



Abschlussbericht

Vorhaben 50 OO 2102

Titel

Künstliche Intelligenz (KI)-gesteuerte Datenprozessierung und -auswertung mit der Multi-temporalen Datenbank (MUTED)

Ausführendes Institut

Institut für Planetologie (IfP)
Universität Münster
Wilhelm-Klemm-Str. 10
48149 Münster
Tel.: 0251 – 83 33424 (Sekretariat)

Projektleiter

Prof. Dr. Harald Hiesinger
hiesinger@uni-muenster.de
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7688-1965>

Mitarbeiter

Dr. Thomas Heyer (03/2021 – 03/2025)
Dr. Wajiha Iqbal (03/2021 – 01/2025)
Dr. Nico Schmedemann (03/2021 – 03/2025) G

Bewilligungs- und Berichtszeitraum

01.03.2021 – 31.03.2025

I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projekts „Künstliche Intelligenz (KI)-gesteuerte Datenprozessierung und -auswertung mit der Multi-temporalen Datenbank (MUTED)“ (FKZ 50 OO 2102) war die Weiterentwicklung der Multi-Temporalen Datenbank für planetare Bilddaten (MUTED). Diese wurde seit 2011 am Institut für Planetologie der Universität Münster von Grund auf neu konzipiert und entwickelt. Sie stellt ein leistungsfähiges Werkzeug zur Identifizierung der räumlich-zeitlichen Abdeckung planetarer Bilddaten dar. Ursprünglich wurde MUTED speziell für die Erforschung des Mars unter Nutzung der High Resolution Stereo Camera (HRSC) der Mars Express Mission konzipiert. Ziel war es, multi-temporale Bilddaten zu identifizieren und Veränderungen auf der Marsoberfläche sichtbar zu machen. Mit Hilfe der Datenbank können Wissenschaftler Regionen, die mehrfach und somit zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden, gezielt auswählen und anschließend auf mögliche Oberflächenveränderungen untersuchen. Diese Analysen sind von zentraler Bedeutung für die heutige Marsforschung, da sie Rückschlüsse auf die geologische, morphologische und klimatologische Entwicklung des Planeten erlauben. Seit 2016 ist MUTED unter <https://muted.uni-muenster.de> als umfassendes Web-Tool sowohl für Wissenschaftler als auch für die interessierte Öffentlichkeit frei zugänglich. In dem Folgeprojekt wurde der Funktionsumfang kontinuierlich erweitert – unter anderem durch die Integration eines Prozessierungsservices für planetare Bilddaten. Dadurch entwickelte sich MUTED zu einem vielseitigen Web-Tool, das heute die Identifikation, Analyse und Prozessierung planetarer Daten in einem gemeinsamen Rahmen ermöglicht.

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde die Datenbank auf weitere Himmelskörper – darunter Mond und Merkur – erweitert und durch künstliche Intelligenz (KI)-gestützte Methoden ergänzt. Schwerpunkte der Weiterentwicklung waren die Optimierung der Datensuche, die Entwicklung von Services zur KI-gestützten Objekterkennung sowie die Implementierung eines Höhenmodell-Services. Die im Projektantrag formulierten methodisch-wissenschaftlichen Ziele umfassten:

- a) Entwicklung eines Tools zur Generierung von Referenzdaten für die KI-Objekterkennung
- b) Entwicklung eines Objektdetektions-Services
- c) Entwicklung eines Höhenmodell-Services
- d) Weiterentwicklung der Web-Benutzeroberfläche und Integration der neuen Services
- e) Integration weiterer KI-generierter Datensätze
- f) Betrieb, Pflege und Administration
- g) Wissenschaftliche Anwendung der Datenbank

Zur Erstellung von Trainings- und Referenzdaten für die KI-Objekterkennung wurde zunächst ein Tool entwickelt, das eine präzise Erfassung und Vermessung von Kratern in planetaren Bilddaten ermöglicht (a). Mit Hilfe dieses Tools wurden umfangreiche Datensätze erzeugt, die für die Entwicklung und Validierung verschiedener Deep-Learning Objekterkennungsnetzwerke genutzt wurden. Nach umfassender Evaluierung und Optimierung konnte daraus ein Objekterkennungsservice implementiert werden (b). Darüber hinaus wurde ein Höhenmodell-Service entwickelt, der mittels stereogrammetrischer Verfahren

Höheninformationen aus multi-temporalen Bilddaten ableitet (c). Zur Steuerung der Prozessierung wurden zusätzliche Module in die Web-Benutzeroberfläche integriert (d). Ergänzend wurden weitere KI-generierte Datensätze für eine erweiterte Bilddatensuche in die Datenbank aufgenommen (e). Abschließend erfolgte die wissenschaftliche Erprobung und Optimierung der Datenbank durch verschiedene Fallstudien auf dem Mond und dem Mars (f-g).

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Am 14. Juli 1965 entstand im Rahmen der Mariner-4-Mission die erste orbitale Aufnahme des Mars – zugleich die erste aus dem Orbit gewonnene Aufnahme der Oberfläche eines anderen Planeten. Heute wird der Mars mit einer Vielzahl von Instrumenten unterschiedlicher Missionen internationaler Raumfahrtagenturen (NASA, ESA, ISRO, CNSA, UAESA) untersucht. Diese kontinuierliche Datenerhebung ermöglicht eine umfassende Analyse dynamischer Prozesse sowohl auf der Oberfläche als auch in der Atmosphäre des Planeten. Mit der stetig steigenden Anzahl orbitaler Aufnahmen wächst jedoch auch die Notwendigkeit effizienter Werkzeuge zur Verwaltung, Identifizierung und Analyse planetarer Bilddaten. Gleichzeitig eröffnen die Methoden des maschinellen Lernens neue Möglichkeiten zur Verarbeitung und Auswertung der komplexen und rasant anwachsenden Datenmengen.

Die High Resolution Stereo Camera (HRSC) wurde entwickelt, um Morphologie, Topographie, Geologie und Atmosphäre des Mars zu untersuchen. Ihr besonderes Potenzial liegt in der hochauflösenden, multispektralen und dreidimensionalen Kartierung der Oberfläche (Jaumann et al., 2007; Neukum et al., 2004). Seit ihrem Start an Bord der Mars-Express-Mission im Jahr 2003 liefert HRSC seit Juni 2004 – und damit seit über 21 Jahren – kontinuierlich Aufnahmen in Farbe, hoher Auflösung und 3D. Die große räumliche Abdeckung sowie die hohe Datenqualität haben dazu geführt, dass HRSC-Bilddaten bis heute eine zentrale Grundlage für die wissenschaftliche Marsforschung darstellen. Der sehr gute technische Zustand des Instruments und die wiederholten Verlängerungen der Missionsphase – zunächst bis 2007, inzwischen bis mindestens 2026 – verdeutlichen den nachhaltigen Erfolg der Mission.

Vor diesem Hintergrund wurde am Institut für Planetologie der Universität Münster ab 2011 die multi-temporale Datenbank (MUTED) im Rahmen des Projekts „Entwicklung einer multi-temporalen Datenbank basierend auf Bildern der High Resolution Stereo Camera (HRSC)“ (FKZ 50 QM 1101) von Grund auf neu entwickelt. Ziel war es, die räumlich-zeitliche Abdeckung planetarer Bilddaten systematisch erfassbar zu machen. Seit 2016 ist MUTED online verfügbar und dient als Werkzeug zur Identifizierung multi-temporaler Beobachtungen. Die Weiterentwicklungen und Funktionserweiterungen wurden regelmäßig auf HRSC-Team-Meetings sowie auf internationalen Konferenzen wie dem European Planetary Science Congress (EPSC) und der Lunar and Planetary Science Conference (LPSC) vorgestellt. Das durchweg positive Feedback sowohl des HRSC-Teams als auch der internationalen Fachgemeinschaft machte den Nutzen als auch den Bedarf an zusätzlichen Funktionen deutlich, die für die effiziente Erforschung des Mars unerlässlich sind. Im Folgeprojekt (FKZ 50 QM 1801) wurde die Datenbank daher zu einem umfassenden Web-Tool ausgebaut, das die wissenschaftliche Gemeinschaft bei der Auswahl, Visualisierung und Prozessierung von HRSC-Aufnahmen sowie Daten weiterer Instrumente unterstützt.

Darüber hinaus eröffnet die KI entscheidende neue Perspektiven für die Verarbeitung großer, komplexer Datensätze („Big Data“), die durch aktuelle und künftige Missionen (z. B. Lunar Reconnaissance Orbiter, BepiColombo) entstehen. Insbesondere Methoden der Mustererkennung auf Basis des maschinellen Lernens sind ein leistungsfähiges Werkzeug, um

Regelmäßigkeiten und Ähnlichkeiten in planetaren Datensätzen systematisch zu identifizieren. Mit neuronalen Netzwerken lassen sich wiederkehrende Landformen wie Einschlagskrater oder Oberflächenveränderungen auf verschiedenen Himmelskörpern – darunter Mond, Merkur und Mars – automatisiert erfassen. Dies schafft eine wichtige Grundlage für die Bearbeitung vielfältiger wissenschaftlicher Fragestellungen.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Weiterentwicklung der multi-temporalen Datenbank begann im März 2021 mit der detaillierten Umsetzung der im Antrag formulierten Pläne und Aufgaben. Basierend auf dem seit 2011 geförderten Projekt konnte die Weiterentwicklung der Datenbank und die Integration der automatisierten Services auf den bisher entwickelten Algorithmen und Erfahrungen aufbauen.

Für MUTED wurde eine neue Web-Benutzeroberfläche entwickelt, die eine Erweiterung der Datenbank auf die Himmelskörper Mond und Merkur ermöglichte. Mit der neuen Benutzeroberfläche können die planetaren Körper sowohl in einer 3D Globus Ansicht sowie in der Merkator-Kartenprojektion dargestellt werden. Zur umfassenden Visualisierung wurden verschiedene spektrale und topographische Basiskarten integriert. Nutzer können so beispielsweise unter Verwendung der HiRISE-Mosaik-Basiskarte von einer globalen Darstellung des Mars bis hin zu einer detaillierten Ansicht mit bis zu 30 cm pro Pixel hineinzoomen. Für Mond und Merkur wurden die wesentlichen bildgebenden Datensätze integriert (LRO-LROC für den Mond; MESSENGER-MDIS für den Merkur). Damit werden derzeit insgesamt Metadaten von mehr als 4 Millionen planetaren Aufnahmen von der Multi-temporalen Datenbank verwaltet.

