

## 2. Kurzfassung

Diese Arbeit ist im Rahmen des DFG–Schwerpunktprogramms *Mars und die terrestrischen Planeten* mit der Ausrichtung *Chronostratigraphie des Mars* durchgeführt worden.

Die globalen stratigraphischen und geologischen Systeme für den Mars basieren auf Fernerkundungsdaten der Mariner 9 sowie der Vikingmission (Tanaka, 1986; Tanaka *et al.*, 1992a). Diese geologischen Untersuchungen sind in drei geologischen Karten mit einem 1:15M–Maßstab von Scott and Tanaka (1986); Greeley and Guest (1987); Tanaka and Scott (1987) zusammengefasst worden. Üblicherweise wurden die meisten oberflächenformenden Vorgänge in die frühe Phase der Marsentwicklung gelegt. Chrono–stratigraphische Schemata für den Mars wurden aus Bildmaterial und Kraterhäufigkeiten abgeleitet, die während der Mariner 9 sowie der Vikingmission aufgenommen wurden. Diese führten aber zu einer Vielzahl von chronologischen Systemen, denen der klare Konsens in den absoluten Altern fehlte (Hartmann, 1973b; Soderblom *et al.*, 1974; Neukum and Wise, 1976; Hartmann *et al.*, 1981; Neukum and Hiller, 1981; Neukum, 1983; Strom *et al.*, 1992). Missionen, gestartet in den späten 1990ern wie Mars Global Surveyor und Mars Odyssey, gaben sehr junge vulkanische Oberflächen preis, deren Alter den Kristallisationsaltern von einigen Marsmeteoriten entsprachen (Hartmann, 1999a). Außerdem deuteten globale Topographie– (Smith *et al.*, 1999a,b, Mars Orbiter Laser Altimeter) und Schweredaten (Zuber *et al.*, 2000) sowie die Entdeckung einer starken remanenten Magnetisierung der älteren Marskruste (Acuña *et al.*, 1999) eine weiter andauernde und mannigfaltigere Entwicklungsgeschichte an als zuvor gedacht.

Die Methoden der Altersbestimmung wurden in den späten 1960igern und frühen

1970igern entwickelt, als automatisierte und bemannte Missionen zum Mond die Gesteinsprobennahme, deren radiometrische Altersbestimmung (absolute Alter) und eine Korrelation dieser Alter mit Kraterhäufigkeiten (relative Alter) in der Landstellenumgebung erlaubten und Standards zur Kalibration von Kraterhäufigkeiten für den gesamten Mond und auch auf anderen Planeten setzten. Die Techniken, die in dieser Studie angewandt werden, entwickelten Neukum *et al.* (1975) für den Mond und stellten sie detailliert für den Mond und andere Planeten dar (Neukum, 1983). Diese methodischen Grundlagen können auf dem Mars (und anderen festen planetaren Körpern) gleichermaßen angewandt werden (Neukum and Wise, 1976; Neukum and Hiller, 1981; Neukum, 1983; Neukum and Ivanov, 1994) und haben sich als zuverlässiges Hilfsmittel erwiesen, um globale Altersabhängigkeiten zu bestimmen. 2001 wurde der erfolgreiche Versuch unternommen, die zugrunde liegende Einschlagschronologie und lunare Kraterproduktionsverteilung vom Mond auf den Mars zu übertragen (Neukum *et al.*, 2001; Hartmann and Neukum, 2001; Ivanov, 2001). Hierbei wurden verschiedene Ansätze zusammengeführt. Allerdings war es wegen der begrenzten Abdeckung und Bildauflösung der Vikingdaten nicht möglich, die Kraterproduktionsverteilung des Mars durchgehend zu bestimmen. Mit den neuen Bilddaten, die durch das High Resolution Stereo Camera (HRSC) Experiment an Bord der ESA–MarsExpress–Mission gesammelt werden, kann diese Lücke überwunden werden. Dieses Experiment erlaubt Aufnahmen, die große Flächen mit bis zu 11 Meter pro Bildpunkt auflösen. Diese Studie profitierte unter anderem von der privilegierten Nutzung des HRSC Bildmaterials.

