REGIO BASILIENSIS 62/1 2021 S. 35-44

Geographie auf dem Mars: der Beitrag der Universität Basel zur ExoMars 2022 Mission

Nikolaus Kuhn

Zusammenfassung
Da die Erforschung des Sonnensystems wesentlich zum Verständnis der Erde beiträgt, sind auch Geographinnen und Geographen daran beteiligt. 2022 startet die ESA eine Mission zum Mars, während der der Rover "Rosalind Franklin" nach Spuren von Leben suchen wird. Die Forschungsgruppe Physiogeographie und Umweltwandel der Universität Basel ist an dieser Mission beteiligt: Hier wird die Arbeit mit dem Close-Up Imager (CLUPI), einer hochauflösenden Kamera an Bord des Rovers, im Marslabor der Universität vorbereitet. Hauptziel ist die Identifikation idealer Aufnahmebedingungen auf dem Mars und das Erstellen eines Aufnahmekatalogs zur Gesteinsbestimmung mit Hilfe von CLUPI.

1 Einleitung

1.1 Die ExoMars Mission

Die Europäische Weltraumorganisation ESA startet 2022 gemeinsam mit ihrem Partner Roskosmos – der Weltraumagentur der Russischen Föderation – den zweiten Teil der ExoMars Mission (🌍1). Ziel dieser Mission ist die Suche nach Spuren von gegenwärtigem und vergangenem Leben auf dem Mars. Diese Grundlagenforschung fällt im engeren Sinn in das Feld der Exobiologie, daher die Bezeichnung ExoMars. Eine erste Mission startete 2016 und brachte den Spurengasorbiter (Trace Gas Orbiter TGO) in eine Umlaufbahn um den Mars. Die wichtigste Aufgabe des TGO ist die Messung der Konzentration von Methan und dessen Zerfallsprodukten in der Atmosphäre des Mars. Dies ist von Relevanz, da biologische Ursachen für zeitlich und räumlich variable Konzentrationen dieser Moleküle verantwortlich sein könnten. Der anstehende zweite Teil der Mission hat die Oberfläche des Mars selbst zum Ziel und soll dort einen Rover absetzen (Abb. 1). Der Rover ist nach der Biochemikerin Rosalind Franklin benannt, die als Mitarbeiterin von James Watson und Francis Crick in den 1950er Jahren an der Entschlüsselung der DNA am Kings Colle-

Adresse des Autors: Prof. Nikolaus Kuhn, PhD, Physical Geography and Environmental Change Research Group, University of Basel, Klingelbergstr. 27, CH-4056 Basel; E-Mail: nikolaus.kuhn@unibas.ch

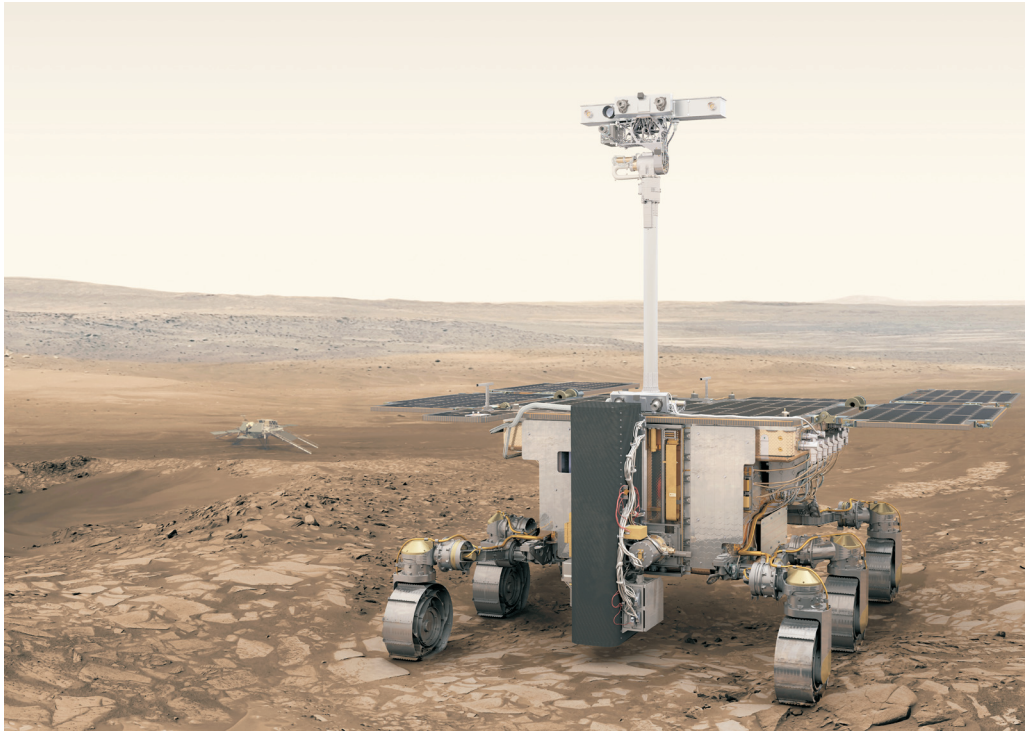

Abb. 1 ExoMars Rover “Rosalind Franklin” (Quelle: 🌍2). Die schwarze Box am vorderen Kopfende von “Rosalind Franklin” ist ein Probennehmer. Der Close-Up Imager CLUPI ist links am Probennehmer zu sehen. Die Box mit dem Probennehmer kann geschwenkt werden, was CLUPI Aufnahmen zur Seite und über einen Spiegel nach vorne ermöglicht.

