

Mineraliensuche auf dem Mond

– Mondfotografie in mehreren Spektralbereichen

von Wolfgang Bischof

Ein völlig anderer Blick auf den Mond!

Multispektrale Untersuchungsmethoden werden überall dort angewendet, wo ein direkter Zugriff nicht möglich ist. Deshalb wird die Reflexionsspektroskopie [1] zur Fernerkundung von Mineralienvorkommen in unzugänglichen Gebieten und im Sonnensystem eingesetzt. Reflexionsspektren sind charakteristisch für die reflektierenden Materialien, die auf diesem Wege identifiziert werden können. Solche Spektren können auch auf der Mondoberfläche gewonnen werden. Heute wird dies mit Hilfe von Hightech-Spektrometern realisiert [2], die in Mondorbitern installiert sind. In begrenztem Maße kann man aber auch mit Amateurmitteln von der Erdoberfläche aus interessante Resultate erzielen. In diesem Artikel wird ein Ansatz dazu gezeigt.

Benötigt wird eine Kamera, die in einem weiten Spektralbereich von UV bis IR hinreichend empfindlich ist und ein Sortiment von Filtern für die interessanten Spektralbereiche. Was aber sind die interessanten Spektralbereiche? Um das entscheiden zu können, benötigt man im Labor gewonnene Reflexionsspektren der Materialien, aus denen die Mondoberfläche zusammengesetzt ist. In der Abbildung 1 findet man eine Zusammenstellung. Mit eingeblendet sind fünf Wellenlängenbereiche, die mit han-

delsüblichen in der Amateurastronomie gebräuchlichen Filtern (hier UV, B, G, R und IR) untersucht werden können. Wegen der Winkelabhängigkeit des Reflexionsvermögens benötigt man Aufnahmen um die Zeit des Vollmondes herum, wenn der Reflexionswinkel nahe bei 180° liegt.

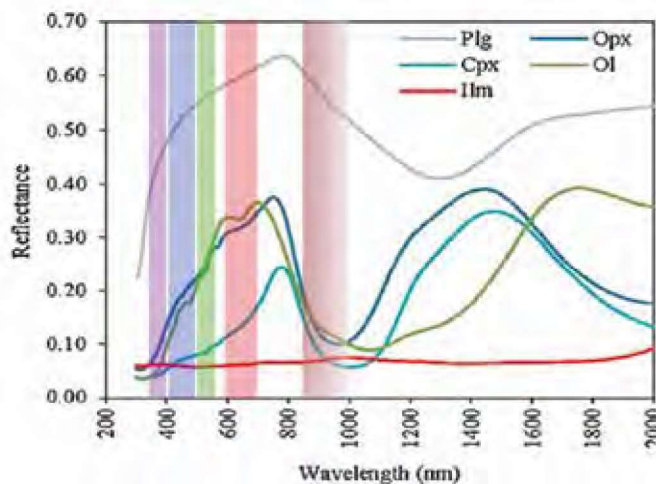
In der Abbildung 1 erkennt man zunächst, dass der Reflexionsgrad, also die Albedo (!) vom UV bis zum tiefen Rot mit zunehmender Wellenlänge ansteigt. Der Mond muss also im roten Spektralbereich eine wesentlich höhere Albedo als im blauen Spektralbereich besitzen und demzufolge visuell eine rötlichbraune Farbe haben. Diese Tatsache erscheint zunächst überraschend, denn sie widerspricht dem Augenschein, wonach der Mond eher farblos-grau erscheint. Zur bräunlichen Grundfärbung des Mondes gibt es mittlerweile zahlreiche Hinweise im Netz [3, 4]. Nach einem ausgeprägten Maximum bei ca. 700-800 nm fällt der Reflexionsgrad wieder stark ab. Der Grund ist das Auftreten von spezifischen Absorptionsbanden im IR. Damit ist dieser Spektralbereich zur Identifikation einzelner Mineralien besonders wichtig.