Um Trainingsdaten für die KI-Objekterkennung zu extrahieren und die Detektionsergebnisse zu evaluieren wurde ein neues Tool entwickelt. Das OpenCraterTool stellt eine Erweiterung für das frei verfügbare und weltweit vielfach genutzte Geoinformationssystem QGIS dar. Nutzer können auf Basis von kartenprojizierten Bilddaten Krater identifizieren und als Objekte speichern. Mit Hilfe dieser Kratermessungen können Oberflächenprozesse auf dem Mars, Mond und Merkur datiert und untersucht werden.

Auf Basis dieser Datensätze wurden Objekterkennungsnetzwerke der YOLO-Architektur (Bochkovskiy et al., 2020) getestet. Die Ergebnisse wurden mithilfe einer im OpenCraterTool implementierten Vergleichsmethode evaluiert und dadurch die Genauigkeit der Objekterkennung schrittweise optimiert. Die Ergebnisse dieser Arbeiten führten zu einer Publikation über das OpenCraterTool sowie zu einem globalen Vergleich bestehender Kraterdatenbanken [2023.3]. Aufbauend darauf wurde ein neuer Objekterkennungsservice entwickelt, der es ermöglicht, Einschlagskrater in nutzerdefinierten planetaren Bilddaten automatisch zu identifizieren und die Ergebnisse im Vektorformat zum Download bereitzustellen.

Darüber hinaus wurde ein spezielles Objekterkennungsnetzwerk entwickelt, um Fehldaten innerhalb der HRSC-Bilddaten automatisiert zu identifizieren. Diese Fehldaten wurden maskiert und die Footprints der Bildaufnahmen neu berechnet, sodass die tatsächliche Abdeckung der Marsoberfläche abgebildet wird. Damit können Nutzer deutlich effizienter diejenigen Bilddaten auswählen, die für ihre wissenschaftlichen Fragestellungen relevant sind. Zur weiteren Verbesserung der Bilddatensuche wurden globale, KI-generierte Produkte (z. B. Bickel et al., 2020; Wang et al., 2020) in die Datenbank integriert. Diese Datensätze ermöglichen eine gezielte Suche nach spezifischen Oberflächenformen und verfügbaren Bilddaten auf Mond, Mars und Merkur.

Die multi-temporale Datenbank wurde anhand wissenschaftlicher Anwendungen getestet und optimiert. Diese umfassen Studien über aktive geomorphologische Prozesse auf der

Marsoberfläche [2024.1] sowie geologischen Kartierungen auf dem Mars und Mond [2024.2-5].

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Weiterentwicklung der multi-temporalen Datenbank (MUTED) knüpft an das Projekt „Entwicklung einer multi-temporalen Datenbank basierend auf Bildern der High Resolution Stereo Camera (HRSC)“ (FKZ 50 QM 1101) an, das seit 2011 am Institut für Planetologie der Universität Münster durchgeführt wurde. Im Folgeprojekt (FKZ 50 QM 1501) wurde MUTED zu einem umfassenden Web-Tool ausgebaut und ist seit 2016 öffentlich zugänglich. Eine detaillierte Beschreibung der Architektur, des Datenumfangs sowie der wissenschaftlichen Anwendungsmöglichkeiten wurde im Fachjournal *Planetary and Space Science* (PSS) veröffentlicht [2023.3].

Mit Beginn des Projekts FKZ 50 QM 1801 im Dezember 2018 erfolgte eine erste funktionale Erweiterung der Datenbank durch die Integration eines automatisierten Prozessierungsservices für HRSC-Bilddaten. Dieser Service basiert auf der vom USGS entwickelten *Integrated Software for Imagers and Spectrometers* (ISIS) (Anderson et al., 2004), die sowohl spezialisierte Algorithmen als auch missionsspezifische Informationen (z. B. Instrumentenpositionen, Kamerakalibrierung und Ausrichtungen) für die präzise und standardisierte Verarbeitung planetarer Bilddaten bereitstellt.

Für die Entwicklung des Höhenmodellservices konnte auf die NASA Ames Stereo Pipeline (ASP) (Beyer et al., 2019) zurückgegriffen werden. Dieses Softwarepaket stellt umfangreiche Routinen zur Verfügung, mit denen aus stereoskopischen Aufnahmen präzise digitale Höhenmodelle (DEM) generiert werden können. Die ASP ist international etabliert und wird regelmäßig in der planetaren Fernerkundung eingesetzt, sodass eine robuste methodische Basis für die Weiterentwicklung gegeben war.

Auch die Entwicklung des Objekterkennungsservices für MUTED konnte auf die in der Forschung weit verbreitete *You Only Look Once* (YOLO)-Architektur (Bochkovskiy et al., 2020) aufbauen. Die auf *Convolutional Neural Networks* (CNN) basierte YOLO-Architektur wurde bereits erfolgreich in verschiedenen planetaren Anwendungen eingesetzt, beispielsweise zur globalen Kartierung von Felsblöcken auf dem Mond (Rüsch & Bickel, 2023) oder zur Identifizierung gekraterter Kegelstrukturen auf dem Mars (Mills et al., 2024). Die YOLO-Architektur bietet eine Vielzahl vortrainierter Modelle und Detektoren, die für spezifische Aufgaben wie die automatisierte Erkennung und Vermessung von Einschlagskratern trainiert und optimiert werden können. Durch die Nutzung dieser erprobten *Deep-Learning*-Architektur konnte eine effiziente und zugleich wissenschaftlich validierte Grundlage für die Implementierung des Kraterdetektors geschaffen werden.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Weiterentwicklung der multi-temporalen Datenbank (MUTED) orientierte sich eng an den Anforderungen und Rückmeldungen des HRSC-Teams (u. a. Institut für Geologische Wissenschaften der Freien Universität Berlin, Institut für Planetenforschung des DLR in Berlin), des Lunar Reconnaissance Orbiter Camera-Teams sowie der internationalen wissenschaftlichen Gemeinschaft. Neue Funktionen und Datensätze wurden zunächst innerhalb des HRSC-Teams sowie mit interessierten externen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern getestet und nach erfolgreicher Evaluierung der gesamten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Eine enge Zusammenarbeit erfolgte zudem auf Datenebene: Die Metadaten der HRSC-Aufnahmen wurden direkt vom HRSC-Team bereitgestellt und konnten dadurch zeitnah in MUTED integriert und verfügbar gemacht werden.

Das für die Generierung von Trainings- und Referenzdaten entwickelte OpenCraterTool wurde im Rahmen internationaler Workshops – unter anderem auf der Europlanet GMAP Winterschool 2024 und 2025 – präsentiert. Das dort erhaltene Feedback lieferte wertvolle Impulse für die Weiterentwicklung des Tools.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Industrielle Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurden keine industriellen Ergebnisse erzeugt.

II.2 Wissenschaftliche Ergebnisse

Die wissenschaftlichen Ergebnisse des Projektes wurden in verschiedenen begutachteten Veröffentlichungen publiziert [2022.1-2; 2023.1-3; 2024.1-5] und auf verschiedenen Konferenzen vorgetragen [K2021.1-7; K2022.1-4; K2023.1-8; K2024.1-12; K2025.1-8]. Eine Liste aller projektrelevanter Publikationen findet sich in Kapitel III.3.

II.2.a Entwicklung des OpenCraterTools

Um Trainings- und Referenzdaten für die KI-Objekterkennung zu generieren und die Detektionsergebnisse zu evaluieren, wurde das OpenCraterTool entwickelt [2023.3]. Dabei handelt es sich um eine Erweiterung für das frei verfügbare und weltweit etablierte Geoinformationssystem QGIS (Abbildung 1).

Das Tool baut auf den Konzepten des 2015 entwickelten CraterTools auf, das nach der Umstellung von ArcGIS auf ArcGIS Pro nicht mehr verfügbar war. Im Gegensatz dazu ist OpenCraterTool plattformübergreifend nutzbar, erfordert keine kommerzielle Lizenz und ist somit einer breiten wissenschaftlichen Gemeinschaft zugänglich. Das Tool kann direkt über das offizielle Plugin-Verzeichnis von QGIS installiert oder über manuell über GitHub (<https://github.com/thomasheyer/OpenCraterTool>) bezogen werden.

Mit dem Tool können Krater auf kartenprojizierten Bilddaten identifiziert und als Objekte gespeichert werden. Es erlaubt die projektionunabhängige Erfassung von Kratergrößen und -positionen über zwei Eingabemethoden (Zwei-Punkt- oder Drei-Punkt-Methode). Die Ergebnisse werden in Vektorformaten gespeichert und lassen sich exportieren, z. B. für die Altersbestimmung in Craterstats (Michael et al., 2016).

Neben der Kratererfassung bietet OpenCraterTool eine Vergleichsfunktion zwischen unterschiedlichen Kratermessungen. Somit können zum Beispiel KI-generierte Kraterzählungen mit manuellen Referenzzählungen validiert werden. Dabei werden Übereinstimmungen, Abweichungen sowie Über- und Unterzählungen analysiert und die Ergebnisse sowohl statistisch als auch in interaktiven Plots visualisiert.

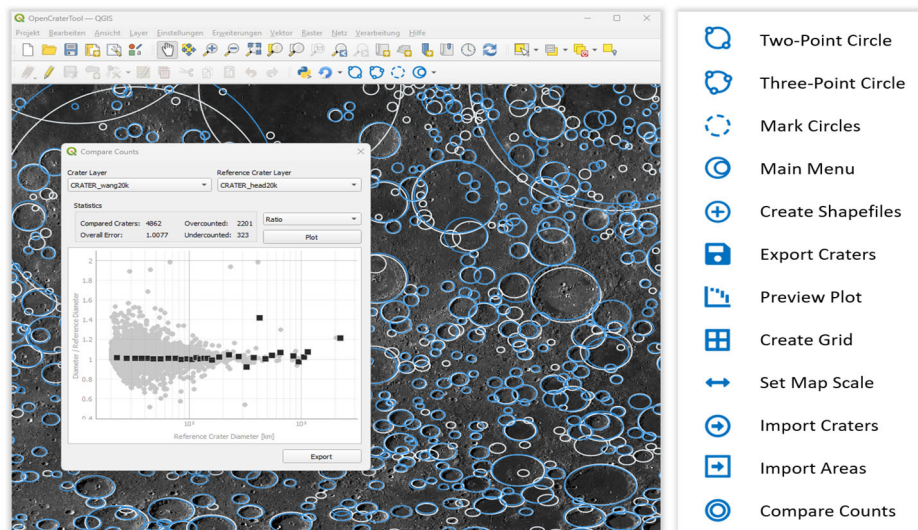


Abbildung 1. Benutzeroberfläche des OpenCraterTools in QGIS mit dem Krater-Vergleichspanel (links) und einer Übersicht der Funktionen des OpenCraterTools (rechts).