ge in London arbeitete und durch ihre Röntgenanalysen die theoretischen Überlegungen zur Struktur von DNA durch Messungen belegen konnte (🌍3). Sie verstarb bereits 1958 an Krebs und erfuhr erst Jahrzehnte nach ihrem Tod eine angemessene Anerkennung ihrer bahnbrechenden Forschungsbeiträge. Die Bedeutung ihrer Arbeit bei der Entschlüsselung der für das Leben wesentlichen Moleküle motivierte die ESA, den ExoMars Rover “Rosalind Franklin” zu nennen.

Der Rover trägt eine Reihe von Kameras und Analysegeräten, die es ermöglichen, nach fossilen Spuren von Leben in Gesteinen zu suchen. “Rosalind Franklin” bietet zum ersten Mal die Möglichkeit, auf dem Mars nach Molekülen zu suchen, die einen biologischen Ursprung haben. Nach mehreren Verzögerungen ist der Start aktuell für September 2022 vom russischen Weltraumbahnhof Baikonur in Kasachstan geplant. Die Landung auf dem Mars soll am 10. Juni 2023 stattfinden. Das Landegebiet liegt im Oxia Planum, einer Region nördlich des Marsäquators, die eine grosse Vielfalt an Sedimentgesteinen aus einer Zeit vor 3.0 bis 3.5 Milliarden Jahren bietet. Zu jener Zeit war das Klima des Mars wesentlich wärmer und feuchter als heute (*Kuhn* 2014).

1.2 Exobiologie und Exogeographie

Ziel der Exobiologie ist das Finden und die Erforschung von Leben ausserhalb unseres Planeten. Im vorliegenden Fall ist es die Suche nach Spuren von Leben auf dem Mars sowie die Untersuchung der Bedingungen unter denen Leben hier entstehen kann. Das hohe Alter der Sedimentgesteine an der Oberfläche des Mars macht dies möglich. Auf dem Mars gibt es seit über zwei Milliarden Jahren kaum noch plattentektonische Aktivität und als Folge des trockenen und kalten Klimas sind Verwitterung und Verlagerung von Oberflächenmaterial sehr eingeschränkt. Dies hat Sedimentgesteine aus der frühen Zeit des Planeten erhalten, wohingegen auf der Erde entsprechende biogene Ablagerungen oder mit biologischem Material angereicherte Sedimente weitgehend durch Erosion und Metamorphose zerstört oder zumindest verändert wurden. Neben der Suche nach Leben ist für die Geowissenschaften die Rekonstruktion des Zusammenwirkens der Sphären eines jungen terrestrischen Planeten von Interesse, auch hier sind die Umweltarchive des Mars besser als die der Erde erhalten. Fragen warum sowohl Erde wie Mars während der ersten Milliarde Jahren ihres Bestehens wärmer waren als heute (trotz einer 30 % geringeren Strahlung der Sonne) können so beantwortet werden.

Tab. 1 Grösse, Umlaufbahn und Klima von Erde und Mars im Vergleich.

	Durchmesser km	**Sonnenabstand 10^6 km**	**Jahreslänge Tage**	**Tageslänge Stunden**	**Temperatur °C**	**Luftdruck hPa**
Mars	6792 km	230	687	24:37	-63	6
Erde	12756 km	149	365	24:00	15	1014

Die Grundlagenforschung in Biologie und Erdsystemwissenschaften kann nicht ohne die Berücksichtigung der “Geo”-graphie eines Planeten erfolgen. Dementsprechend befasst sich die Exogeographie mit der Erfassung, Darstellung und Erklärung der Oberflächen von nicht-irdischen Himmelskörpern (*McSween* et al. 2019). Aufgrund der räumlichen Nähe und der Anzahl der Missionen bilden Mond und Mars aktuell Schwerpunkte in dieser noch jungen Forschungsdisziplin. Die fehlende Biosphäre der Monde und Planeten in unserem Sonnensystem setzt weiterhin einen Schwerpunkt der Exogeographie in der Geomorphologie, oft auch als planetare Geomorphologie bezeichnet. Abbildung 2 illustriert den Beitrag der planetaren Geomorphologie bei der Suche nach Spuren von Leben auf dem Mars. Abgebildet ist eine hochauflösende Aufnahme des Landegebiets von “Rosalind Franklin” und dessen Landschaftsformen. Wesentlich für die Auswahl des Landegebiets war der ESA die Wahrscheinlichkeit, dass sich dort vor gut 3 Milliarden Jahren ein mikrobielles Habitat hätte entwickeln können und dass allfällige fossile Spuren dort erhalten und zugänglich sind (🌍$_2$).