Von den Mondmineralien ist besonders Ilmenit, ein Titan-Eisenerz (FeTiO_3) von besonderer Bedeutung, einmal weil man dar-

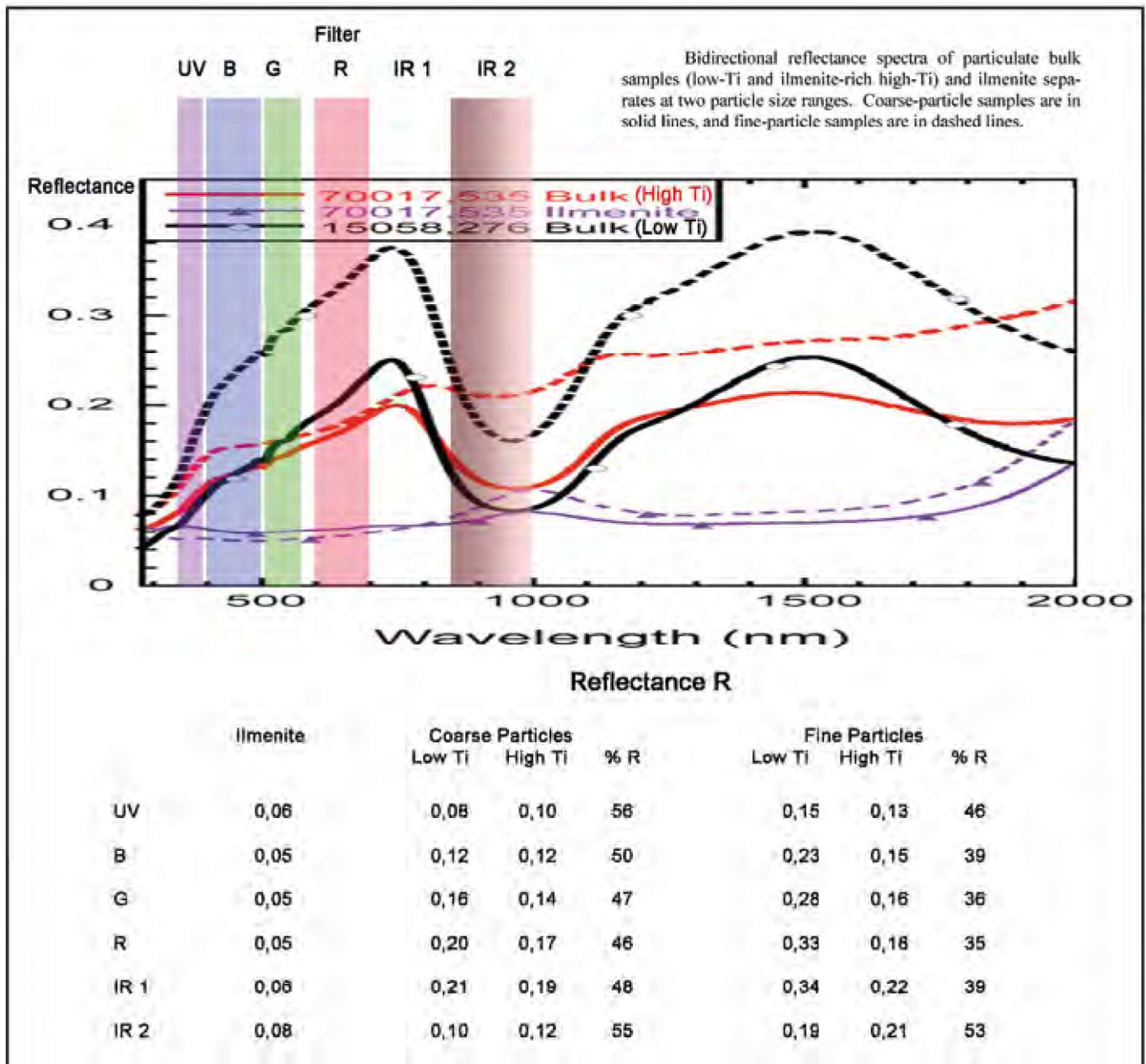
aus Sauerstoff zur Versorgung einer Mondbasis gewinnen könnte, andererseits weil Titan auch als Rohstoff interessant ist. In Gesteinsproben, die von den Apollo-Astronauten zur Erde gebracht worden sind, hat man Titananteile bis zu 12% gefunden. In der Abbildung 1 erkennt man sofort, dass Ilmenit vor allem im UV und im NIR (Nahinfrarot) einen nennenswerten Beitrag zur Luminanz besteuern kann. Im roten Spektralbereich spielt es dagegen nur eine geringere Rolle. Leider ist selbst im UV und NIR der Beitrag des Minerals Plagioklas, ein Kalk-Natron-Feldspat, wesentlich größer, so dass eine sichere Identifikation von Ilmenit zunächst unmöglich erscheint.

