

Jörg Albertz, Stephan Gehrke, Hartmut Lehmann

Topographische Karten der Mars-Oberfläche

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

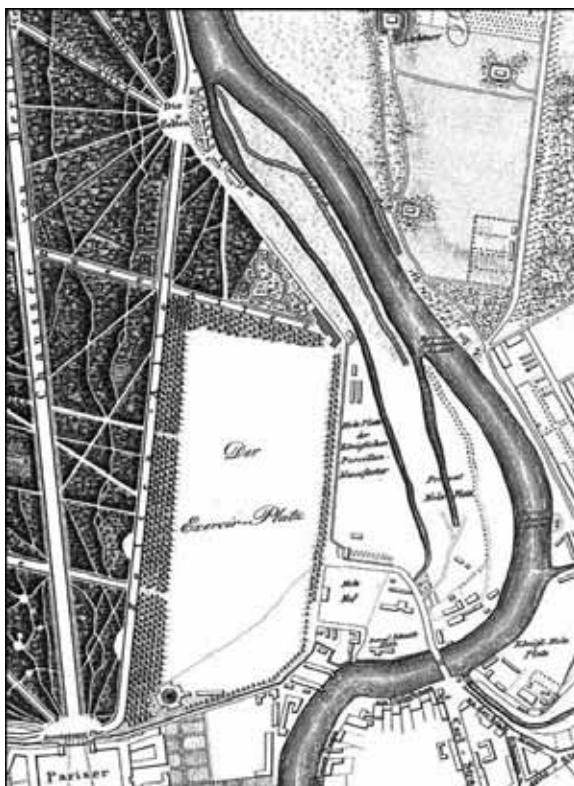


Bild 1. Der „Geburtsort“ der Mars-Kartographie in Berlin, die in der Karte von 1833 links von der Bildmitte sichtbare Privatsternwarte von Wilhelm Beer am Rande des Berliner Tiergartens. Am Ort dieser Sternwarte steht heute der Südflügel des Bundeskanzleramtes.

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



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

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

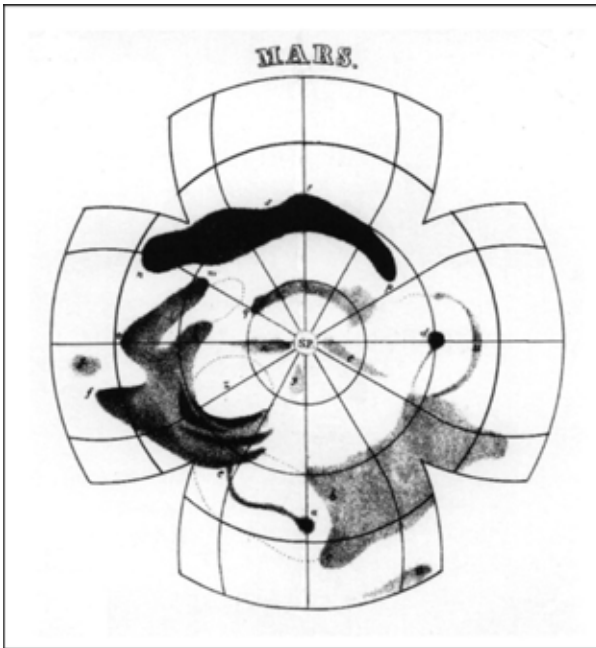


als „integrierende Teile der Marsoberfläche“, also als feste topographische Strukturen

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

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

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



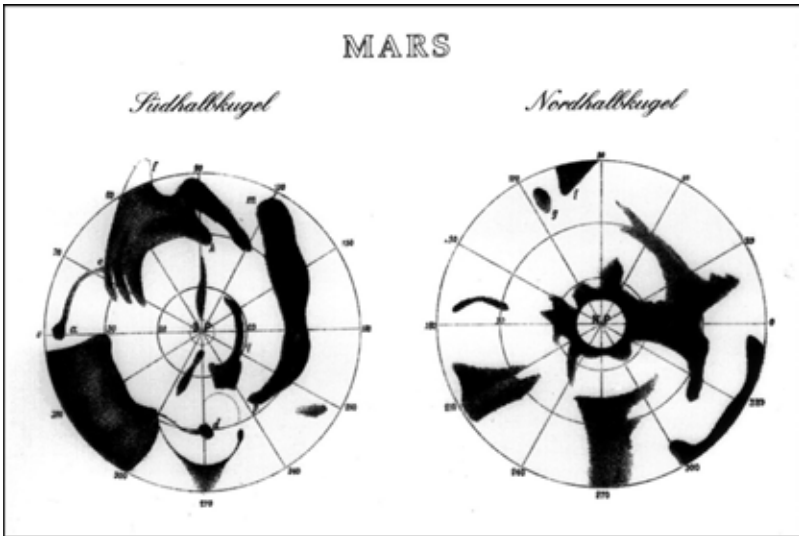
Bei den Beobachtungen während der späteren Oppositionsstellungen konnten die Messungen noch deutlich verbessert werden.