1.3 Erkundung der Marsoberfläche durch “Rosalind Franklin”

“Rosalind Franklin” wird auf dem Mars semi-autonom nach Spuren von Leben suchen. Dies bedeutet, dass dem Rover während der kurzen (pro Tag etwa zehn-minütigen) Phase der Kommunikation mit der Erde Aufgaben für den Zeitraum bis zur nächsten Kommunikation gestellt werden. Die kurze und in der Datenmenge eingeschränkte Kommunikation mit dem Rover erfordert ein systematisches Vorgehen bei der Suche nach Spuren von Leben. Dieses Vorgehen wird als “Exploration Cascade” bezeichnet. Zunächst werden dazu die Aufnahmen von Panoramakameras

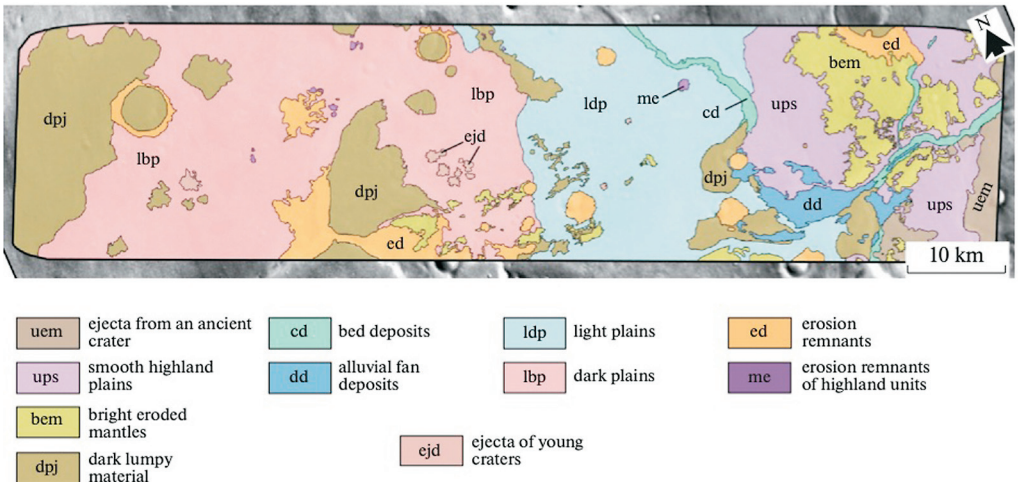

Abb. 2 Landformen von Oxia Planum (Quelle: *Ivanova* 2020). Die Identifikation der fluvialen Ablagerungen sowie der Verlagerung von Sediment aus den höhergelegenen Gebieten im Osten des Untersuchungsgebiets nach Westen und deren aktuelle Lage (cd,dd) sind ein wesentlicher Beitrag der Geomorphologie bei der Rekonstruktion der Umweltgeschichte des Mars sowie der Suche nach Umweltarchiven, die Spuren von Leben enthalten könnten.

verwendet, um die Umgebung des Rovers zu erfassen und nach Aufschlüssen von Sedimentgesteinen zu suchen. Nach der Identifikation eines interessanten Aufschlusses bewegt sich "Rosalind Franklin" auf diesen zu und macht mit weiteren Kameras Aufnahmen, um damit die Bestimmung des Gesteins und dessen Aufbau zu ermöglichen. Liefert diese Erkundung weiterhin vielversprechende Ergebnisse, kann mit Hilfe eines Bohrers eine Probe des Gesteins aus bis zu zwei Metern Tiefe entnommen und im Anschluss mit einem Massenspektrometer im Innern des Rovers auf organische Moleküle mikrobiologischen Ursprungs untersucht werden.

1.4 Der Close-Up Imager (CLUPI)

Eine der Kameras in der Exploration Cascade von "Rosalind Franklin" ist der Close-Up Imager "CLUPI" (Abb. 3). Die Kamera wurde entwickelt, um aus kurzer Distanz eine hochauflösende Aufnahme von Gesteinen im für das menschliche Auge sichtbaren Bereich zu erstellen, um so die Struktur und Zusammensetzung des Gesteins zu bestimmen (*Josset* et al. 2017). Die von CLUPI gewonnenen Daten werden so verarbeitet, dass das Bild eines Gesteins so aussieht, als wäre es unter irdischen Belichtungsbedingungen (auf der Erde) gemacht worden. Der Einfluss der aufgrund der grösseren Entfernung zur Sonne dunkleren Oberflächenverhältnisse, im Prinzip ein Dämmerlicht, werden so kompensiert, ebenso wird eine Atmosphärenkorrektur durchgeführt. Ein Bild "wie auf der Erde" ermöglicht es so Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, ihr Wissen über irdische Gesteine auf die CLUPI-Aufnahmen anzuwenden.