Zusätzlich muss bedacht werden, dass die Mineralien auf dem Mond nicht nur in reiner Form vorkommen, sondern als beliebige Gemische und Schmelzen, in denen die Kristallstruktur verloren gegangen, die ursprüngliche elementare Zusammensetzung aber noch vorhanden ist. Deshalb ist eine andere spektrale Aufschlüsselung der Mondmineralien für die Amateurastronomie interessanter. Dabei werden nur noch titanarme und titanreiche Böden in grobkörniger oder feinkörniger Struktur unterschieden (Abb. 2). Hier fällt auf, dass titanreiche Mineralien im UV und im IR2 überwiegend zum Reflexionsgrad und damit zur Luminanz beitragen, während ihr Beitrag im G- und vor allem im R-Bereich wesentlich geringer ist. In der Tabelle unter der Abbildung ist der prozentuale Anteil des Reflexionsgrades, also der Luminanzbeitrag, angegeben. Interessant ist, dass die Daten im UV- und im IR-Bereich sehr ähnlich sind. Diese Verhältnisse eröffnen eine Möglichkeit, mögliche Titanlagerstätten auf der Mondoberfläche zu finden und zu kartieren.

Soweit die Theorie, nun folgt die Praxis. Verwendet wurden die Filter UV, B, G und



1 Reflexionsvermögen einiger ausgewählter Mondmineralien (entnommen aus [9]). Zum besseren Verständnis des Textes wurden die Wellenlängenbereiche der Filter vom Verfasser eingefügt.



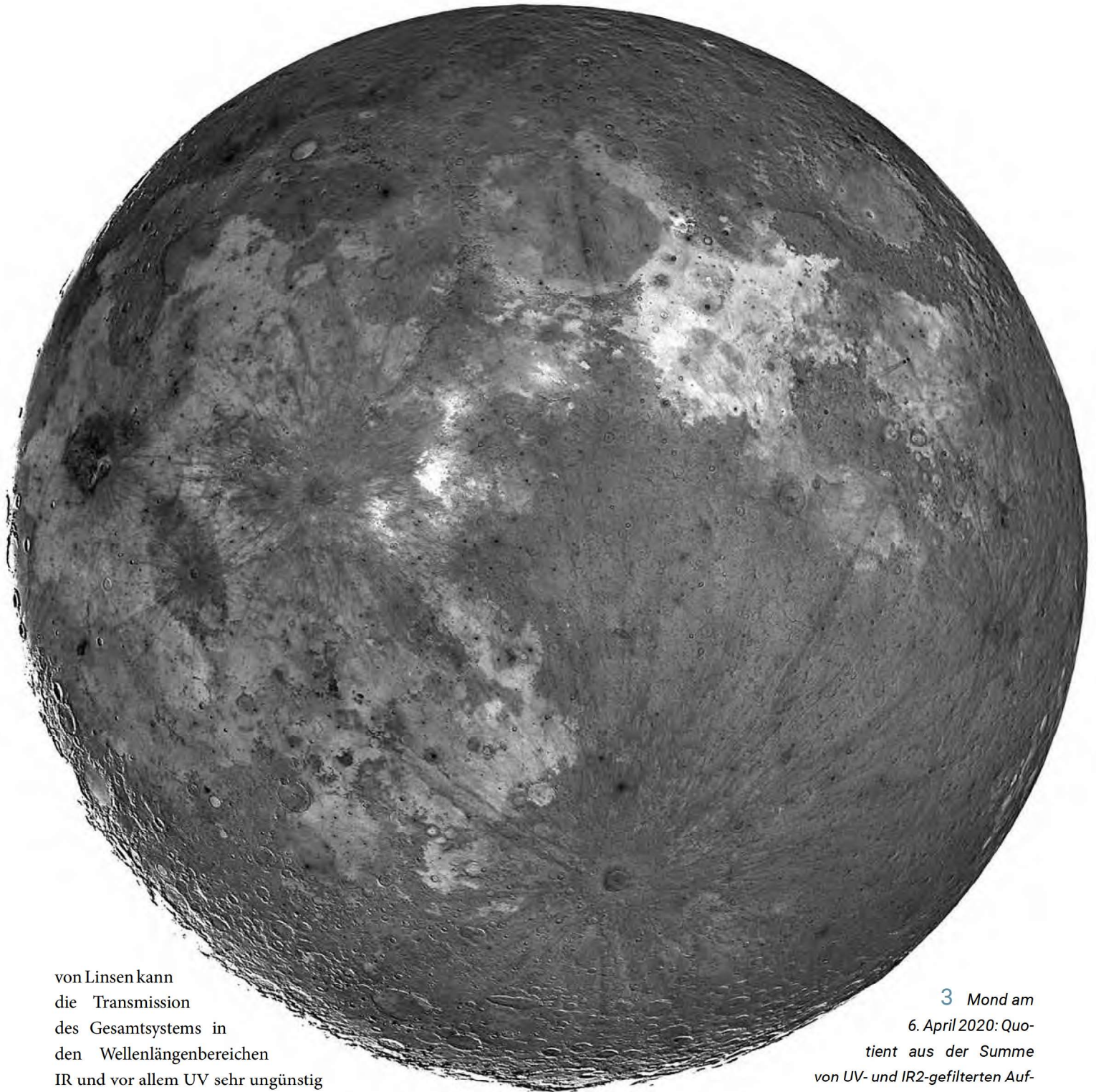
2 Reflexionsvermögen von titanreichen und -armen Mondgesteinen (entnommen aus [10]). Zum besseren Verständnis des Textes wurden die Wellenlängenbereiche der Filter sowie die Tabelle vom Verfasser hinzugefügt.