Die mit dem Tool erstellten Kratermessungen ermöglichen die Datierung und Untersuchung oberflächenbildender Prozesse auf terrestrischen Himmelskörpern wie Mars, Mond und Merkur. Darüber hinaus wurde OpenCraterTool intensiv eingesetzt, um Trainings- und Referenzdaten für KI-Objekterkennung bereitzustellen sowie Objekterkennungsnetzwerke zu validieren und zu optimieren.

II.2.b Weiterentwicklung der Datenbank und KI-gesteuerte Datenprozessierung

Für die automatisierte Bilddatenprozessierung wurde die Architektur zur Akquise, Verarbeitung und Speicherung der Bilddaten (MUTED-PRO) durch den Einsatz einer leistungsstarken Grafikkarte erweitert. Gleichzeitig erfolgte eine Weiterentwicklung der bestehenden multi-temporalen Datenbank (MUTED), um die Steuerung der Prozessierung effizient zu unterstützen. Abbildung 2 zeigt die Architektur sowie die Benutzeroberfläche von MUTED und den zugehörigen Prozessierungsservices in schematischer Form.

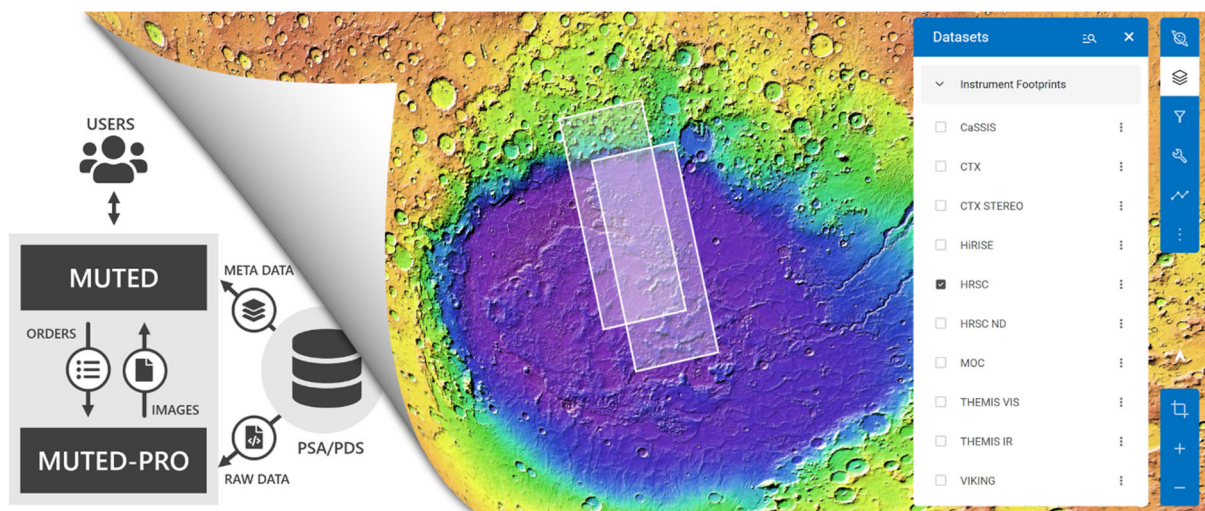


Abbildung 2: Architektur (links) und Benutzeroberfläche (rechts) der multi-temporalen Datenbank (MUTED).

Die multi-temporale Datenbank (MUTED) wurde basierend auf den Standards des Open Geospatial Consortiums (OGC) und Open Source Software entwickelt und beruht auf einer Drei-Schicht-Architektur. Eine detaillierte Beschreibung der Architektur, der integrierten Datensätze und der wissenschaftlichen Anwendung der Datenbank wurde in Heyer et al. (2018) veröffentlicht. Die unterste Ebene besteht aus einer relationalen PostgreSQL Datenbank. In dieser werden die Metadaten der planetaren Bilddaten, die vom DLR und den Datenbanken der ESA (PSA) und NASA (PDS) bereitgestellt werden, implementiert, vorverarbeitet und vereinheitlicht. Zusätzlich wird die räumliche Überschneidung der Bilddaten berechnet und die zeitliche Differenz der Aufnahmen in multi-temporalen Tabellen gespeichert. Die mittlere Ebene umfasst eine Karten-Applikation (Geoserver), welche die Geoinformationen der multi-temporalen Tabellen in einen OGC-konformen Web Map Service (WMS) umwandelt. Die web-basierte Benutzeroberfläche ist die oberste Präsentationsebene der Datenbankarchitektur und wurde mit Hilfe von HTML, PHP und Javascript entwickelt. Die Benutzeroberfläche bietet zahlreiche Funktionen für die Auswahl, Filterung und Visualisierung der planetaren Bilddaten. Für die Darstellung der multi-temporalen Abdeckung werden die WMS der einzelnen Datensätze über den Basiskarten im Kartenbereich der Benutzeroberfläche dargestellt. Mit Hilfe von Javascript-Routinen werden die nutzerdefinierten Einstellungen in eine Common Query Language (CQL) übersetzt und die WMS nach diversen Kriterien gefiltert. Zusätzlich zu der Darstellung der multi-temporalen Abdeckung im Kartenbereich der Benutzeroberfläche können die Meta-Daten und Vorschau-Bilder der Bilddaten angezeigt werden. Die multi-temporale Suche ist ein Kernaspekt der Datenbank und beschreibt einen datengesteuerten Ansatz, um Gebiete mit einer multi-temporalen Abdeckung aufzufinden.

Mit Hilfe der multi-temporalen Suche können überschneidende Bilddatensätze hinsichtlich temporaler Kriterien identifiziert werden. Beispielsweise können sich überschneidende Aufnahmen mit einem zeitlichen Versatz von wenigen Minuten gesucht werden, um dynamische Prozesse in der Atmosphäre (z. B. Staubteufel) zu beobachten. Die Filteroptionen stellen eine Möglichkeit dar, die Datenauswahl nach verschiedenen zeitlichen und räumlichen Kriterien weiter zu reduzieren. Beispielsweise können die Bilddaten hinsichtlich der maximalen oder minimalen räumlichen Auflösung, des Zeitraums der Aufnahme oder des saisonalen Zeitraums gefiltert werden. Zusätzlich zu der Darstellung der räumlichen Ausdehnung der Bilddaten können die Metadaten (Bildnummer, Aufnahmedatum und -uhrzeit sowie Solar Longitude) per Mausklick angezeigt werden. Für eine erste Einschätzung der Datenabdeckung und der Datenqualität wird darüber hinaus eine Vorschau-Aufnahme dargestellt. Die Timeline ist eine Funktion, um die Bilddaten eines Untersuchungsgebiets chronologisch auf einem interaktiven Zeitstrahl darzustellen. Somit kann die zeitliche Verteilung der Aufnahmen mit einem Blick erfasst und so beispielsweise das Potential der Datenabdeckung für saisonale oder langzeitliche Untersuchungen eingeschätzt werden. Zusätzlich können die Bilddaten eines Untersuchungsgebiets in tabellarischer Form aufgelistet und anhand verschiedener Parameter ausgewertet werden. Diese Auflistung kann als Text-Datei gespeichert und beispielsweise für eine statistische Auswertung oder einen automatisierten Download der Bilddaten genutzt werden.

Für die automatisierte Bilddatenprozessierung steht ein leistungsstarker Prozessierungsserver (MUTED-PRO) für die Akquise, Verarbeitung und Speicherung der Bilddaten zur Verfügung. Der Prozessierungsservice wurde in diesem Projekt mit einem Höhenmodell-Service erweitert. Nutzer können multi-temporale Bilddaten auswählen, die eine Fläche auf dem Mars, oder Mond mehrfach und aus verschiedenen Aufnahmewinkeln abdecken, um daraus ein Höhenmodell zu berechnen zu lassen. Über die weiterentwickelte Benutzeroberfläche der multi-temporalen Datenbank können Nutzer ein Untersuchungsgebiet und die verfügbaren Bilddaten für die Prozessierung auswählen (Abbildung 2). Sobald ein Prozessierungsauftrag erstellt wurde, werden die Rohdaten automatisiert von den Datenbanken der ESA/NASA (PSA/PDS) bezogen.

Anschließend werden die Rohdaten mit Hilfe bestehender Routinen der USGS ISIS-Software kalibriert und projiziert. Anschließend werden die Bildpaare mit Hilfe der Routinen der NASA Ames Stereo Pipeline (ASP) (Beyer et al., 2019) koregistriert und Höheninformationen durch stereographische Methoden berechnet.

Alle prozessierten Daten, wie das Höhenmodell, die orthorektifizierten Bilddaten werden anschließend in ein Standard Dateiformat (.tif) umgewandelt und stehen in einem komprimierten Archiv als Download zur Verfügung (Abbildung 3). Zusätzlich zu den Bilddaten wird eine Info-Datei erzeugt, welche die Meta-Informationen sowie den zeitlichen Kontext der Aufnahmen im Untersuchungsgebiet beinhaltet. Die Speicherung der prozessierten Daten erfolgt derzeit über ein 12 TB Speichersystem, sodass die resultierenden Bilddaten nach der Prozessierung den Nutzern für einen Monat als Download zur Verfügung stehen. Mit Hilfe des Prozessierungs-Service wird sowohl die Bearbeitungszeit als auch das bezogene Datenvolumen für die Nutzer deutlich reduziert.