Kameras mit ähnlichen Aufgaben wie CLUPI wurden bereits von den Mars Rovern der NASA "Spirit", "Opportunity" und "Curiosity" verwendet (🌍4). Die ursprüngliche Aufgabe dieser hochauflösenden Kameras war es, den Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen auf der Erde Aufnahmen mit einem Grad an Detail ähnlich dem, den eine feldgeologische Lupe bietet, zu liefern. In der Exploration Cascade von "Rosalind Franklin" ist CLUPI die letzte in einer Reihe von Kameras, welche Panoramen der Landschaft (Panorama Camera, "PanCam"), Detailaufnahmen von

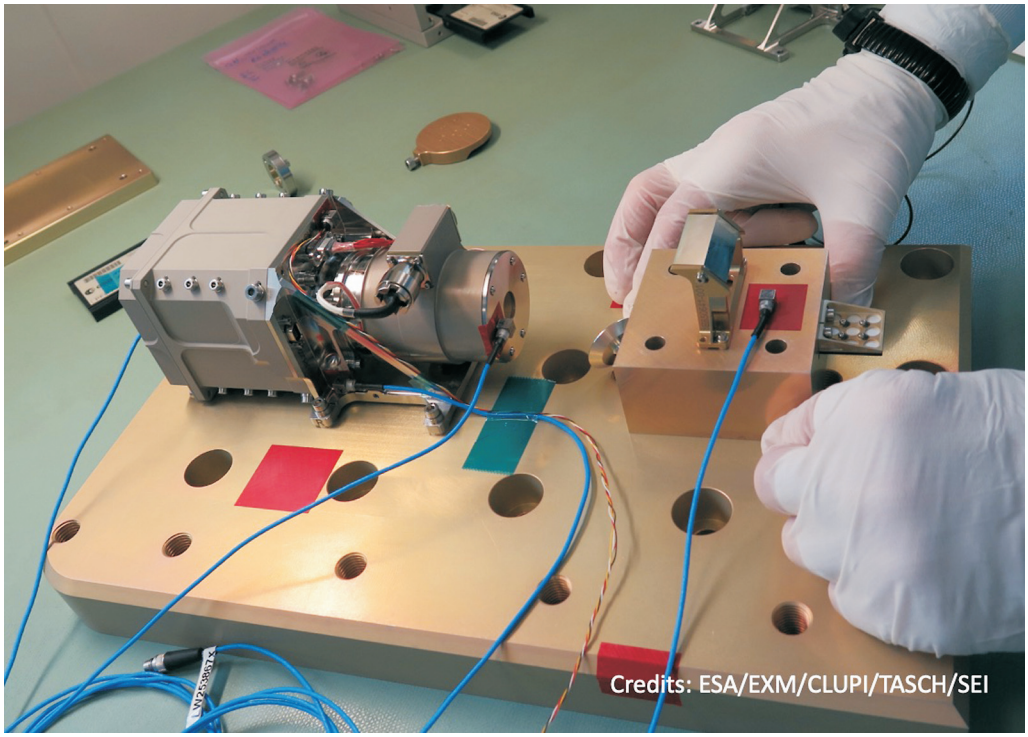

Abb. 3 Der Close-Up Imager während Tests 2019 am European Space Research and Technology Center in Nordwijk, Niederlande. (Quelle: ESA/ EXM/ CLUPI/ TASCH/ SEI)

einzelnen Formen (High Resolution Camera, "HRC") und CLUPI für hochauflösende Bilder von Gesteinen liefern. In der geringsten möglichen Aufnahmedistanz von 10 cm beträgt die Auflösung, also die Seitenlänge eines Pixels, noch 7 µm, in grösseren Distanzen steigt die in einem Pixel erfasste Fläche auf 79 µm in einem Meter und 1 mm in 6 m Entfernung an. Der Umstand, dass mit CLUPI auch deutliche Aufnahmen in grösserer Entfernung als jener der üblichen Nutzung einer geologischen Feldlupe gemacht werden können, hat das Spektrum der Anwendung der Kamera während einer Mission wesentlich erweitert. Sandkörner mit einem Durchmesser von 1 mm lassen sich zumindest theoretisch noch aus einer Entfernung von 5 m erkennen, ebenso fein laminierte Sedimentschichten (*Josset* et al. 2017). Dies eröffnet die Möglichkeit, mit einem möglichst kurzen Fahrweg des Rovers eine Vielzahl an Aufschlüssen zu untersuchen. Allerdings kann die Grösse der in einem Pixel abgebildeten Fläche nicht ohne Weiteres mit der Grösse des kleinsten noch zu erkennenden Objekts gleichgesetzt werden. Wenn sich beispielsweise die Farbe einzelner benachbarter Sandkörner nicht unterscheidet, dann werden sie als Gruppe von Pixeln mit gleicher Farbe abgebildet. Ein wesentlicher Teil der Vorbereitung der Arbeit mit CLUPI während der ExoMars Mission besteht daher darin, die Aufnahmebedingungen zu identifizieren, welche die Beschreibung und Bestimmung eines Gesteins aus der grösstmöglichen Entfernung zulassen. Diesen Beitrag zur ExoMars Mission leistet die Universität Basel.

