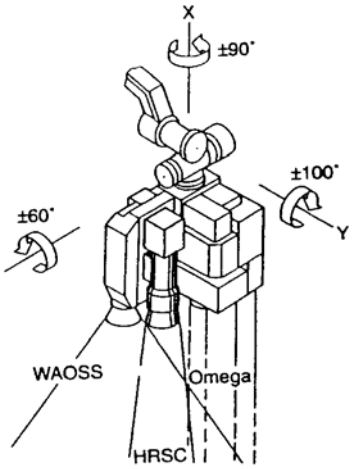


Bild 4: Instrumentenanordnung und Achsensystem der ARGUS-Plattform.

Photogrammetric Week '93 Eds. D. Fritsch / D. Hobbie, Wichmann, Karlsruhe, 1993

2.2 Die *Hochauflösende Stereokamera HRSC* (High Resolution Stereo Camera)

Mit der HRSC, die auf einen Vorschlag der DLR in Oberpfaffenhofen (Abteilung für Planetare Erkundung) zurückgeht, sollen detaillierte Bildinformationen von verschiedenen Phänomenen der Marsoberfläche gewonnen werden (Neukum & Tarnopolski 1990; Neukum et al. 1990). Zu den wichtigsten Zielen gehört es,

- stereoskopische Bilder und Digitale Geländemodelle der Marsoberfläche zu gewinnen, um die Topographie, das Geländerelief, die lokale und regionale Verteilung von Oberflächenstrukturen u.ä. untersuchen zu können,
- lokale Bereiche mit hoher Auflösung hinsichtlich morphologischer Erscheinungen, geologischer Prozesse und Wechselwirkungen von Oberfläche und Atmosphäre bis zur Größenordnung von 10 m systematisch zu untersuchen,
- hochauflösende Stereobilddaten zur Herstellung von Orthobildern, Bildmosaiken und Bildkarten mit hoher geometrischer Genauigkeit und multispektralen Informationen zu gewinnen,
- das geodätische Korrdinatensystem auf dem Mars zu verbessern.

Ein in der Planetenerkundung neuartiges Merkmal der HRSC ist die permanente Stereoaufnahmemöglichkeit in einem Umlauf nach dem 3-Zeilen-Konzept (Bild 5). Aus den gewonnenen Bildern kann die vollständige dreidimensionale Information über die Marsoberfläche abgeleitet werden (z.B. Müller 1991).

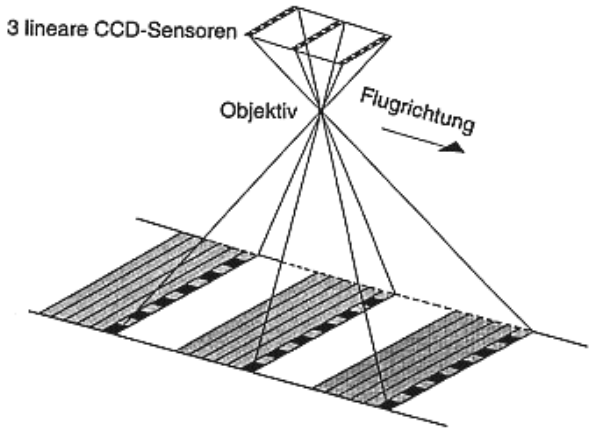


Bild 5: Schematische Darstellung der Geometrie der Drei-Zeilen-Aufnahme.