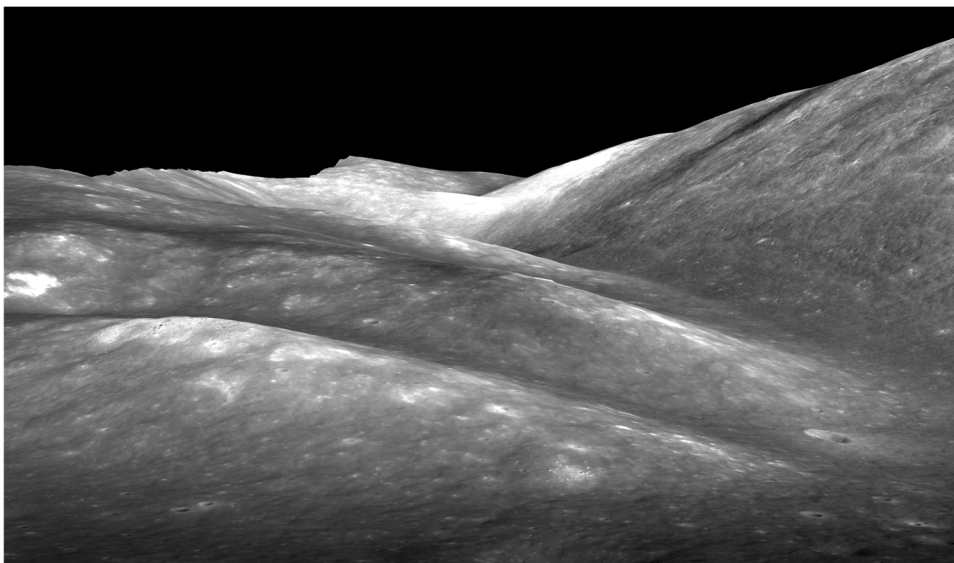


Abbildung 3: Beispiel eines LROC-DTM, das die Sculptured Hills (gelegen bei 19,97° N, 31,20° O) in der Nähe der Apollo-17-Landestelle zeigt. Dieses DTM wurde mit dem MUTED-Höhenmodell-Service aus den LROC-Aufnahmen [12] M1151652657 und M1212862656 erzeugt.

Altersdatierung auf Basis der Kratergrößen-Häufigkeitsverteilung stellt ein zentrales Werkzeug der geologischen Planetologie dar. Um die bislang sehr zeitaufwendige manuelle Erfassung zu erleichtern, wurde im Rahmen dieses Projektes ein Einschlagskrater-Erkennungsservice für die multi-temporale Datenbank (MUTED) entwickelt. Grundlage dieses Services bilden speziell angepasste Detektoren, die auf der in der Forschung vielfach bewährten YOLO-Architektur (Bochkovskiy et al., 2020) basieren. Für das Training der Netzwerke wurden mehrere tausend Einschlagskrater in LROC-Aufnahmen unterschiedlicher Regionen des Mondes manuell identifiziert und erfasst. Zur Erstellung präziser Trainings- und Referenzdatensätze kam das im Projekt entwickelte OpenCraterTool zum Einsatz. Um die Robustheit des Modells zu gewährleisten, wurde eine breite Variation von Kratergrößen und geographischen Lagen berücksichtigt, die unter unterschiedlichen Beleuchtungsgeometrien und Datenauflösungen erfasst wurden. Für die zuverlässige Detektion unterschiedlich großer Krater wurde zudem ein mehrskaliges Abtastverfahren entwickelt: Teile einer Aufnahme werden mehrfach in verschiedenen Maßstäben mit demselben Detektor untersucht. Die besten Ergebnisse wurden mit YOLOv8m erzielt, das mit einer Detektorgröße von 640×640 Pixeln arbeitet und rund 25 Millionen Parameter für die Klassifizierung nutzt. Nach der Klassifikation erfolgt eine algorithmische Zusammenführung der Detektionsergebnisse, um Mehrfachklassifikationen

desselben Kraters zu vermeiden. Die finalen eindeutigen Kraterobjekte werden als Vektordaten (mit Angaben zu Position und Durchmesser) in einem Shapefile abgespeichert, das den Nutzerinnen und Nutzern zusammen mit den prozessierten Bilddaten über MUTED bereitgestellt wird. Die Shapefiles lassen sich direkt in Geoinformationssysteme wie ArcGIS Pro oder QGIS integrieren, sodass Forschende effizient die für ihre Untersuchungsgebiete relevanten Krater extrahieren und für geologische Altersdatierungen nutzen können – ohne die aufwendige manuelle Erfassung selbst durchführen zu müssen.

Zusätzlich zu diesem bildbasierten Ansatz wurde ein weiteres Erkennungsnetzwerk für digitale Höhenmodelle trainiert. Die Detektion in Höhenmodellen bietet den Vorteil, dass sie weitgehend unabhängig von Beleuchtungs- und Beobachtungsbedingungen funktioniert, die in optischen Bilddaten häufig zu Unsicherheiten führen. DEM-basierte Kratererkennung ermöglicht eine konsistentere Erfassung auch in Regionen mit ungünstigen Lichtverhältnissen (z. B. in polaren Gebieten mit extremen Schattenbedingungen) und verbessert die Detektion kleiner oder stark degradiertes Krater, die in reinen Bilddaten oft schwer erkennbar sind. Die Kombination von bild- und höhenbasierten Erkennungsroutinen stellt somit einen wesentlichen methodischen Fortschritt dar, da sie nicht nur die Zuverlässigkeit und Vollständigkeit der Kraterkataloge erhöht, sondern auch eine robustere Grundlage für die zeitliche Rekonstruktion geologischer Prozesse liefert.

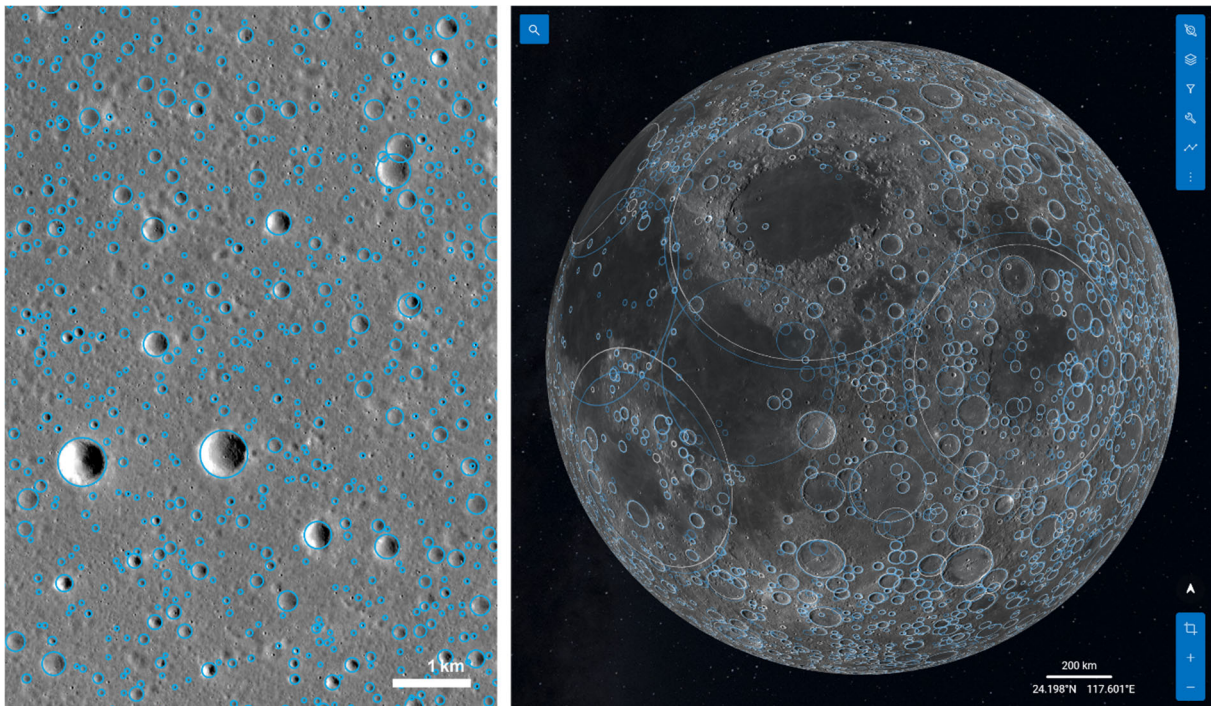


Abbildung 4: Ergebnisse des Einschlagskrater-Erkennungsservice für einen Ausschnitt der LROC-NAC-Aufnahme M102128467 (links). Benutzeroberfläche von MUTED mit Kratern mit Durchmessern > 20 km (rechts), basierend auf dem globalen Mondkatalog von Head et al. (2010) (weiß) und dem KI-generierten Katalog von Wang et al. (2020) (blau).

Um die Identifikation planetaren Bilddaten zu verbessern wurde eine Routine entwickelt, um Fehlzeiten innerhalb der HRSC-Bilddaten automatisiert zu identifizieren. Dafür wurden zunächst Fehlzeiten in HRSC-Bilddaten als Trainingsdaten herausgesucht und ein Modell auf Basis der YOLO-Architektur trainiert. Anschließend wurden alle HRSC-Aufnahmen auf Fehlzeiten geprüft und neue Footprints, welche die tatsächliche Abdeckung der Marsoberfläche darstellen, berechnet. Die Footprints wurden in MUTED integriert und stellen so eine effiziente Auswahl der Bilddaten, die für ihre wissenschaftlichen Fragestellungen relevant sind, sicher (Abbildung 5).