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, das existierende chronostratigraphische System für den Mars zu verbessern und/oder zu bestätigen. Ein weiteres Ziel ist es, die globale Entwicklungsgeschichte des Mars zu verstehen, wobei der Schwerpunkt auf die altersmäßige Erfassung der vulkanischen und fluviatilen Prozesse gelegt wurde. Dies impliziert eine photogeologische Analyse der für den Mars verfügbaren Bilddaten, um die vielfältigen Landschaftsformen des Mars in zeitlicher und räumlicher Verteilung soweit wie möglich einzuordnen.

Um die Entwicklungsgeschichte des Mars zu enträtseln, beschäftigt sich ein beträchtlicher Teil diese Studie mit der Bestätigung der auf den Mars übertragenen theoretischen lunaren Kraterproduktionsverteilung und der Zuverlässigkeit des übertragenen Chronologiemodells. Innerhalb dieser Studie war es erstmals möglich, die für den Mars vorgeschlagene Kraterproduktionsverteilung über den gesamten Kraterdurchmesserbereich (von 50 Meter bis 500 Kilometer) zu belegen. Dies wurde erst durch die neuen Aufnahmen des HRSC-Experimentes an Bord des MarsExpress-Satelliten durchgängig möglich. Abweichungen von der bestätigten Mars-Standard-Kraterproduktionsverteilung deuten auf oberflächenverändernde Prozesse hin, die sich in einem Abknicken in der Verteilungskurve äußern. Für solche Fälle ist hier die Methode der Altersbestimmung verbessert und eine Prozedur entwickelt worden, die eine Alterseinordnung der Oberflächenüberprägung gestattet.

Ein weiterer Gegenstand dieser Studie ist, den Beitrag von bzw. die "Kontamination" durch Sekundärkrater zu untersuchen. Hierfür wurden theoretische Sekundärkraterverteilungen konstruiert und mit beobachteten Kratergrößenhäufigkeitsverteilungen verglichen. Es zeigt sich, dass die meisten Modelle zur Sekundärkratergenerierung die Zeitabhängigkeit dieses Prozesses ignorieren. Diesen Modellen folgend, wiese eine ältere Oberfläche einen höheren Sekundärkrateranteil auf, da

eine höhere Anzahl größerer Primärkrater Sekundärkrater zur Kraterverteilung beiträgt. Dies wird nicht beobachtet. Alle in dieser oder vergleichbaren Studien durchgeführten Messungen sind außerdem in einem Kraterdurchmesserbereich vorgenommen worden für den höchstens von einem 10-prozentigen Anteil an Sekundärkratern ausgegangen werden muss.

Neben dem Nachweis der Mars-Standard-Kraterproduktionsverteilung ist auch die Anwendbarkeit der übertragenen Einschlagschronologie getestet worden. Hierfür sind die Entstehungsalter der großen Einschlagsbecken (mit Durchmessern über 250 Kilometern) auf dem Mars bestimmt worden. Keines der Becken ist jünger als etwa 3,9 Ga (1 Ga =  $10^9$  Jahre = 1 Milliarde Jahre) alt. Dies stimmt mit der Situation auf dem Mond überein und auch mit der allgemeinen Annahme, dass der Fluss insbesondere der größten Projektile nach dem Ende des schweren Bombardement (heavy bombardment) als "Schwanzende" der Planetenentstehung abklingt und bekräftigt das Einschlagschronologiemodell. Weitläufige Gebiete, die durch Vulkanismus entstanden sind, zeigen Kraterhäufigkeiten und daraus abgeleitete absolute Oberflächenalter, die gut mit Kristallisationsaltern von basaltischen Marsmeteoriten übereinstimmen und somit die Anwendbarkeit des Chronologiemodells unterstreichen.