Das Kamerakoncept der HRSC sieht in der Bildebene des Objektivs drei identische Fokalplatten vor, von denen jede drei lineare Sensorarrays mit 5184 aktiven Pixeln enthält. In ihrer Gesamtheit ergeben die drei Fokalplatten einen nadirwärts gerichteten hochauflösenden panchromatischen Kanal (≈ 10 m Geländeauflösung im Perizentrum), zwei um ± 19° geneigte, konvergente, panchromatische Stereokanäle (≈ 20 m Geländeauflösung), vier um ± 3° and ± 16° geneigte Farbkanäle (≈ 40 m Geländeauflösung) und zwei weitere um ± 13° geneigte panchromatische Kanäle (≈ 20 m Geländeauflösung), die photometrischen Zwecken dienen (Bild 6).
Es ist zu betonen, daß sich die nachfolgenden Betrachtungen zur stereophotogrammetrischen Auswertung nur auf die beiden mit ± 19° aufgenommenen Bildzeilen beziehen. Es darf jedoch nicht übersehen werden, daß zur Farbwiedergabe und für die Photometrie sechs weitere Bildzeilen aufgezeichnet werden, die bei Bedarf die photogrammetrische Leistungsfähigkeit des Systems erhöhen (z.B. in steilem Gelände).

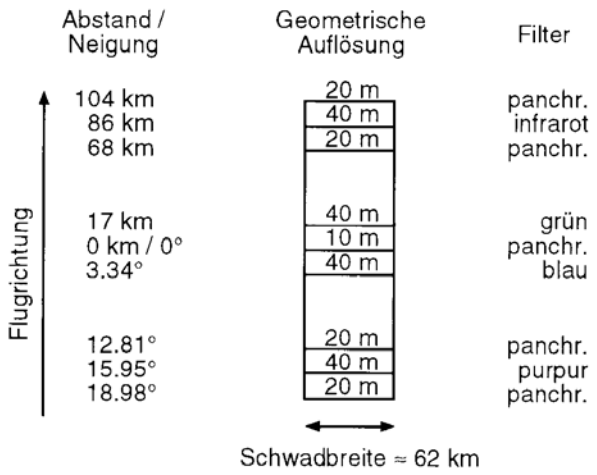


Bild 6: Anordnung, Neigung, Auflösung und Spektralbereiche der neun Kanäle der HRSC.

Das Kamerasystem erzeugt drei sich überdeckende Bildstreifen der Marsoberfläche, die entlang der Zeilen quer zur Flugrichtung eine Zentralprojektion und entlang der Flugrichtung (mit guter Näherung) eine Parallelprojektion aufweisen (Bild 5). Im Gegensatz zu den Bildern, die für die Luftbildmessung mit Meßkameras aufgenommen werden, weist bei den mit der HRSC gewonnenen Bildstreifen jeder Satz von drei gleichzeitig aufgezeichneten Bildzeilen eine eigene äußere Orientierung (Lage und Drehung) auf. Dies ist die Folge des dynamischen Aufnahmeprozesses (z.B. Hofmann et al. 1982).

2.3 Der *Optoelektronische Weitwinkel-Stereoscanner* WAOSS (Wide-Angle Optoelectronic Stereo Scanner)

Der Vorschlag für das zweite Kameraexperiment WAOSS kam vom früheren Institut für Kosmosforschung der ehemaligen DDR in Berlin-Adlershof und war zunächst unabhängig von der HRSC (Oertel et al. 1991). Die Hauptziele für WAOSS waren die Beoachtung von Wolken und Staubstürmen und anderer meteorologischer Prozesse in der Marsatmosphäre. Auch nach der Integration von HRSC und WAOSS zu einem kombinierten Experiment bleiben diese Zielsetzungen gültig. Darüberhinaus bietet WAOSS aufgrund seiner Systemkonzeption besondere Anwendungsmöglichkeiten für großflächige Aufnahmen. Dies bedeutet, daß sich die beiden Experimente HRSC und WAOSS für die globale Kartierung der Marsoberfläche zu einem leistungsfähigen Gesamtsystem ergänzen. Die Flächendeckung durch WAOSS wird es möglich machen, auch zeitabhängige Phänomene zu erfassen.
Die Hauptziele des WAOSS-Experiments sind deshalb,

- globale synoptische Aufnahmen der Marsatmosphäre und der Oberfläche zu gewinnen, um meteorologische, klimatologische und ähnliche Veränderungen im Verlaufe der Mission zu erfassen,
- globale atmosphärische Ereignisse im Verlaufe von Tagen, Wochen, Monaten, Jahreszeiten und Jahren zu verfolgen,
- Phänomene an den Polkappen zu beobachten,
- bestimmte atmosphärische Erscheinungen und einzelne Oberflächenphänomene in mittlerer Auflösung unter Verwendung des Stereoeffekts zu erfassen und
- Digitale Geländemodelle und Bildkarten auf globaler und regionaler Ebene zu gewinnen.