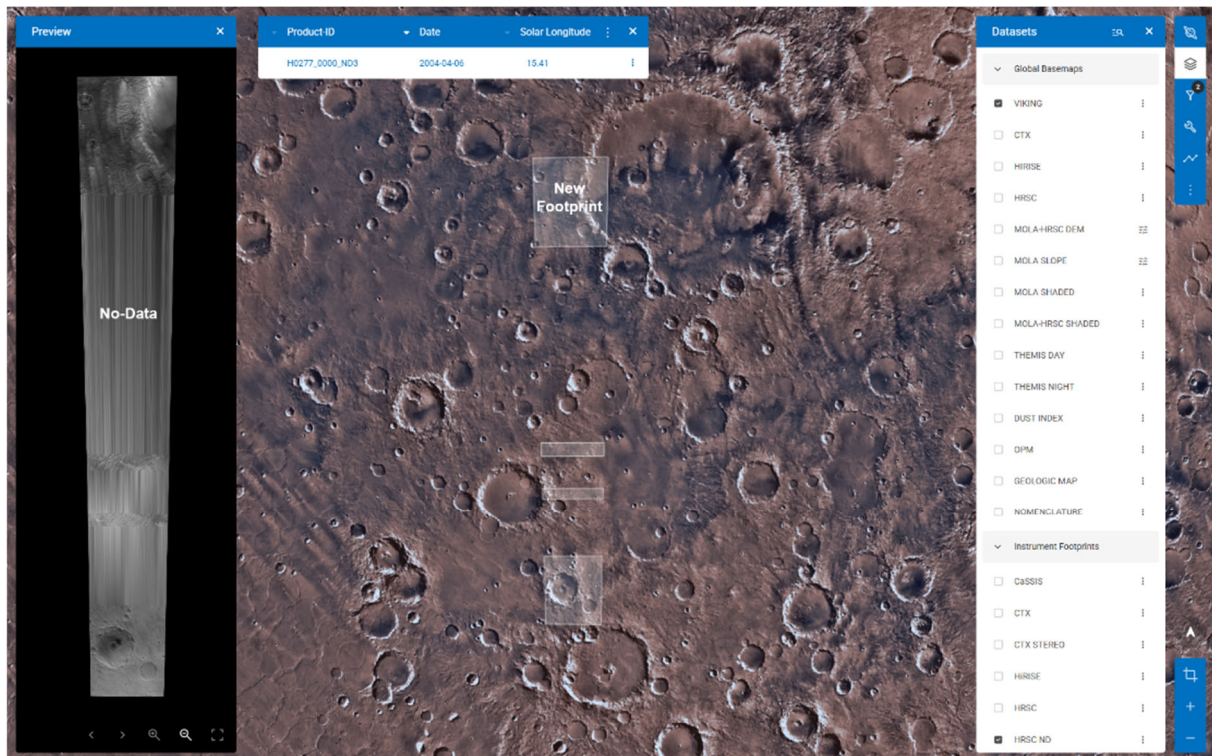


Abbildung 5: Benutzeroberfläche von MUTED mit der HRSC Aufnahme H0277_0000_ND3, die interpolierten Datenlücken enthält (links). Der neu berechnete Footprint (Mitte) verdeutlicht die tatsächliche Abdeckung der Marsoberfläche und ermöglicht dadurch eine effizientere Datenauswahl.

Zur weiteren Verbesserung der Bilddatensuche wurden globale, KI-generierte Produkte (z. B. Bickel et al., 2020; Wang et al., 2020) in die Datenbank integriert. Diese Datensätze ermöglichen eine gezielte Suche nach spezifischen Oberflächenformen und verfügbaren Bilddaten auf Mond, Mars und Merkur. Im Speziellen können Nutzer mit dem Datensatz von Bickel et al. 2025 alle global detektierten Hangstreifen auf der Marsoberfläche anzeigen lassen. Darauf basierend kann ein Untersuchungsgebiet ausgewählt und die verfügbaren Planetaren Bilddaten für eine detaillierte Analyse aufgelistet und visualisiert werden.

Durch die Fortführung aktueller Missionen, wie MarsExpress, LRO, ExoMars Trace Gas Orbiter Mission (TGO) und der europäischen BepiColombo Mission zum Merkur ist ein weiterer Anstieg von orbitalen Aufnahmen zu erwarten. Diese Entwicklung zeigt die Notwendigkeit effizienter Werkzeuge für die Verwaltung, Identifizierung und Analyse planetarer Bilddaten.

II.2.c Wissenschaftliche Anwendung

Mithilfe multi-temporalen Datensätze lässt sich eine Vielzahl wissenschaftlicher Fragestellungen adressieren, darunter die Analyse von Oberflächenveränderungen und zugrunde liegenden Prozessen, die fundiertere Interpretation von Bodenproben sowie die Planung zukünftiger Missionen. In diesem Projekt wurde die multi-temporale Datenbank intensiv getestet und genutzt, um geologische Prozesse auf Mond und Mars zu kartieren, darunter das Landegebiet von Apollo 14 und den Amundsen-Krater auf dem Mond sowie Deuteronilus Cavus auf dem Mars.

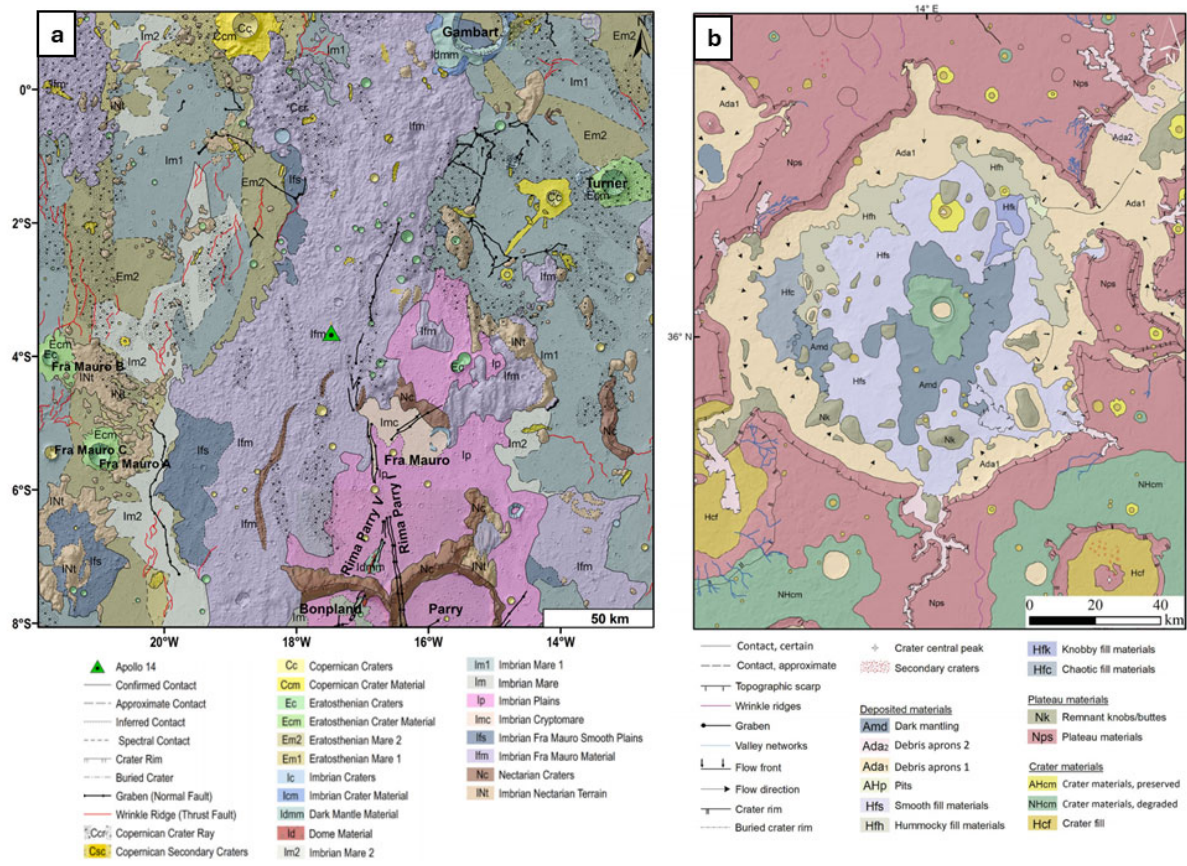


Abbildung 6: Geologische Karten erstellt mit Hilfe von MUTED. (a) Apollo-14-Landegebiet [2023.2] auf dem Mond. (b) Deuteronilus Cavus [2024.3] auf dem Mars.

Die regionale Untersuchung des Apollo-14-Landegebiets [2023.2] zeigt, wie hochauflösende Bilddaten und digitale Geländemodelle der LRO-Mission sowie spektrale Beobachtungen – in Kombination mit Kratergrößen-Frequenz-Analysen genutzt werden können, um detaillierte geologische Karten (Abbildung 6a) und Chronologien zentraler Erkundungsgebiete wie Fra Mauro und des Cone Kraters zu erstellen. Dieses Vorgehen verbessert stratigraphische Interpretationen, verknüpft die entnommenen Gesteinsproben mit ihrem geologischen Kontext und liefert robuste Altersdaten. Die resultierende geologische Karte ist öffentlich zugänglich und unterstützt sowohl wissenschaftliche Reinterpretationen als auch die Planung zukünftiger Missionen.

Darüber hinaus wurden die Hangneigungen während der Apollo-14-EVAs analysiert [2024.1]. Als Datengrundlage dienten hochauflösende LRO-NAC-Geländemodelle mit einer Auflösung von ~ 2 m, Astronautentranskripte sowie audiovisuelle Missionsarchive. Auf diese Weise konnten Hangneigungen von durchschnittlich etwa 15° sowie Höhendifferenzen von bis zu 150 m quantifiziert werden (vgl. Abbildung 7). Die so gewonnenen empirischen Daten spiegeln nicht nur technische Leistungsgrenzen, sondern auch physiologische und psychologische Wahrnehmungen der Astronauten unter variablen Beleuchtungsbedingungen wider. Damit erweitern sie bestehende digitale Planungswerkzeuge um realistische operationale Grenzen und Sicherheitsmargen und leisten einen direkten Beitrag zur Vorbereitung künftiger Artemis-Missionen in den topographisch anspruchsvollen polaren Regionen.