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

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

2. „Kartographie“ mit dem Fernrohr

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



Besonders wichtig – und auch populär – wurden die Beobachtungen von Giovanni Schiaparelli (1835–1910), dem Leiter der Mailänder Sternwarte. Er
Bild 5. Die erste Karte der gesamten Mars-Oberfläche, von Beer und Mädler erarbeitet nach den Beobachtungen 1830 bis 1839, veröffentlicht 1841

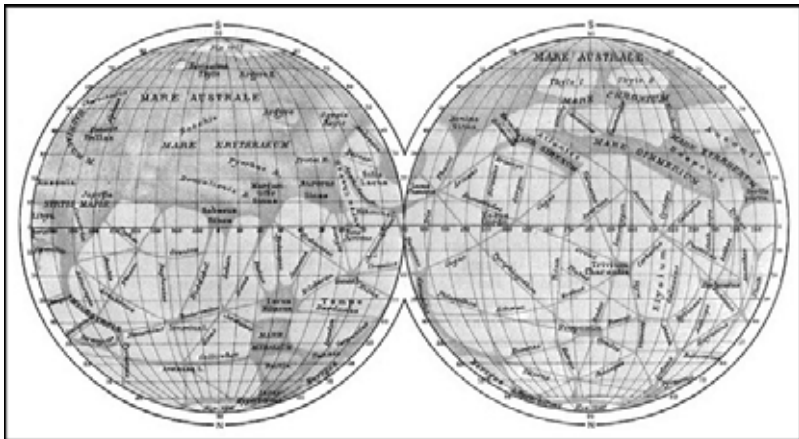


Bild 6. Eine Mars-Karte von Schiaparelli von 1888 mit vielen »canali«, in ihr sind die Beobachtungen 1877 bis 1888 zusammengefasst

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

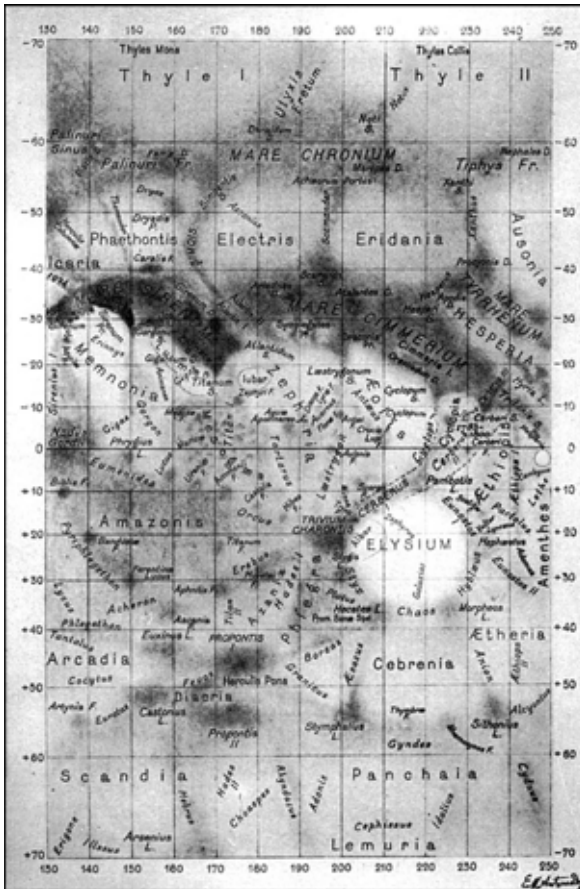


Bild 7. Blatt der vierteiligen »Carte de Mars« im Maßstab 1:64 Millionen von Antoniadi nach Beobachtungen in Meudon von 1909 bis 1928, 1930 veröffentlicht