2 Das Marslabor der Forschungsgruppe Physiogeographie und Umweltwandel

2.1 Der Close-Up Imager und die Marsforschung der Basler Physiogeographie

Die Forschungsgruppe Physiogeographie und Umweltwandel der Universität Basel ist Teil des CLUPI Science Teams, welches unter der Leitung des Space Exploration Institutes aus Neuchâtel die wissenschaftliche Arbeit mit CLUPI im Rahmen der ExoMars Mission für die ESA durchführt. CLUPI selbst wurde von Thales Alenia Switzerland als Schweizer Beitrag zur ExoMars Mission gebaut und vom Swiss Space Office finanziert. Der Beitrag der Universität Basel zur Vorbereitung der ExoMars Mission findet grösstenteils im für diesen Zweck eingerichteten Marslabor im Technologiezentrum Witterswil statt. Neben Mitteln der Universität Basel wird die Arbeit vom Schweizer Nationalfonds gefördert.

Die Qualität der Aufnahmen, die CLUPI für die Bestimmung von Gesteinen liefert, ist nicht nur von der Entfernung der Kamera zum Gestein und dessen Korngrösse und Farbe bestimmt, sondern auch von dem Zusammenwirken der Gesteinsoberfläche mit dem einfallenden und reflektierten Sonnenlicht. Abb. 4 illustriert diesen Zusammenhang: Beide Bilder zeigen denselben Sandstein, 4a mit Beleuchtung von links oben, 4b in direktem Licht. Für das menschliche Auge ist bei seitlicher Beleuchtung die Wahrnehmung einzelner Sandkörner einfacher, weil diese durch die Schatten akzentuiert werden. Allerdings verdecken die Schatten auch grössere Ausschnitte des Gesteins, was eine Bestimmung der Korngrösse und Beschreibung der Form der Sandkörner durch Vermessung erschwert, da nur ein Teil der Körner erfasst werden kann. Die Bedeutung der optimalen Beleuchtung für die von CLUPI zur Erde gesendeten Aufnahmen wird durch die geringe Datenmenge – je nach Konstellation von Erde, Mars und den als Relaisstation verwendeten Orbitern – im Bereich von 1 MB am Tag, die zwischen Rover und Erde übertragen werden kann, verstärkt: Während der Erkundung des Landegebiets und der Suche nach einer Gesteinsschicht, welche Spuren von Leben enthalten könnte, ist etwa eine Aufnahme mit CLUPI und deren Übertragung zur Erde pro Tag möglich. Die optimale Beleuchtung des Aufschlusses ist daher wesentlich für den Informationsgehalt des Bildes. Im Marslabor der Universität Basel werden entsprechende Szenarien durchgespielt. Die Einrichtung hatte zum Ziel, ein Fotostudio einzurichten, das die Simulation von Lichtverhältnissen, die jenen auf dem Mars ähneln, ermöglicht.

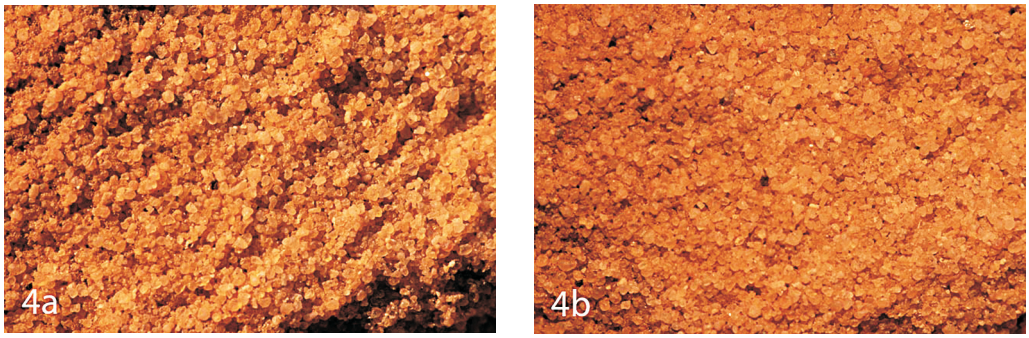

Abb. 4a/b Nahaufnahmen eines Sandsteins äolischen Ursprungs. Die Grösse der Bilder ist jeweils 3x2 cm, beide Aufnahmen zeigen denselben Stein. Die Einfallsrichtung des Lichts führt zu einer unterschiedlichen Qualität der Aufnahme, bei schrägem Einfall (a) sind einzelne Körner und Farben für das menschliche Auge besser zu erkennen, wohingegen bei direktem Licht (b) keine Schatten auftreten und so eine automatisierte Erkennung von Sandkörnern und Vermessung von deren Grösse erleichtern. (Quelle: Marslabor Universität Basel)