Das WAOSS-Aufnahmesystem besteht aus einer Fokalplatte, die mit denjenigen in der HRSC identisch ist. Es wird in einer nadirwärts gerichteten Bildzeile aufgenommen sowie in zwei um ± 25° geneigten vorwärts und rückwärts gerichteten Stereozeilen (Bild 7). Die Auflösung wird im Perizentrum für alle drei Kanäle bei 100 m liegen. Die Spektralbereiche unterscheiden sich geringfügig.

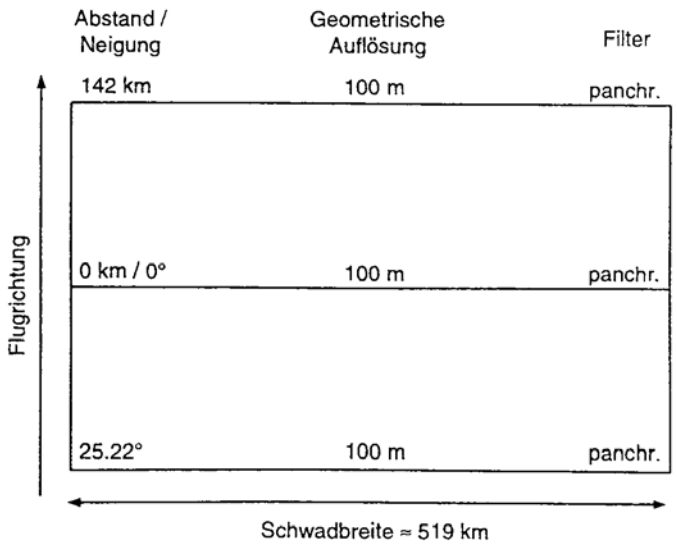


Bild 7: Anordnung, Neigung, Auflösung und Spektralbereiche der drei Kanäle des WAOSS (Maßstab wie Bild 6).

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten technischen Parameter der beiden Kamerasysteme zusammengestellt.

Parameter	HRSC	WAOSS
Brennweite	175 mm	21,7 mm
Bildfeld	11,8°	80°
Anzahl der CCD-Zeilen	9	3
Konvergenzwinkel	19°	25°
Aktive Pixel pro Zeile	5184	5184
Pixelgröße	7 μm	7 μm
Radiometrische Auflösung	8 bit	8 bit
Gewicht	24 kg	7 kg
Schwadbreite*	62 km	519 km
Maximale Auflösung*	12 m	97 m

* bei Flughöhe 300 km im Perizentrum

3. PHOTOGRAMMETRISCHE UND KARTOGRAPHISCHE AUSWERTUNG

Die photogrammetrische und kartographische Auwertung der Bilddaten von HRSC und WAOSS muß einige Besonderheiten berücksichtigen, nämlich

- das Fehlen von geometrischen Bezugsdaten; die photogrammetrischen Auswerteprozesse müssen sich im wesentlichen auf Navigationsdaten, konjugierte Punkte in den Drei-Zeilen-Bildstreifen und Verknüpfungspunkte in benachbarten Streifen stützen;