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

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

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

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

3. Raumsonden zum Mars

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

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

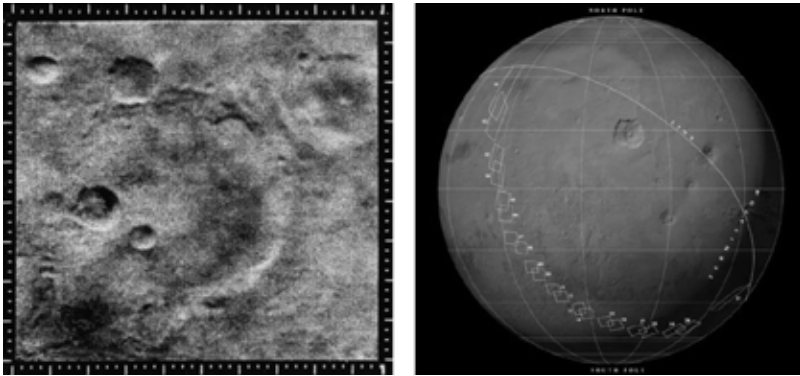


Bild 8. Mit Mariner 4 konnten 1965 die ersten Bilder der Mars-Oberfläche gewonnen werden. Links das Bild Nr. 11, rechts die Lage der 21 Bilder auf dem Planeten

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



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

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

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

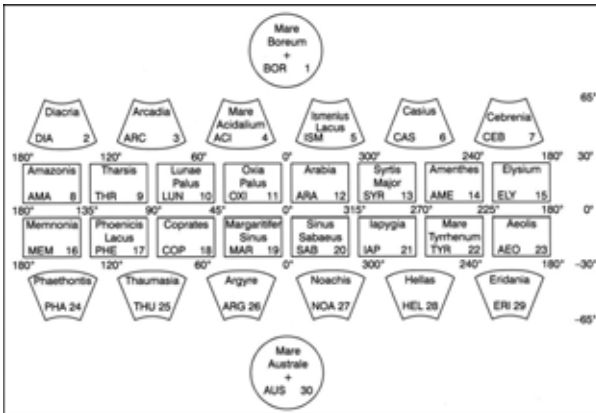
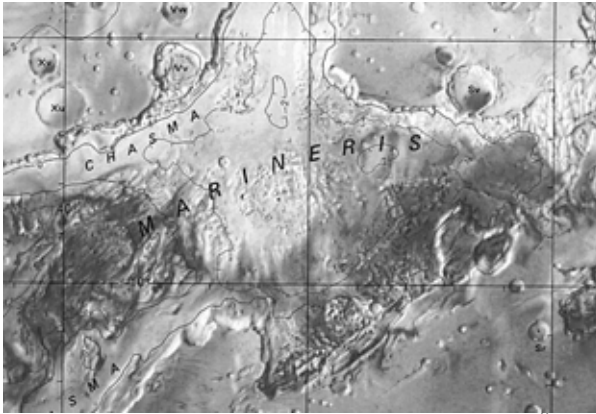


Bild 10. Übersicht über die Blätter des Mars-Kartenwerks im Maßstab 1:5 Millionen (Atlas of Mars 5 M) herausgegeben vom US Geological Survey

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



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

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

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

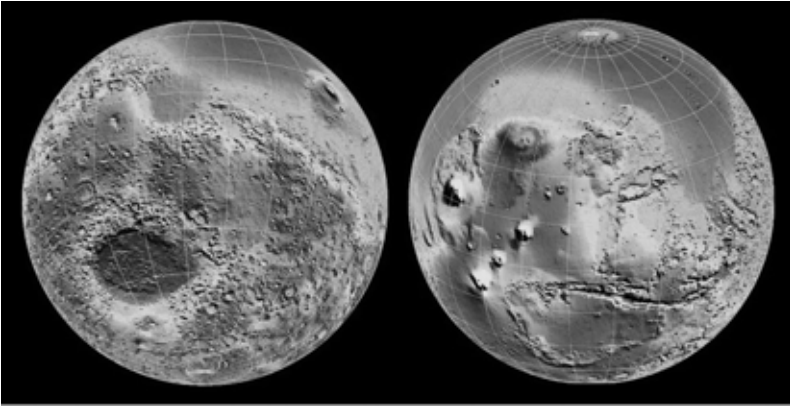


Bild 12. Höhenmodell des Planeten Mars nach Daten von MOLA (im Original farbig)