Kernstück des Marslabors ist ein 35 m^2 grosser Marsgarten, also eine Fläche, welche in Material und Farbe jener des Mars möglichst ähnlich ist. Der Boden der Fläche kann wahlweise mit einer Mischung aus hämatitreichem roten Sand oder feinem gebrochenen Basalt bedeckt werden. Mit diesen beiden Sedimenten können die Grundfarben der Marsoberfläche, das Rot der weitverbreiteten Staubschicht und das Grau der dominierenden vulkanischen Gesteine, simuliert werden. Um diese Bodenfläche des Marsgartens wurde mit Hilfe einer hochauflösenden Panoramaaufnahme des "Curiosity" Rovers der NASA ein Hintergrund geschaffen, der Licht indirekt in einem Spektrum reflektiert, wie es auf dem Mars zu erwarten wäre. Direktes und indirektes Licht werden mit einer Auswahl an Lampen simuliert. Gesteinsproben, die Eigenschaften besitzen, die man mit Hilfe von CLUPI identifizieren möchte, können in einem künstlichen Aufschluss platziert werden, um so eine für die ExoMars Mission realistische Simulation der Aufnahmesituation zu arrangieren.

Die Aufnahmen selbst werden vorwiegend mit zwei Kameras durchgeführt: Zum einen mit einer handelsüblichen Spiegelreflexkamera, die mit einem Makroobjektiv versehen ist, das die Aufnahme von Bildausschnitten wie diejenigen, welche von CLUPI geliefert werden, ermöglicht. Die zweite Kamera ist das sogenannte Flight Representative Test Model (FRTM) von CLUPI, also ein exakter Nachbau der Kamera, die mit "Rosalind Franklin" zum Mars fliegt. Die einzigen Unterschiede sind der Verzicht auf spezielle Schutzvorrichtungen, welche für Start, Transfer und Landung sowie die extremen Verhältnisse auf dem Mars notwendig sind. Ausserdem kann das FRTM mit Hilfe handelsüblicher Computer gesteuert werden, im Gegensatz zu CLUPI, dessen Programmierung auf das Betriebssystem des Rovers abgestimmt ist.

Abb. 5 Turtle Rover mit Kamerasimulator im Marslabor der Universität Basel. (Quelle: Marslabor Universität Basel)

2.2 Das Marslabor der Universität Basel und die ExoMars Mission

Im Marslabor der Universität Basel werden in Abstimmung mit den übrigen Projektpartnern vor allem Aufnahmen und Bildanalysen aus Distanzen bis zu zehn Metern bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen untersucht. Dabei geht es nicht nur darum herauszufinden, in welcher Entfernung und Beleuchtung einzelne Schichten, Minerale oder Körner in Gesteinen zu erkennen sind, sondern auch, welche spektrale Signatur diese Gesteine in einer Aufnahme zeigen, selbst wenn einzelne Objekte nicht zu erkennen sind. Abb. 6 illustriert dieses Ziel der Arbeit: Links sind die Pixel einer etwa 25 cm^2 grossen Fläche eines Sandsteins aus etwa 1 mm grossen Quartzkörnern zu sehen, der aus zehn Metern Entfernung mit dem CLUPI-Simulator aufgenommen wurde, die rechte Aufnahme zeigt einen entsprechend fotografierten Sandstein, der aus 75 µm grossen Körnern besteht. Obwohl in beiden Aufnahmen die Auflösung nicht ausreicht, um einzelne Sandkörner zu identifizieren, wird doch deutlich, dass der 1 mm Sandstein ein wesentlich breiteres Farbspektrum und grössere Farbunterschiede zwischen benachbarten Pixeln in der Aufnahme zeigt als der Sandstein mit feinerer Körnung. Dementsprechend könnte man die Gesteine also auch anhand dieser Signaturen aus grösserer Entfernung bestimmen. Diese Kapazität ist für die Mission von "Rosalind Franklin" von grossem Wert, da sich die Fahrwege des Rovers zwischen Aufschlüssen auf dem Mars so verkürzen lassen, was eine grössere Auswahl an Studienobjekten während der zunächst auf sechs Monate angelegten Mission zulässt. Ein weiteres Ziel der Arbeit im Marslabor ist daher das Erstellen eines Katalogs von spektralen Signaturen der Gesteine, die man im Landegebiet Oxia Planum erwartet. Dazu werden Aufnahmen der CLUPI-Simulatoren und dem FRTM im Marslabor erstellt und so bearbeitet, dass für die Betrachter vergleichbare Aufnahmen entstehen. Die Bildverarbeitung greift dabei auf Verfahren zurück, die in der Petrologie, aber auch der Fernerkundung entwickelt wurden (*McSween* et al. 2019).