- die elliptische und hochgradig exzentrische Umlaufbahn, die Veränderungen in der Fluggeschwindigkeit und sehr verschiedene Flughöhen mit sich bringt, so daß die Bildstreifen uneinheitliche geometrische Eigenschaften aufweisen werden;
- die Drei-Zeilen-Geometrie beider Aufnahmesysteme, die zu dreifacher Überdeckung für die Stereoauswertung führt und deshalb für die Orientierung und die Bildzuordnung eine Herausforderung darstellt;
- das teilweise Fehlen von hochfrequenten Bildinformationen; ein großer Teil der aufgezeichneten Bilddaten wird nur geringe oder gar keine Textur zeigen, so daß die Bildzuordnung örtlich durch photoklinometrische Auswertungen (Shape-from-Shading) ergänzt werden muß;
- stark wechselnde Beleuchtungsverhältnisse während der Mission; insbesondere bei der Herstellung von Mosaiks und Bildkarten werden diesbezüglich Korrektur- und Anpassungsprozesse erforderlich sein.

Die photogrammetrische Auswertung und Studien zur Integration der Photoklinometrie werden von der Technischen Universität München durchgeführt, die Gewinnung des Digitalen Geländemodells, Entzerrung und kartographische Verarbeitung werden von der Technischen Universität Berlin, die Entwicklung von Verfahren zur Korrektur der Beleuchtungsverhältnisse bearbeitet die Universität der Bundswehr München.

3.1 Photogrammetrische Auswertung

Bei der photogrammetrischen Auswertung sind zwei Hauptaufgaben zu unterscheiden, nämlich die automatische Bestimmung von konjugierten Punkten durch Bildzuordnung und die photogrammetrische Punktbestimmung.

- *Automatische Bestimmung von konjugierten Punkten.* Für jede dreidimensionale Auswertung der Daten müssen in den Bildstreifen konjugierte Punkte bestimmt werden. Dafür werden die Methoden der digitalen Bildzuordnung eingesetzt, bei denen bekanntlich zwischen flächen- und merkmalsorientierten Verfahren unterschieden wird. Bei der Mars-Mission müssen drei Besonderheiten berücksichtig werden: (1) Große Teile der Bilder werden sehr wenig Textur zeigen, so daß die Bildzuordnung nur mit geringer Genauigkeit und niedriger Zuverlässigkeit möglich ist. (2) Um HRSC- und WAOSS-Daten gemeinsam auswerten zu können, muß ein Mehrbildverfahren entwickelt werden, das die verschiedenen Pixelgrößen (≈ 10 m, ≈ 20 m und ≈ 100 m im Perizentrum) berücksichtigt. (3) Die Übertragung ausreichender Datenmengen kann nur durch Datenkompression erreicht werden. Dabei muß mit einer Verringerung der radiometrischen Auflösung gerechnet werden, die auch die Bildzuordnung beeinflussen kann.
  Um das Potential der digitalen Bildzuordnung voll auszuschöpfen, werden die konjugierten Punkte durch eine Kombination von flächen- und merkmalsorientierten Methoden bestimmt. Zuerst werden punkt- und linienförmige Merkmale in jedem Streifen extrahiert (z.B. Barnard et al. 1980; Förstner 1986). Diese Merkmale müssen durch Attribute wie minimale und maximale Gradienten und Verlauf der Autokorrelationsfunktion für punktförmige sowie Länge und Krümmung für linienförmige Merkmale beschrieben werden. Aufgrund dieser Attribute und des Wissens über die genäherte Lage konjugierter Merkmale wird eine Zuordnung nach robustem Schätzverfahren durchgeführt. Man erhält eine Liste konjugierter Merkmale, von denen konjugierte Punkte abgeleitet werden. In einem zweiten Schritt wird die flächenorientierte Zuordnung eingesetzt, um im Ergebnis Subpixelgenauigkeit zu erzielen.