4. HRSC auf Mars Express

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

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

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

4.1 Die „High Resolution Stereo Camera“

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

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

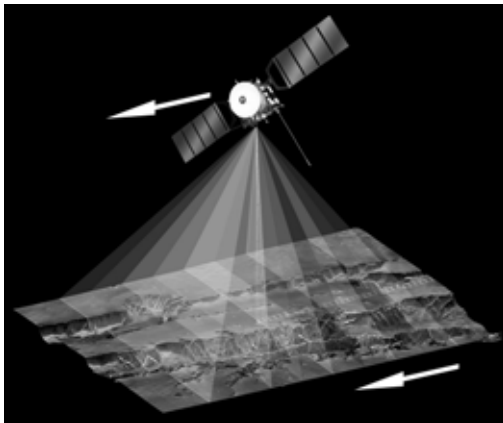


Bild 13. Schema der Datenaufnahme mit der HRSC in 9 Zeilen unter verschiedenen Neigungswinkeln

4.2 Datenaufnahme

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

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

4.3 Verarbeitung der HRSC-Bilddaten

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

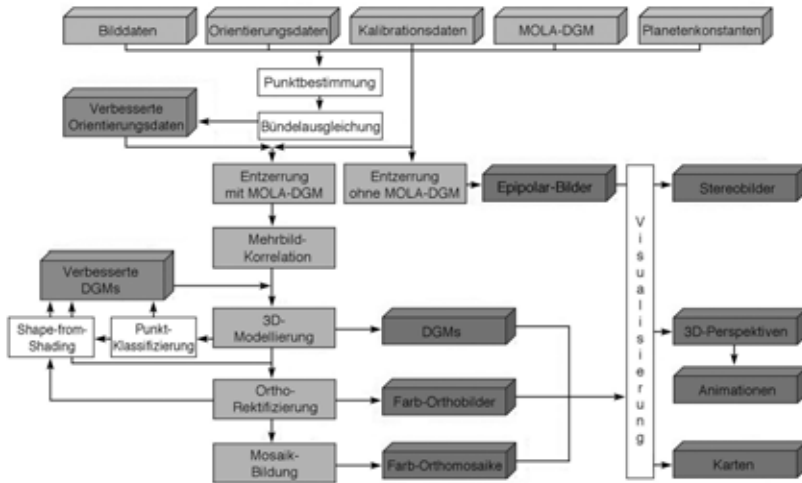


Bild 14. Schematische Übersicht über den Verfahrensablauf in der Prozessierung der HRSC-Daten vom Mars

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

5. „Die Topographic Image Map Mars 1:200 000“

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

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

5.1 Bezugssysteme

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

5.2 Kartenprojektionen

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

5.3 Blattschnitt



Bild 15. Schematische Übersicht über die Blatteinteilung der „Topographic Image Map Mars 1:200 000“

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

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

5.4 Kartenrandangaben

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

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

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

6. Das Software-Paket PIMap: „Planetary Image Mapper“

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

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

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

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

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

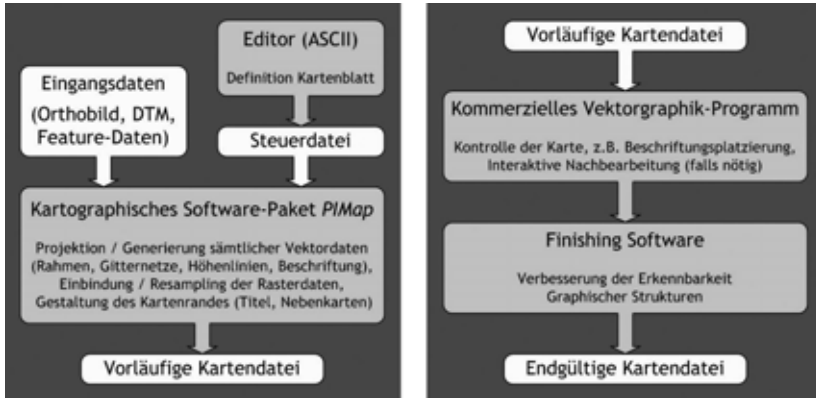


Bild 16. Datenfluss bei der Kartenherstellung mit PIMap. Links: Automatische Verarbeitung. Rechts: Interaktive Verbesserung