Die Auswahl an Gesteinen, die im Marslabor verwendet werden, umfasst alle Arten von Sedimentgesteinen. Das Vorkommen von biogenen organischen Substanzen ist in feinkörnigen limnischen oder marinen Sedimenten am grössten, insbesondere wenn deren Struktur biogene Formen, wie beispielsweise in Stromatolithen, aufweist. Grobkörnigere Gesteine, beispielsweise in

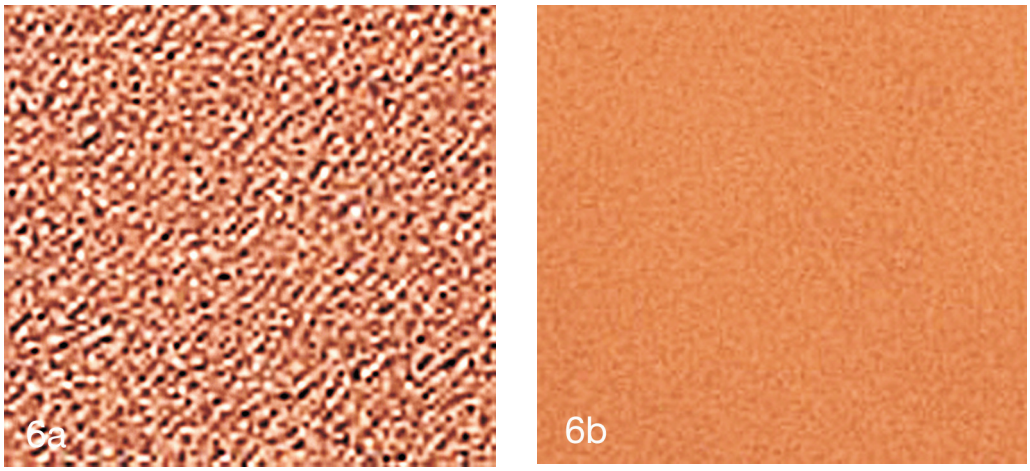

Abb.6a/b Zwei Sandsteine, Abb. 6a mit Körnern von ca. einem Millimeter Durchmesser, Abb. 6b mit Körnern von 75 Mikrometer, aufgenommen im Marslabor aus 10 Metern Entfernung mit der CLUPI-Simulator Kamera. Einzelne Körner können nicht erkannt werden, Unterschiede werden jedoch in Farben der Nachbarpixel deutlich. Diese Information kann zur Gesteinsbestimmung verwendet werden. (Quelle: Marslabor Universität Basel)

Schwemmfächern oder in alluvialen Ablagerungen, geben dagegen Hinweise auf die räumlichen Muster der Ablagerungsformen und somit die Lage von feinkörnigeren Gesteinen relativ zum Standort des Rovers. Des Weiteren werden alle Gesteine untersucht, welche Spuren hydrothermaler Veränderung aufweisen, da dies ebenfalls ein Hinweis auf ein Paläohabitat ist.

Neben diesen Arbeiten an Lichtverhältnissen und spektralen Signaturen von Gesteinen können im Marslabor auch einfache Missionsabläufe mit Hilfe eines ferngesteuerten Rovers simuliert werden. Zu diesem Zweck wurde ein Turtle Rover (🌍5) mit der Kamera, welche zur Simulation der CLUPI-Aufnahmen verwendet wird, ausgestattet (Abb. 5). Weitere Kameras mit geringerer Auflösung, jedoch grösserem Sichtfeld, können zur Navigation des Rovers verwendet werden. Mit dem Rover werden insbesondere vereinfachte Exploration Cascades simuliert sowie die Abläufe bei der Annäherung und Aufnahme eines Gesteins in einzelnen Schritten erarbeitet und durchgeführt. Tabelle 2 zeigt einen typischen Ablauf einer solchen Simulation. Der Zweck dieser Simulationen liegt in erster Linie darin, den beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern einen Einblick in die einzelnen Arbeitsschritte zu geben, die CLUPI und "Rosalind Franklin" durchführen müssen, um tatsächlich eine Aufnahme auf dem Mars zu machen. Die Entwicklung eines guten Verständnisses für die Zeit, Energie und Datenübertragung, die "Rosalind Franklin" während eines Missionstages zur Verfügung stehen, ist für eine effiziente Planung der Missionsabläufe wesentlich. Im Marslabor sollen ausserdem nach der Landung von "Rosalind Franklin" auf dem Mars mögliche Szenarien von Abläufen zu Aufnahme der dort real vorgefundenen Gesteine simuliert werden, um so das Vorgehen während der Mission zu optimieren.