- *Lokale, regionale und globale photogrammetrische Punktbestimmung.* Die photogrammetrische Punktbestimmung schließt die Bestimmung der äußeren Orientierung der digitalen Bilddaten ein. Sie ist von zentraler Bedeutung, da alle folgenden Produkte wie DGM, Orthobilder oder Bildkarten von ihr abhängen. Zur photogrammetrischen Punktbestimmung wird die Bündelausgleichung eingesetzt, d.h. die Raumkoordinaten der Objektpunkte und die Parameter der äußeren Orientierung werden gemeinsam in einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnet. Dabei gelten die folgenden Eingabedaten als Beobachtungen: (1) Bildkoordinaten der konjugierten Punkte; (2) Elemente der inneren Orientierung; (3) Kontrollinformationen wie Paßpunkte und DGM; (4) Informationen über die äußere Orientierung wie Position und Aufnahmerichtung.
  Ein grundsätzliches Problem ist die Definition des Bezugssystems mit hoher Genauigkeit. Diese Aufgabe muß unter Verwendung von nicht-photogrammetrischen Daten wie Paßpunkte, DGM-Informationen oder absolute Beobachtungen der Parameter der äußeren Orientierung gelöst werden. Da für den Mars nur ungenaue Bezugsdaten vorliegen, hängt die absolute Genauigkeit der Punktbestimmung in hohem Maße von genauen Messungen der Parameter der äußeren Orientierung ab.
  Unter Berücksichtigung der genannten Unbekannten und Beobachtungen muß das funktionale Modell der photogrammetrischen Bündelausgleichung weiterentwickelt und an die geometrischen Bedingungen der Mission Mars 94/96 angepaßt werden.
  Die regionale und globale Punktbestimmung wird das geodätische Punktnetz auf dem Mars verbessern und erweitern. Das setzt die gemeinsame Ausgleichung einer großen Zahl von Bildstreifen und die Kombination von HRSC- und WAOSS-DAten voraus. Neue Studien für das MOMS-02/D2-Projekt (Müller 1991; Ebner et al. 1992) haben gezeigt, daß die Genauigkeit der Punktbestimmung wesentlich verbessert werden kann, wenn ein Block von mehreren sich überlappenden Streifen gemeinsam ausgeglichen wird und Bildstreifen mit verschiedenen Flugrichtungen verwendet werden. Wegen der unsicheren Bezugsinformationen ist dies für die Mission Mars 94/96 besonders wichtig.

3.2 Gewinnung von Digitalen Geländemodellen und Entzerrung

Als Ergebnis der photogrammetrischen Auswertung stehen die Parameter der äußeren Orientierung der Bildaten zur Verfügung. Davon geht die Gewinnung von digitalen Geländemodellen (DGM) und die anschließende Entzerrung aus, die folgende Schritte umfaßt:

- *Bildzuordnung zur Gewinnung von DGM.* Die Herleitung eines DGM verlangt die Bestimmung einer großen Zahl von konjugierten Punkten in den Stereobilddaten. Um diese Punkte zu bestimmen, wird eine Kombination von Zuordnungsverfahren eingesetzt. Dies schließt die Suche von geeigneten Bildpunkten mittels Interestoperatoren, die Anwendung von flächenbasierten Zuordnungstechniken und merkmalsbasierten Verfahren (z.B. Li 1990) sowie die Einführung von Plausibilitätstests ein. Je nach Datenqualität und Geländetyp können spezielle Bearbeitungen wie iterative Verfahren oder auch interaktive Operationen erforderlich sein.
- *Berechnung von DGM.* Aus ihren Bildkoordinaten und den zugehörigen Orientierungsdaten werden die Raumkoordinaten der konjugierten Punkte berechnet. Aus diesen unregelmäßig verteilten Punkten wird mittels geeigneter Interpolationstechniken ein regelmäßiges DGM abgeleitet.
- *Verbesserung des DGM.* Da die Bildzuordnung in hohem Maße von der Bildstruktur (Textur) abhängt, wird in manchen Bereichen die Kombination von photogrammetrischen und photoklinometrischen Methoden zur Verbesserung des DGM erforderlich sein.