Nutzt man diese Befunde, kann die Entwicklungsgeschichte des Mars detailliert untersucht werden: In den Typregionen der geologischen Epochen des Mars (Noachium, Hesperium und Amazonium), wie z. B. Noachis Terra, Hesperia Planum, den nördlichen Tiefländern, Amazonis und Elysium Planitia, ist erneut gemessen worden. Von besonderem Interesse sind vulkanische, fluviatile und mögliche glaziale Prozesse. Kraterhäufigkeiten sind für geologische Einheiten bestimmt worden, die insbesondere in den die nördlichen Hemisphäre einnehmenden Tiefländern und Ausflusstälern, sowie an der Dichotomiegrenze zwischen Hoch- und Tiefland liegen. Ziel war es, die Rolle

des Wasser in der frühen Phase der Marsentwicklung besser zu verstehen. Episodische fluviatile Aktivität wird in Form von Talnetzwerken beobachtet, die man vorrangig in den alten Hochlandregionen findet. Die räumliche und zeitliche Koinzidenz von solchen fluviatilen Landschaftsräumen und krustaler remanenter Magnetisierung deutet darauf hin, dass eventuelle Niederschläge während eines vorhandenen dynamoinduzierten Magnetfeldes auftraten. Trotz der geringen Gravitation des Mars kann eine Atmosphäre stabil gehalten werden, wenn ein Magnetfeld vorhanden ist, und erlaubt einen möglichen Wasserkreislauf in der Frühphase der Marsentwicklung (bis vor etwa 3,7 Ga). Falls der Mars jemals einen Ozean in der nördlichen Tiefebene besessen hat, ist dieser spätestens vor etwa 3,7 Ga verschwunden. Während möglicher Oberflächenabfluss von Wasser – manifestiert in den Talnetzwerken – nur bis etwa vor 3,7 Ga auftrat, zeigt sich die letzte deutliche Oberflächenmodifikation durch fluviatile Aktivität in der Bildung der Ausflusstäler bis vor etwa 3,5 Ga. Letztere sind allerdings vermutlich durch vulkanische Aktivität im Einflussgebiet der größten Vulkanprovinz, der Tharsisaufwölbung, entstanden. Ähnliche Wechselwirkungen kann man auch an einigen Hochlandvulkanen, wie z.B. Hadriaca Patera, finden. Jüngere fluviatile Erosion ist eng mit vulkanischer Aktivität verknüpft, und ist episodisch auftretend über die letzten 2 Milliarden Jahre zu beobachten. Umfangreiche Messungen an den meisten Vulkanen und vielen vulkanischen Ebenen erlauben es die Entwicklungsgeschichte der Marsvulkane sehr genau zu interpretieren und bestätigen ein Wechselspiel zwischen vulkanischen Prozessen und früher als auch rezenterer fluviatiler und glazialer Aktivität. Global startete der Marsvulkanismus in der Frühphase der Marsentwicklung. Die meisten Vulkanebenen sind bis vor 3,7 Ga entstanden, z.B. Hesperia Planum. Die meisten Vulkane zeigen Aktivitätsphasen bis vor etwa 3,5 Ga und erreichen bis dahin ihre endgültige Größe. Folgende vulkanische Oberflächenüberprägung konnte die alten

großen Krater nicht auslöschen. Hieraus ist eine Abschwächung der vulkanischen Aktivität nach der Aufbauphase abzuleiten. Ein weiterer wichtiger Befund ist, dass die vulkanische Aktivität auf dem Mars bis in jüngste Zeit anhält (z. B. 2 Ma an den Flanken des Olympus Mons), und der junge Vulkanismus großflächiger ist als zuvor angenommen. Die Kristallisationsalter der basaltischen Marsmeteoriten (etwa 180 Ma, 450 Ma und 1,3 Ga) stützen diese Befunde. Erstmals konnte die Medusae Fossae Formation datiert werden, dies deutet darauf hin, dass explosiver Vulkanismus noch etwa vor 1,6 Ga aufgetreten sein könnte.