6.1 Funktionsumfang und Steuerung

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

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

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

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

6.2 Kartenfeld und Gitternetze

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

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

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

6.3 Einpassen der Bilddaten

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

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

6.4 Ableitung von Höhenlinien

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

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

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

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

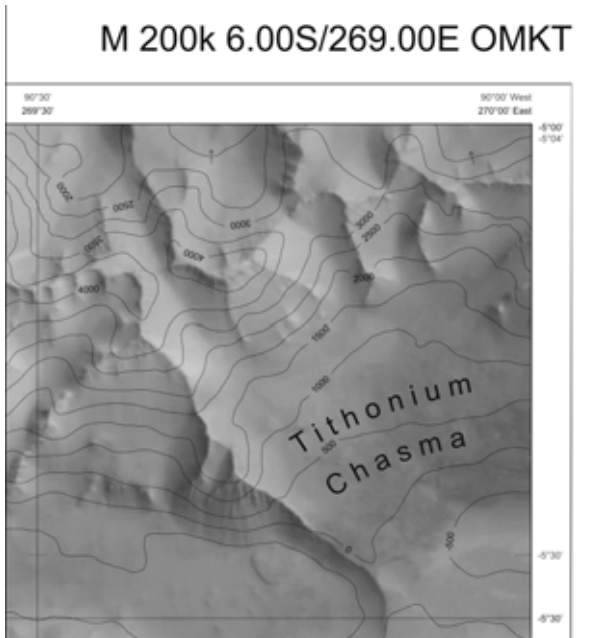


Bild 17. Verkleinerter Ausschnitt einer Karte 1:200 000 mit Höhenlinien, Höhenzahlen und Blattbezeichnung

6.5 Topographische Namen

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

Weiterhin sollten Beschriftungen keine relevanten Bildinhalte verdecken und beispielsweise Talverläufen folgen. Beides kann allein aus den gege-

benen Daten nicht realisiert werden und bedarf einer interaktiven Nachbearbeitung, insbesondere auch unter Berücksichtigung der zu Grunde liegenden Bilddaten. Dabei können Beschriftungen dem jeweiligen Objektverlauf angepasst werden.

6.6 Kartentitel und Blattbezeichnung

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

6.7 Gestaltung des Kartenrandes

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

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

7. Fazit und Ausblick

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

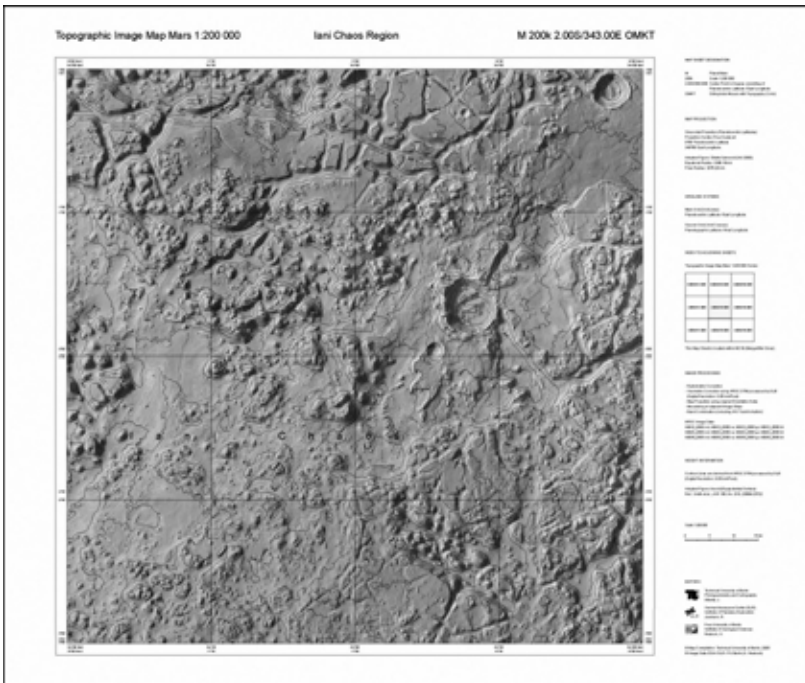


Bild 18. Stark verkleinertes Beispiel für ein Standardblatt des Kartenwerks „Topographic Image Map Mars 1:200 000“, das Blatt „M 200k 2.00S/343.00E OMKT, Iani Chaos Region“ (im Original farbig).

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

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

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

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

8. Literatur

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

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

Danksagung

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

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