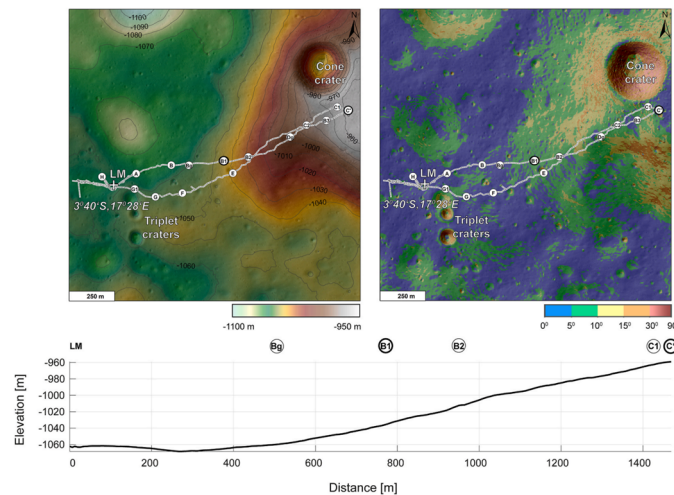


Abbildung 7: Der Apollo-14-Traversenverlauf (weiße Linie) dargestellt auf einem aus LRO-NAC-Daten abgeleiteten 10 m-Konturen-DEM (links) und einer Neigungskarte (rechts). Das Höhenprofil unten zeigt die topographischen Unterschiede während EVA 2 vom Landemodul bis zum Cone Crater. Markierte Stationen sind im Verlauf und im Profil dargestellt (nach [2024.1]).

Für den Amundsen-Krater wurde erstmals eine detaillierte geomorphologische Karte im Maßstab 1:100.000 erstellt [2024.4]. Diese Kartierung unterstützt künftige Erkundungsprogramme wie Artemis und die geplante Chinese International Lunar Research Station (ILRS). Stratigraphie, Morphologie und Mineralogie des Kraters deuten auf ein Entstehungsalter von $\sim 4,04$ Ga hin. Auswurfmassen aus Tiefen von bis zu 8 km legen nahe, dass Material aus dem South Pole–Aitken-Becken umgelagert wurde. Die Kartierung zeigt zudem bis zu 350 m mächtige Ablagerungen, Resurfacing-Ereignisse um $\sim 3,7$ Ga sowie mehrere geologische Einheiten mit variierender Zusammensetzung und Kraterdichte. Fünf potenzielle Landegebiete wurden identifiziert, die ingenieurtechnische Machbarkeit mit hohem wissenschaftlichem Potenzial kombinieren. Diese Regionen bieten Zugang zu vielfältigen Lithologien, permanent beschatteten Arealen und unterschiedlichen wissenschaftlichen Fragestellungen. Der Amundsen-Krater stellt damit ein Schlüsselziel für integrierte geologische, ressourcenorientierte und explorative Untersuchungen dar.

Der Deuteronilus Cavus, eine etwa 120 km große Senke an der Dichotomiegrenze des Mars, wurde in [2024.3] erstmals hochauflösend geologisch kartiert (Abb. 6b). Daten verschiedener Instrumente weisen auf eine rund 50 m mächtige vulkanische Basiseinheit hin, die von 180–300 m dicken Ablagerungen überdeckt wird, welche vermutlich mit einer amazonischen Plateauvergletscherung in Zusammenhang stehen. Die kartierten fluvioglazialen, mineralogischen und erosiven Strukturen ermöglichen die Rekonstruktion komplexer, eisgesteuerter Ablagerungs- und Kratermodifikationsprozesse. Diese Ergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse zum Verständnis der Vergletscherung in mittleren Breiten und unterstützen zugleich die Auswahl potenzieller Landeplätze für zukünftige Missionen.

Darüber hinaus wurde die Leistungsfähigkeit der multi-temporalen Datenbank anhand einer datensatzübergreifenden Analyse von Hangstreifen (engl. slope streaks) untersucht [2024.5]. Hangstreifen stellen einen heute noch aktiven und weit verbreiteten Prozess auf der Marsoberfläche dar (z. B. Sullivan et al., 2001; Bhardwaj et al., 2018) und wurden wiederholt auch als mögliche Indikatoren für flüssiges Wasser diskutiert (z. B. Kreslavsky & Head, 2009). Die Ursachen ihrer Entstehung sind jedoch bis heute umstritten und reichen von trockenen Massenbewegungen bis hin zu flüssigkeitsbasierten Prozessen. Unsere Studie konzentrierte sich auf Regionen in Elysium Planitia und Amazonis Planitia, in denen Staubteufel (engl. dust devils) Hangstreifen unmittelbar auslösten. Durch die simultane Entstehung von

Staubteufelspuren und den damit verknüpften Hangstreifen lassen sich beide Phänomene unter identischen atmosphärischen Bedingungen und gleichen Lichtverhältnissen vergleichen. Die Albedomessungen zeigen, dass Hangstreifen signifikant dunkler erscheinen als die gleichzeitig gebildeten Staubteufelspuren (Abbildung 8). Diese Beobachtung liefert zwei wichtige Hinweise: Erstens deutet die zeitgleiche Entstehung auf einen trockenen Entstehungsmechanismus hin. Zweitens weist der stärkere Albedokontrast darauf hin, dass Hangstreifen ein intensiveres Abtragen und Umlagern von feinkörnigem Material bewirken als die Staubteufel selbst. Insgesamt stützen unsere Ergebnisse die Hypothese, dass Hangstreifen in diesen Regionen überwiegend durch trockene, granularflussartige Prozesse entstehen. Die Kombination aus multi-temporalen Bildanalyse und Albedovergleich erweist sich dabei als ein effektives Werkzeug, um aktive Prozesse an der Marsoberfläche zu rekonstruieren und deren Beitrag zum gegenwärtigen Staubhaushalt des Planeten besser zu verstehen.

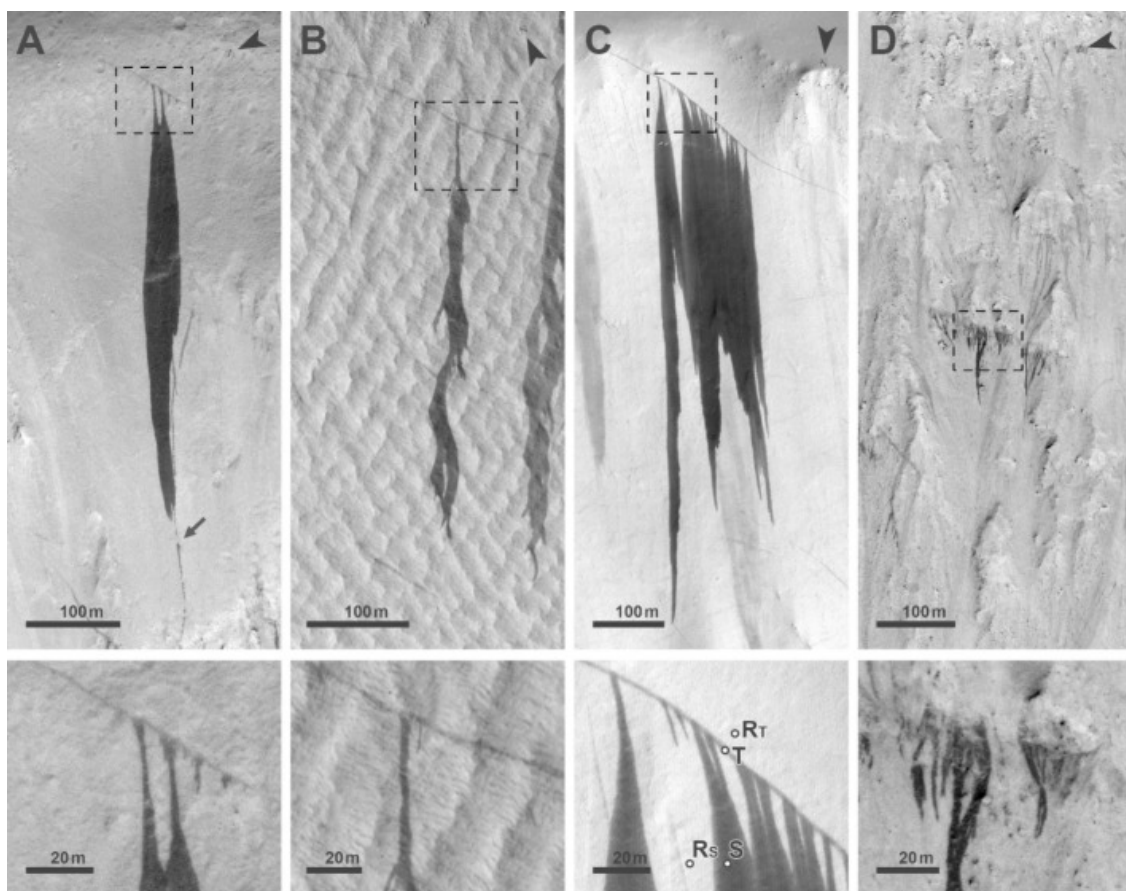


Abbildung 8: Mehrere von Staubteufeln ausgelöste Hangstreifen in Amazonis Planitia (A), Elysium Planitia (B) und Arabia Terra (C). Hangstreifen gehen dabei von geradlinigen Strukturen ohne sichtbare Staubteufelspuren aus (D). Zur Berechnung des relativen Albedos dienen Messpunkte an Hangstreifen und Staubteufelspuren (S, T), deren jeweilige Referenzpunkte (RS, RT) sowie Blockspuren (schwarzer Pfeil) auf unveränderten Oberflächen. Alle Aufnahmen sind kontrastverstärkt, um Albedounterschiede sichtbar zu machen. Gefälle jeweils nach unten. HiRISE-Bilddaten: (A, D) ESP_076678_1745, (B) ESP_077086_1800, (C) ESP_009192_1890.

Insgesamt zeigen die Studien das breite Spektrum wissenschaftlicher Fragestellungen, das sich durch den Einsatz multi-temporalen planetarer Datensätze auf Mond und Mars erschließen lässt.

III. Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde die Datenbank auf weitere Himmelskörper – darunter Mond und Merkur – erweitert und durch die Integration KI-gestützter Services für planetare Daten weiter ausgebaut. MUTED stellt eine umfangreiche Plattform zur Identifizierung der räumlich-zeitlichen Abdeckung planetarer Bilddaten dar und ist im Internet unter <https://muted.uni-muenster.de> sowohl für Wissenschaftler als auch für die Öffentlichkeit zugänglich. Die Datenbank bietet zahlreiche Funktionen für die Auswahl, Visualisierung und Prozessierung der multi-temporalen planetaren Bilddaten. Die Bilddaten können nach diversen Kriterien gefiltert und sowohl global als auch für ein vom Nutzer definiertes Untersuchungsgebiet dargestellt werden. Nutzer können mit Hilfe von MUTED Gebiete, die mehrfach und somit zu unterschiedlichen Zeiten von Raumsonden aufgenommen worden sind, zunächst identifizieren und die verfügbaren Daten mit Hilfe des Prozessierungs-Service für die Analyse möglicher Oberflächenveränderungen prozessieren. Darüber hinaus stellt MUTED einen Service für die Berechnung von Höhenmodellen bereit, sodass die planetaren Oberflächen auch in der dritten Dimension untersucht werden können.