Diese Dissertation bietet erstmals eine kohärente Darstellung der Entwicklungsgeschichte des Mars, mit den Schwerpunkten Einschlagskraterentstehung, vulkanischen und fluviatilen (bzw. glazialen) Prozessen. Neben Tektonik und äolischer Staubverteilung, sind dies die bedeutendsten oberflächenformenden Prozesse auf dem Mars. Besonders die vulkanische und damit verbundene tektonische Aktivität spiegeln die innere Dynamik und thermische Entwicklung eines Planeten an der Oberfläche wider. Aus der Entwicklungsgeschichte der Marsvulkane, der Entstehungszeit der großen Einschlagsbecken und der Entwicklung der nördlichen Tiefen und der Dichotomiegrenze sind in dieser Dissertation die wesentlichen Zeitmarken bestimmt worden, um eine globale Entwicklungsgeschichte für den Mars aus diesen Altern abzuleiten. Das Kristallisationsalter des Marsmeteoriten ALH84001 belegt, dass sich die Marskruste vor etwa 4,5 Ga verfestigt hat, allerdings liegen die höchsten Alter der Hochlandgebiete, die mit der Kraterzählmethode bestimmt wurden, nur bei etwa 4,2 Ga. Die krustale Dichotomie hat sich vermutlich schon mit der Krustenentstehung ausgebildet, muss aber spätestens während der Entstehung der ältesten sichtbaren Einschlagsbecken Hellas und Isidis bestanden haben. Die morphologisch sichtbare Dichotomiegrenze, definiert als Grenze zwischen stark bekratertem Hochland und ebenem Tiefland, hat sich erst später gebildet. Das vermutliche Grundgestein

der nördlichen Tiefebene erscheint mindestens 3,8 Ga alt und ist von zwei Materialtypen überlagert. Die Ablagerungen wurden zum Teil durch fluviatile Aktivität während der Ausflusstälerentstehung bis vor etwa 3,5 Ga und zum Teil vulkanisch aus den beiden Vulkanzentren Tharsis und Elysium in die Tiefebene eingetragen. Die fluviatilen Landschaftsformen, die sich später als vor 3,5 Ga formten, sind durch vulkanische Aktivität (Aufschmelzen von Eis im Untergrund) verursacht worden.

Diese Studie zeigte, dass während der jüngsten Epoche, dem Amazonium, vielfältige Landschaftsformen hervorgebracht wurden, sie aber in der geologischen Einordnung des Mars drei Viertel der absoluten Zeitspanne einnimmt. Die in der nördlichen Tiefebene gemessenen Kratergrößenhäufigkeitsverteilungen zeigen deutlich oberflächenüberprägende Ereignisse und eine Uneinheitlichkeit im Alter. Das heißt, eine Überprüfung der zeitstratigraphischen Grenze zwischen dem Hesperium und Amazonium ist nötig. Die meisten meiner Untersuchungen, basierend auf hochaufgelösten Bilddaten (HRSC, THEMIS und MOC), zeigen, dass große Gebiete von vulkanischen Einheiten eingenommen werden, die vor weniger als 500 Ma geformt wurden. Außerdem sind viele Oberflächenformen (glazial und periglazial), wie z. B. Schuttschürzen (lobated debris aprons), linienhafte Talverfüllungen (lineated valley fill) oder Blockgletscher, entstanden. Diese sind möglicherweise Relikte aus Eiszeiten aus dem jüngsten Achtel der Marsgeschichte. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit einer Revision der jüngsten Epoche der Marszeitalter. Hochaufgelöste Bilddaten würden eine neue Unterteilung der letzten drei Milliarden Jahre (z.Z. durchgehend Amazonium) erlauben.

Vorausgesetzt, dass der in dieser Studie gesetzte Zeitrahmen stimmt, kann man auch die zeitliche Abfolge der thermodynamischen Entwicklung vom Mars besser einschätzen. Die offensichtliche Abwesenheit von Plattentektonik und das Vorhandensein großer Volumen stark magnetisierten, kristallinen Materials, das eines starken Dynamofeldes in der Frühphase der

Marsentwicklung bedurfte, machen den Mars zu einem interessanten Planeten im Vergleich zur thermodynamischen Entwicklung der Erde und anderer terrestrischer Körper im inneren Sonnensystem.