- *Entzerrung der Bilddaten auf eine bestimmte Kartenprojektion.* Aufgrund des DGM und der Orientierungsparameter werden die Bilddaten zu Orthobildern entzerrt. Die primären Produkte werden Schwarzweiß-Bilder in einer vorzugebenden Kartenprojektion sein, die aus den Nadirzeilen von HRSC und WAOSS abgeleitet sind. Um Farbbilder zu erzeugen, müssen diese Daten mit denjenigen der Farbkanäle kombiniert werden. Dies setzt voraus, daß die Farbkanäle nach der für sie gültigen Aufnahmegeometrie ebenfalls entzerrt wurden. Im übrigen geschieht die Kombination wie in der kartographischen Verarbeitung (siehe 3.3).
- *Ableitung von Folgeprodukten.* Je nach den Anforderungen der beteiligten Wissenschaftler können aus dem DGM verschiedene Arten von Produkten abgeleitet werden wie Höhenlinien, Schummerungen, Perspektivbilder, Profile, Neigungskarten u.ä.

3.3 Kartographische Datenverarbeitung

Die kartographische Datenverarbeitung ist mit der photogrammetrischen Auswertung eng verknüpft. Die folgenden Vorgänge sind jedoch überwiegend durch kartographische Gesichtspunkte bestimmt:

- *Mosaikbildung.* Im allgemeinen wird ein Kartenblatt nicht durch eine einzelne Bildszene abgedeckt. Deshalb müssen mehrere Szenen zu einem homogenen Bilddatensatz vereint werden (z.B. Albertz et al. 1987). Im Falle der HRSC- und WAOSS-Daten hängt die Geometrie des Mosaiks direkt von der umfassenden Bündelausgleichung ab. Die geometrischen Aspekte der Mosaikbildung vereinfachen sich dadurch auf das Zusammenkopieren einzelner Orthobilder.
- *Radiometrische Mosaikbildung.* Eine Vielzahl von Einflüssen führt dazu, daß zwischen den benachbarten Bildern eines Mosaiks radiometrische Differenzen auftreten (Helligkeit, Kontrast und Farbe). Durch die radiometrische Mosaikbildung sind die einzelnen Szenen in ein homogenes Bild umzurechnen. Dies kann durch eine Methode erreicht werden, die von den mehrfachen Informationen in den sich überlappenden Bereichen benachbarter Szenen ausgeht. Das hierzu entwickelte Iterationsverfahren, das sich bei der Herstellung von Satelliten-Bildkarten gut bewährt hat, muß für jeden Spektralkanal getrennt angewandt werden (Kähler 1989). Die bisher noch interaktiv durchgeführte Definition von Überlappungsbereichen und Trennlinien soll künftig automatisch erfolgen.
- *Bildverbesserung.* Methoden der Bildverbesserung (z.B. mittels Filterung) werden angewandt, um im endgültigen Kartenprodukt die für visuelle Interpretation beste Wiedergabe zu erzielen.
- *Kombination verschiedener Bilddatensätze.* Um aus panchromatischen Datensätzen mit hochfrequenten Bildinformationen und Spektralkanälen mit Farbinformationen Farbbilder hoher Auflösung zu gewinnen, muß man die Datensätze miteinander kombinieren. Diese Technik hat bei der Herstellung von Satelliten-Bildkarten bereits große praktische Bedeutung erlangt (z.B. Tauch et al. 1990). Ähnliche Techniken sind anzuwenden, um farbige Bildkarten der Marsoberfläche zu erstellen.
- *Graphische Bearbeitung.* Die Herstellung von Bildkarten erfordert es, daß graphische Elemente wie Namen, Linien, Zahlen usw. so in die Bilddaten integriert werden, daß sie gut erkennbar sind ohne den Bildinhalt zu stark zu belasten (Albertz et al. 1992). Dies gilt insbesondere auch für die Integration von Höhenlinien.
- *Herstellung von Filmoriginalen.* Für den Druck müssen die Bilddaten zusammen mit den integrierten graphischen Elementen als Filmoriginale erstellt werden. Dazu dienen großformatige hochauflösende Rasterplotter, mit denen für jede Druckfarbe die Grauwerte der Bilddaten in Druckraster umgewandelt werden, so daß von den Filmen direkt die Platten für den Offsetdruck kopiert werden können.