Tab. 2 Ablauf einer CLUPI-Aufnahme. (Quelle: Marslabor Universität Basel)

Schritt	Aktion	Dauer (Min)
1	Rover: 2 m in Richtung 240° bewegen	05:00
2	CLUPI aktivieren	01:00
3	CLUPI in Richtung 170° mit einem Azimuth von -45° bewegen	02:00
4	Aufnahme	00:30
5	Transfer der Bilddaten von CLUPI in das Datenpaket für den Transfer zur Erde	00:30
6	CLUPI zurück in Ausgangsposition bewegen	02:00
7	CLUPI ausschalten	01:00

3 Fazit: Geographie auf dem Mars

Geographie und insbesondere die Geomorphologie sind seit dem Beginn der Erkundung der von Monden und Planeten Teil der Erforschung unseres Sonnensystems. Neben der Interpretation von Teleskop- und Orbiteraufnahmen haben in den letzten beiden Jahrzehnten die erfolgreichen Missionen von Rovern auf dem Mars den Bedarf insbesondere an einer fundierten geomorphologischen Interpretation der Landschafts- und Detailaufnahmen wesentlich gesteigert. Dementsprechend hat sich der Zweig der planetaren Geomorphologie zu einer eigenständigen Teildisziplin entwickelt. Hauptziele sind ein Beitrag zum Verständnis der Entwicklung der terrestrischen Planeten in der Frühzeit ihrer Geschichte, also den ersten beiden Milliarden Jahren nach der Entstehung des Sonnensystems. Des Weiteren unterstützt die Exogeomorphologie die Suche nach Spuren von mikrobiellem Leben auf dem Mars, was einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der

Bedingungen leistet, unter denen Leben entstehen kann. Der Rover "Rosalind Franklin", der im Rahmen der ExoMars Mission von ESA Roskosmos zum Mars geschickt wird, hat zum Ziel, nach fossilen Spuren von Leben auf dem Mars zu suchen. Neben Instrumenten zur Analyse von Probenmaterial spielen eine Reihe von Kameras bei der Suche nach Gesteinen, die potenziell Spuren von Leben enthalten, eine wesentliche Rolle. Eine dieser Kameras ist der Close-Up Imager CLUPI, welcher hochauflösende Aufnahmen von Gesteinen liefert. Im Marslabor der Universität Basel wird die Nutzung von CLUPI vorbereitet. Dabei werden insbesondere die Lichtverhältnisse in den Landschaften des Mars simuliert, um die Aufnahmen, die CLUPI liefern wird, zu optimieren. Diese Vorbereitung sowie die Analyse der Aufnahmen, angelehnt an digitale Verfahren aus der Fernerkundung, trägt so wesentlich zu den Zielen der ExoMars Mission, der Suche nach Spuren von Leben auf dem Mars, bei.

Literatur

Ivanova M. A., Slyutaa E. N., Grishakinaa E. A. & Dmitrovskiia A. A. 2020. Geomorphological Analysis of ExoMars Candidate Landing Site Oxia Planum. *Solar System Research* 54/1: 3–17.

Josset J.-L., Westall F., Hofmann B.A., Spray J., Cockell C., Kempe S., Griffiths A.D., De Sanctis M.C., Colangeli L., Koschny D., Föllmi K., Verrecchia E., Diamond L., Josset M., Javaux E.J., Esposito F., Gunn M., Souchon-Leitner A.L., Bontognali T.R.R., Korablev O., Erkman S., Paar G., Ulamec S., Foucher F., Martin P., Verhaeghe A., Tanevski M. & Vago J.L. 2017. The Close-Up Imager Onboard the ESA ExoMars Rover: Objectives, Description, Operations, and Science Validation Activities. *Astrobiology* 17/6-7: 595–611.

Kuhn N.J. 2014. *Experiments in Reduced Gravity. Sediment Settling on Mars. Sedimentation on Mars*. Amsterdam, 1–50.

McSween Jr H.Y., Moersch J.E., Burr D.M., Dunne W.M., Emery J.P., Kah L.C. & McCanta, M.C. 2019. *Planetary Geosciences*. Cambridge, 1–350.

Internetquellen

1 http://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/ExoMars [Eingesehen am: 08.10.2020]

2 https://exploration.esa.int/s/WnjRdxW [Eingesehen am: 08.10.2020]

3 https://www.fembio.org/biographie.php/frau/biographie/rosalind-franklin [Eingesehen am: 23.12/2020]

4 https://mars.nasa.gov/msl/spacecrat/instruments/mahli/ [Eingesehen am: 08.10.2020]

5 https://docs.turtlerover.com [Eingesehen am: 08.10.2020]