Ein besonderer Schwerpunkt lag auf der automatisierten Kratererkennung. Da Kratergrößen-Häufigkeitsverteilungen ein zentrales Werkzeug für die Altersdatierung planetarer Oberflächen darstellen, wurde ein auf Deep-Learning-Methoden basierender Service entwickelt. Dieser erkennt Einschlagskrater automatisiert in Bilddaten, exportiert sie als Vektorobjekte und stellt sie den Nutzern direkt zum Download bereit. Dadurch wird die zeitaufwendige manuelle Kartierung erheblich reduziert und eine präzisere Rekonstruktion geologischer Entwicklungen sowie der zeitlichen Abfolge oberflächenbildender Prozesse ermöglicht.

Am Institut für Planetologie wurde die Datenbank bei wissenschaftlichen Studien über aktive geomorphologische Prozesse auf der Marsoberfläche sowie bei der geologischen Kartierung intensiv genutzt. Im Speziellen fand die Datenbank Anwendung bei der Identifizierung und Prozessierung orbitaler Aufnahmen für die Kartierung und Analyse potentieller zukünftiger Landestellen auf dem Mond und Mars.

III.1 Voraussichtlicher Nutzen

Die multi-temporale Datenbank ist im Internet sowohl für Wissenschaftler als auch für die Öffentlichkeit frei zugänglich und stellt ein einzigartiges Werkzeug dar, um kurz- und langzeitliche Veränderungen der Oberfläche des Mondes, Mars und Merkur zu identifizieren. Allein im vergangenen Jahr nutzten mehr als 2.000 wiederkehrende Anwender die Plattform und riefen dabei über 50.000 Datensätze ab. Die internationale Reichweite der Datenbank spiegelt sich in den Datenbankaufrufen wider, von denen rund 60 % aus Europa, 20 % aus Nord- und Südamerika und 20 % aus Asien erfolgten.

Der neu implementierte Höhenmodell-Service gewährleistet den Zugang zu hochaufgelösten topographischen Datensätzen, die für eine Vielzahl geowissenschaftlicher Fragestellungen unverzichtbar sind. In Verbindung mit spektralen Bilddaten lassen sich dadurch Analysen durchführen, die ein detailliertes Verständnis der Prozesse, welche planetare Oberflächen formen und verändern, ermöglichen. Solche Daten sind insbesondere für die Auswahl von Landeplätzen, die Risikobewertung und die wissenschaftliche Zieldefinition zukünftiger Raumfahrtmissionen von entscheidender Bedeutung.

Darüber hinaus bietet der entwickelte Kratererkennungs-Service eine effiziente Möglichkeit zur automatisierten Erfassung und Vermessung von Einschlagskratern in planetaren Bilddaten. Diese Daten sind essenziell für die Altersbestimmung planetarer Oberflächen mittels Kratergrößen-Häufigkeitsverteilungen. Damit wird eine präzisere Rekonstruktion der

geologischen Entwicklung, der Prozessabfolgen sowie der zeitlichen Einordnung oberflächenformender Ereignisse ermöglicht.

Die multi-temporale Datenbank wird derzeit umfassend am Institut für Planetologie in Münster, am Institut für Planetenforschung in Berlin und am Department of Geology der University of Maryland und anderen Forschungseinrichtungen für aktuelle Forschungsprojekte genutzt.

Darüber hinaus kann die multi-temporale Datenbank für die Planung und Vorbereitung zukünftiger Missionen genutzt werden. Bilddaten die im Verlauf zukünftiger Missionen entstehen, können dank der flexiblen Struktur der Datenbank schnell integriert und verfügbar gemacht werden.

III.2 Fortschritt bei anderen Stellen

Die Entwicklung und der Betrieb der Datenbank erfolgen ausschließlich am Institut für Planetologie. Fortschritte bei anderen Stellen sind daher nicht zu verzeichnen.

III.3 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

III.3.a Begutachtete Veröffentlichungen

- [2024.1] Iqbal W., Head J. W. III, van der Bogert C. H., Frueh T., Henriksen M., Bickel V., et al. (2024) Slopes along Apollo EVAs: Astronaut experience as input for future mission planning. *Acta Astronautica* 223: 184–196. Doi: 10.1016/j.actaastro.2023.11.022.
- [2024.2] Luna J. W., Iqbal W., Bernhardt H., El Bilali H., Krasilnikov S., Krasilnikov A., et al. (2024) Planetary geologic maps: Essential tools for scientific inquiry and space exploration. *Journal of Geophysical Research: Planets* 129(10): e2024JE008442. Doi: 10.1029/2024JE008442.
- [2024.3] Wueller L., Iqbal W., Hiesinger H., Head J. W. III (2024) Geologic history of Deuteronilus Cavus in the Ismenius Lacus Region, Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets* 129(2): e2023JE008039. Doi: 10.1029/2023JE008039.
- [2024.4] Wueller L., Iqbal W., Frueh T., van der Bogert C. H., Hiesinger H. (2024) Geologic history of the Amundsen Crater region near the lunar south pole: Basis for future exploration. *The Planetary Science Journal* 5(6): 147. Doi: 10.3847/PSJ/ad4aeb.
- [2024.5] Heyer T., Raack J., Iqbal W., Hiesinger H., Oetting A. (2024) Albedo analysis of dust devil-induced slope streaks and tracks on Mars. *Icarus* 423: 116270. Doi: 10.1016/j.icarus.2024.116270.
- [2023.1] Hiesinger H., van der Bogert C. H., Michael G., Schmedemann N., Iqbal W., Robbins S. J., et al. (2023) The lunar cratering chronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 89(1): 401–451. Doi: 10.2138/rmg.2023.89.08.
- [2023.2] Iqbal W., Hiesinger H., Borisov D., van der Bogert C. H., Head J. W. (2023) Geological mapping and chronology of lunar landing sites: Apollo 14. *Icarus* 406: 115732. Doi: 10.1016/j.icarus.2023.115732.
- [2023.3] Heyer T., Iqbal W., Oetting A., Hiesinger H., van der Bogert C. H., Schmedemann N. (2023) A comparative analysis of global lunar crater catalogs using OpenCraterTool – An open source tool to determine and compare crater size-frequency measurements. *Planetary and Space Science* 231: 105687. Doi: 10.1016/j.pss.2023.105687.
- [2022.1] Ruesch O., Marshal R., Iqbal W., Pasckert J. H., van der Bogert C. H., Patzek M. (2022) Catastrophic rupture of lunar rocks: Implications for lunar rock size–frequency distributions. *Icarus* 387: 115200. Doi: 10.1016/j.icarus.2022.115200.

[2022.2] Amrouche M., Weber R. C., Schmerr N., Iqbal W. (2022) Effects of lunar near-surface geology on Moonquakes ground motion amplification. *Journal of Geophysical Research: Planets* 127(9): e2022JE007396. Doi: 10.1029/2022JE007396.

III.3.b Konferenzbeiträge

- [K2025.1] Hiesinger H., Theiner T., van der Bogert C. H., Iqbal W., Wueller L. (2025) A new geologic map of the Poincaré region, Moon. 56th Lunar and Planetary Science Conference, Houston, #1880.
- [K2025.2] Heyer T., Hiesinger H., Schmedemann N., Iqbal W. (2025) The Multi-Temporal Database of Planetary Image Data (MUTED): Dynamic rendering of datasets for the Moon, Mars, and Mercury. 56th Lunar and Planetary Science Conference, Houston, #1158.
- [K2025.3] Heyer T., Raack J., Iqbal W., Hiesinger H., Oetting A. (2025) Albedo analysis of Martian dust devil-induced slope streaks and tracks. 56th Lunar and Planetary Science Conference, Houston, #1063.
- [K2025.4] Iqbal W., Head J. W., Scott D. R., Mickey W., Wueller L., Hiesinger H., van der Bogert C. H., Heyer T. (2025) Regional distribution of lava flow units exposed as outcrops in Hadley Rille at the Apollo 15 landing site. 56th Lunar and Planetary Science Conference, Houston, #1023.
- [K2025.5] Iqbal W., Theiner J., Oetting A., Wueller L., van der Bogert C. H., Hiesinger H. (2025) Geologic mapping of the Bose and Bhabha region within the South Pole–Aitken Basin. 56th Lunar and Planetary Science Conference, Houston, #1062.
- [K2025.6] Oetting A., Iqbal W., Head J. W., van der Bogert C. H., Hiesinger H., Wueller L., Heyer T. (2025) Atypical crater morphologies on lunar impact melt pools. 56th Lunar and Planetary Science Conference, Houston, #1058.
- [K2025.7] van der Bogert C. H., Hiesinger H., Iqbal W., Oetting A., Heyer T., Giuri B., Pasckert J. H., Wueller L. (2025) Methodical and geological aspects of crater size-frequency distribution measurements. 56th Lunar and Planetary Science Conference, Houston, #1959.
- [K2025.8] Wueller L., Iqbal W., Xu X., Brown H., van der Bogert C. H., Hu T., Kang Z., Hiesinger H. (2025) Characterization of Rubin Crater on the Amundsen Crater rim: A potential target for lunar exploration. 56th Lunar and Planetary Science Conference, Houston, #1160.
- [K2024.1] Heyer T., Iqbal W., Oetting A., Hiesinger H., van der Bogert C. H., Schmedemann N. (2024) OpenCraterTool: An open source tool for precise crater size-frequency measurements in QGIS. *LPI Contributions* 3040: 1007.
- [K2024.2] Iqbal W., Hiesinger H., van der Bogert C. H., Heyer T., Head J. W. (2024) New geological maps of Apollo 15 and Apollo 17 landing sites. *LPI Contributions* 3040: 1010.
- [K2024.3] Iqbal W., van der Bogert C. H., Bickel V. T., Wueller L., Hiesinger H., Kring D. A. (2024) Geomorphic map of Malapert Massif summit region. *LPI Contributions* 3044: 7002.
- [K2024.4] Iqbal W., van der Bogert C. H., Hiesinger H., Bickel V. T., Wueller L., Hiesinger H., Kring D. A. (2024) High resolution geomorphic map of Malapert Massif. *LPI Contributions* 3040: 1009.