Außerdem werden von der Universität der Bundeswehr München in Zusammenarbeit mit der photometrischen Arbeitsgruppe der DLR Versuche unternommen, um die jeweiligen Beleuchtungsverhältnisse zu korrigieren bzw. eine künstliche Beleuchtungsrichtung einzuführen.

4. ERWARTETE ERGEBNISSE

Die vielfältigen Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertung und der kartographischen Verarbeitung umfassen vor allem

- ein geodätisches Punktfeld auf der Marsoberfläche, das im Vergleich zu existierenden Netzen durch globale und regionale Punktbestimmung wesentlich verbessert und erweitert ist; die erreichbare Verbesserung läßt sich bisher aber nicht genau vorhersagen;
- aus HRSC-Daten abgeleitete Digitale Geländemodelle von ausgewählten Gebieten mit einer Genauigkeit, wie sie topographischen Karten 1:50.000 entspricht, sowie überwiegend von WAOSS-Daten abgeleitete regionale und globale Geländemodelle;
- von DGM abgeleitete Folgeprodukte wie Höhenlinienkarten, Profile, Neigungskarten u.ä.;
- schwarzweiße Orthobilder in verschiedenen Maßstäben, die aus den Nadirbildzeilen beider Systeme unter Verwendung eines DGM entzerrt werden;
- farbige Bildkarten in Maßstäben von 1:500.000 bis 1:50.000 zur weiteren Interpretation und Analyse sowie als Basiskarten für thematische Kartierungen;
- thematische Karten verschiedener Art je nach den wissenschaftlichen Zielen und Ergebnissen der anderen beteiligten Wissenschaftler.

5. AUSBLICK

Die Kamera-Experimente HRSC und WAOSS sind so konzipiert, daß sie hohe Anforderungen an topograpische und thematische Karten der Marsoberfläche erfüllen können. Zu diesem Zweck werden die Bilddaten durch photogrammetrische Auswertung und kartographische Bearbeitung in geometrisch korrigierte standardisierte Formate umgesetzt. Dadurch werden die Bilddaten der wissenschaftlichen Öffentlichkeit für die weitere Analyse und Interpretation verfügbar gemacht, um die Lokalisierung, Verarbeitung und Interpretation von anderen Daten zu unterstützen und als Basis für die Identifikation und Visualisierung von wissenschaftlichen Ergebnissen zu dienen.
Der Zeitplan für das Projekt läßt sich durch die folgenden Meilensteine skizzieren:

- Fertigstellung der Fluginstrumente bis Ende 1993
- Auslieferung des Raumfahrzeuges zur Starteinrichtung im Frühjahr 1994
- Start des Raumfahrzeuges im Herbst 1994 (Flug zum Mars in etwa 300 Tagen)
- Beginn des Kamerabetriebes im Oktober 1995 (geplante Dauer der Mission über 700 Tage oder ein Marsjahr bis September 1997)
- Start des zweiten Raumfahrzeuges im Herbst 1996

Die Entwicklung der Software-Pakete für die photogrammetrische Auswertung und die kartographische Bearbeitung soll bis Ende 1994 abgeschlossen sein. Während des Jahres 1995 ist eine Testphase vorgesehen bis dann im Oktober 1995 die ersten Daten eintreffen.
Die Marsoberfläche ist etwa gleich groß wie die Landoberfläche der Erde. Es versteht sich von selbst, daß die Kartierung einer solchen Fläche in mittleren und größeren Maßstäben enorme Anstrengungen verlangt und viel Zeit und Geld erfordern wird. Die Kamera-Experimente HRSC und WAOSS dürfen nicht als ein komplettes Kartierprogramm dieser Art gesehen werden. Doch kann

von ihnen ein großer Fortschritt in der Kartierung und eine Vielzahl von anderen wissenschaftlichen Ergebnissen erwartet werden.