- [K2024.5] Klingenberg G. S., Iqbal W., Wueller L., van der Bogert C. H., Hiesinger H. (2024) Comparative study of Moretus and Tycho Craters: Insight into crater degradation processes. LPI Contributions 3040: 1932.
- [K2024.6] Oetting A., Iqbal W., Heyer T., Schmedemann N., Head J., Hiesinger H., van der Bogert C. H. (2024) Lunar multi-ring basins and their contribution to lunar production functions. LPI Contributions 3040: 1046.
- [K2024.7] Wueller L., Iqbal W., Frueh T., van der Bogert C. H., Hiesinger H. (2024) Geologic history of Amundsen Crater near the lunar south pole. LPI Contributions 3044: 7013.
- [K2024.8] Wueller L., Iqbal W., Frueh T., van der Bogert C. H., Hiesinger H. (2024) Science potential and landing conditions at candidate sites in the Amundsen Crater region, Moon. LPI Contributions 3040: 1015.
- [K2024.9] Heyer T., Hiesinger H., Iqbal W., Schmedemann N. (2024) The Multi-Temporal Database of Planetary Image Data (MUTED): A web service for processing digital terrain models for Mars and the Moon. 55th Lunar and Planetary Science Conference, Houston.
- [K2024.10] Iqbal W., Head J. W., van der Bogert C. H., Frueh T., Henriksen M., Bickel V., Heyer T., et al. (2024) Astronaut experiences on the slopes along Apollo EVAs. EPSC 2024–196, Copernicus Meetings.
- [K2024.11] Oetting A., Iqbal W., Heyer T., Schmedemann N., Head J., Michael G., et al. (2024) Evaluation of large craters and basins for lunar production functions. EPSC 2024–372, Copernicus Meetings.
- [K2024.12] Wueller L., Iqbal W., Frueh T., van der Bogert C. H., Hiesinger H. (2024) Comparison of landing conditions and science potential of candidate landing sites at Amundsen Crater near the lunar south pole. EPSC 2024–473, Copernicus Meetings.
- [K2023.1] Heyer T., Hiesinger H., Iqbal W., Schmedemann N. (2023) The Multi-Temporal Database of Planetary Image Data (MUTED): Developing a web-service to automatically detect craters in orbital images. Lunar and Planetary Science Conference, Houston.
- [K2023.2] Iqbal W., Gebbing T., Borisov D., Hiesinger H., van der Bogert C. H. (2023) New geological maps of the Apollo 14 and Apollo 16 landing sites. 54th Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, TX, USA.
- [K2023.3] Iqbal W., Hiesinger H., van der Bogert C. H., Heyer T. (2023) Geology of Cone Crater for the calibration of lunar chronology. 54th Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, TX, USA.
- [K2023.4] Haber T., Iqbal W., Liu T., van der Bogert C. H., Hiesinger H., Černok A., Becker H., Scherer E. E. (2023) A tale of two impact basins – Are the formation ages of Serenitatis and Crisium preserved in anorthositic norites in Apollo samples 77017 and 67955? European Lunar Symposium, Padua, Italy.
- [K2023.5] Heyer T., Iqbal W., Oetting A., Hiesinger H., van der Bogert C. H., Schmedemann N. (2023) OpenCraterTool: An open source tool to determine and compare crater size-frequency measurements. European Lunar Symposium, Padua, Italy.
- [K2023.6] Iqbal W., Hiesinger H., van der Bogert C. H., Heyer T. (2023) Cone crater geology and the lunar chronology calibration. European Lunar Symposium, Padua, Italy.
- [K2023.7] Heyer T., Iqbal W., Oetting A., Hiesinger H., van der Bogert C. H., Schmedemann N. (2023) OpenCraterTool: Determining and comparing crater size-frequency measurements in QGIS. DPS–EPSC, San Antonio, TX, USA.

- [K2022.1] Heyer T., Hiesinger H., Iqbal W., Schmedemann N. (2022) The Multi-Temporal Database of Planetary Image Data (MUTED): A comprehensive web-based tool to study Mars, Moon, and Mercury. Lunar and Planetary Science Conference, Houston.
- [K2022.2] Iqbal W., Liu T., Haber T., van der Bogert C. H., Scherer E. E., Hiesinger H. (2022) What is the source of Apollo 17 sample 77017? 53rd Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, TX, USA.
- [K2022.3] van der Bogert C. H., Iqbal W., Hiesinger H., Qian Y., Head J. W., et al. (2022) New and improved calibration points – The lunar cratering chronology in the era of Chang’e, LRO, and SELENE. 53rd Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, TX, USA.
- [K2022.4] Haber T., Iqbal W., Liu T., Scherer E. E., van der Bogert C. H., Hiesinger H. (2022) A 4.15 Ga age of Serenitatis or Crisium implied by the Pb-207/Pb-206 systematics of Apollo sample 77017. Meteoritical Society Annual Meeting, Glasgow, Scotland.
- [K2021.1] Gebbing T., Hiesinger H., Iqbal W., van der Bogert C. H. (2021) New geologic map of the Apollo 16 landing site: Implications for the lunar chronology. Annual Meeting of Planetary Geologic Mappers, Virtual.
- [K2021.2] Gebbing T., Hiesinger H., Iqbal W., van der Bogert C. H. (2021) New geologic map of the Apollo 16 landing site: Implications for crater size-frequencies of the lunar chronology. 52nd Lunar and Planetary Science Conference, Virtual.
- [K2021.3] Heyer T., Hiesinger H., Raack J., Jaumann R. (2021) The Multi-Temporal Database of Planetary Image Data (MUTED): Web-processing of orbital images of Mars. Lunar and Planetary Science Conference, Virtual.
- [K2021.4] Iqbal W., Hiesinger H., van der Bogert C. H. (2021) Comprehensive geological mapping of Apollo 15 and Apollo 17 landing sites and their implications. Annual Meeting of Planetary Geologic Mappers, Virtual.
- [K2021.5] Iqbal W., Hiesinger H., van der Bogert C. H. (2021) Investigating a potential source of young ages at Apollo 15 landing site. 52nd Lunar and Planetary Science Conference, Virtual.
- [K2021.6] Iqbal W., Hiesinger H., van der Bogert C. H., Head J. W. (2021) The source of young ages at the Apollo 15 landing site. NASA Exploration Science Forum & European Lunar Symposium, Virtual.
- [K2021.7] Iqbal W., Hiesinger H., van der Bogert C. H., Heyer T., Schmedemann N. (2021) New geological studies and crater size-frequency distributions of Apollo landing sites and their future implications. Europlanet Science Congress, Virtual.

Literatur

- Anderson, J. A., Sides, S. C., Soltesz, D. L., Sucharski, T. L., & Becker, K. J. (2004). Modernization of the Integrated Software for Imagers and Spectrometers. 35th Lunar and Planetary Science Conference, Abstract #2039, Houston, TX.
- Baratoux, D., Mangold, N., Forget, F., Cord, A., Pinet, P., Daydou, Y., et al. (2006). The role of the wind-transported dust in slope streaks activity: Evidence from the HRSC data. *Icarus*, 183(1), 30–45. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.01.023>
- Beyer, R., Alexandrov, O., & McMichael, S. (2019). StereoPipeline: ASP 2.6.2 [Software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3247734>
- Bhardwaj, A., Sam, L., Martin-Torres, F. J., Zorzano, M. P., & Fonseca, R. (2017). Martian slope streaks as plausible indicators of transient water activity. *Scientific Reports*, 7(1), 7074. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07453-9>

- Bickel, V. T., Aaron, J., Manconi, A., Loew, S., & Mall, U. (2020). Impacts drive lunar rockfalls over billions of years. *Nature Communications*, 11(1), 2862. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16653-3>
- Bochkovskiy, A., Wang, C.-Y., & Liao, H.-Y. M. (2020). YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection [Preprint]. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2004.10934>
- Jaumann, R., Neukum, G., Behnke, T., Duxbury, T. C., Eichertopf, K., Flohrer, J., et al. (2007). The High Resolution Stereo Camera (HRSC) experiment on Mars Express: Instrument aspects and experiment conduct from interplanetary cruise through the nominal mission. *Planetary and Space Science*, 55(7), 928–952. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2006.12.003>
- Kreslavsky, M. A., & Head, J. W. (2009). Slope streaks on Mars: A new “wet” mechanism. *Icarus*, 201(2), 517–527. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.01.026>
- Michael, G. G., Kneissl, T., & Neesemann, A. (2016). Planetary surface dating from crater size–frequency distribution measurements: Poisson timing analysis. *Icarus*, 277, 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.05.019>
- Mills, M. M., Bickel, V. T., McEwen, A. S., & Valantinas, A. (2024). A global dataset of pitted cones on Mars. *Icarus*, 418, 116145. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2024.116145>
- Neukum, G., Jaumann, R., & the HRSC Co-Investigator Team. (2004). HRSC: The High Resolution Stereo Camera of Mars Express. In *Mars Express: The Scientific Payload* (ESA Special Publication SP-1240). European Space Agency.
- Rüsch, O., & Bickel, V. T. (2023). Global mapping of fragmented rocks on the Moon with a neural network: Implications for the failure mode of rocks on airless surfaces. *The Planetary Science Journal*, 4(7), 126. <https://doi.org/10.3847/PSJ/acd1ef>
- Sullivan, R., Thomas, P., Veverka, J., Malin, M., & Edgett, K. S. (2001). Mass movement slope streaks imaged by the Mars Orbiter Camera. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E10), 23,607–23,633. <https://doi.org/10.1029/2000JE001296>
- Wang, Y., Wu, B., Xue, H., Li, X., & Ma, J. (2021). An improved global catalog of lunar impact craters (≥ 1 km) with 3D morphometric information and updates on global crater analysis. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126(9), e2020JE006728. <https://doi.org/10.1029/2020JE006728>