6. LITERATUR

Albertz, J. et al. (1987): A Digital Approach to Satellite Image Map Production. Berliner Geowissensch. Abhandlungen, Reihe A, Band 75.3, Berlin, S. 833-872.

Albertz, J.; Lehmann, H.; Scholten, F.; Tauch, R. (1992): Satellite Image Maps – Experiences, Problems and Chances. Internat. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Washington D.C. , Vol. 29, Part IV, S. 309-314.

Albertz, J.; Lehmann, H.; Tauch, R. (1992): Herstellung und Gestaltung hochauflösender Satelliten-Bildkarten. Kartographische Nachrichten 42, S. 205-213.

Buma, M.; Henkner, J.; Schwarz, G. (1991): Model Calculations for a Pushbroom Stereo Camera – The Case of the Mars 94 High Resolution Stereo Camera (HRSC). Forschungsbericht DLR-FB 90-57, Oberpfaffenhofen.

Ebner, H.; Kornus, W.; Ohlhof, T. (1992): A Simulation Study on Point Determination for the MOMS-02/D2 Space Project Using an Extended Functional Model. Internat. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.29, Washington D.C.

Ebner, H.; Ohlhof, T.; Tang, L. (1992): Photogrammetric Restitution of Mars 94 Three-Line Scanner Imagery. SPIE-Conference State-of-the-Art Mapping, 13-15 April 1993, Orlando (USA).

Heipke, C. (1990): Integration von digitaler Bildzuordnung, Punktbestimmung, Oberflächenrekonstruktion und Orthoprojektion in der digitalen Photogrammetrie. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 366, München.

Heipke, C. (1992): Integration of Digital Image Matching and Multi Image Shape from Shading. Internat. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.29, Washington D.C.

Hofmann, O.; Nave, P.; Ebner, H. (1982): DPS – A Digital Photogrammetric System for Digital Elevation Models (DEM) and Orthophotos by Means of Linear Array Scanner Imagery. Internat. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.24, Part 3, Helsinki p. 216-227.

Kähler, M. (1989): Radiometrische Bildverarbeitung bei der Herstellung von Satelliten-Bildkarten. Deutsche Geodätische. Kommission, Reihe C, Nr. 348, München.

Li, R. (1990): Erfassung unstetiger Oberflächen aus digitalen Bilddaten durch Flächen- und Kantenzuordnung. Deutsche Geod. Kommission, Reihe C, Nr. 364, München.

Müller, F. (1991): Photogrammetrische Punktbestimmung mit Bilddaten digitaler Dreizeilenkameras. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 372, München.

Neukum, G.; Neugebauer, G. (1984): Fernerkundung der Planeten und kartographische Ergebnisse. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Hochschule der Bundeswehr, Heft 14, München, 100 S.

Neukum, G.; Tarnopolski V. (1990): Planetary Mapping – The Mars Cartographic Data Base and a Cooperative Camera Project for 1994. Geo-Informations-Systeme, Vol.3, No. 2, p. 20-29.

Neukum, G. et al. (1990): HRSC High Resolution Stereo Camera Mars 94 Mission – Consolidated Phasa A Conception. Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt.

Oertel, D. et al. (1991): Wide Angle Optoelectronic Stereo Scanner – Phase B Study (WAOSS Science Objectives), Institut für Kosmosforschung, Berlin.

Tauch, R.; Scholten, F. (1990): Merging and Mosaicking of Multisensor Data for the Production of High Quality Satellite Image Maps. Internat. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.28, Part 4, Tsukuba (Japan) p.29-38.

Photogrammetric Week '93 Eds. D. Fritsch / D. Hobbie, Wichmann, Karlsruhe, 1993

Bild & Ton, Fachzeitschrift für Bild- und Tonverarbeitung, Sonderheft der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt zur WAOSS-Kamera für die Mars-Mission 94, Heft 9/10, 1992.

Die Experimente HRSC und WAOSS werden von der Deutschen Agentur für Raumfahrtangelegenheiten (DARA) gefördert.