R der Marke Astrodon sowie das IR-Passfilter IR850 der Marke ZWO (IR2 in Abb. 2). Dieses Filter ist in Richtung IR offen, d. h. der aufgenommene Spektralbereich wird durch die maximale Wellenlänge der Kamera begrenzt (hier ca. 1.000 nm). Versuchsweise wurde auch ein IR-Passfilter von Baader eingesetzt (IR1 in Abb. 2). Dieses öffnet allerdings schon bei 685 nm, was zunächst ungünstig erscheint, da der transmittierte Wellenlängenbereich zu groß und damit zu unspezifisch ist. Dieser Nachteil kann allerdings beseitigt werden, wenn man die Differenz der IR685- und der IR850-Aufnahmen bildet, wobei natürlich

die spektrale Empfindlichkeit der Kamera mit berücksichtigt werden muss. Es bleibt dann ein Wellenlängenband zwischen 685 und 850 nm übrig. Dieses Band liefert jedoch Ergebnisse, die vom rotgefilterten Ergebnis nur wenig abweichen. Deshalb wurde dieser Weg zunächst nicht weiter beschritten.

Die Aufnahmen wurden mit einer 20-Megapixel-Videokamera ASI 183 MM der Firma ZWO an einem Newton-Spiegelteleskop mit 200 mm Öffnung und 1.200 mm Brennweite erstellt. Mit dieser Kombination ist es möglich, mit einem Panorama aus

nur zwei Aufnahmen den gesamten Mond abzubilden. Die Panoramatechnik ist für solche Untersuchungen prinzipiell problematisch, weil geringste Unterschiede der atmosphärischen Transparenz und kleinste Ungenauigkeiten bei der Zusammensetzung des Panoramas sehr häufig zu sichtbaren Fehlern führen, wie der Verfasser in zahlreichen Versuchen feststellen konnte. Deshalb sollte man mit möglichst wenigen Einzelbildern auskommen. Die Kamera hat eine Pixelgröße von nur 2,4 µm. Damit erzielt man ohne Verwendung von Linsenelementen annähernd das Grenzauflösungsvermögen des Teleskops. Bei Verwendung



von Linsen kann die Transmission des Gesamtsystems in den Wellenlängenbereichen IR und vor allem UV sehr ungünstig beeinflusst werden. Es sei hier angemerkt, dass im Hinblick auf eine genauere multispektrale Auswertung der Einsatz einer Farbkamera, wenn auch nur für den RGB-Bereich, nicht empfohlen werden kann. Die Transmissionskurven der Bayermatrix sind nicht genügend voneinander separiert.

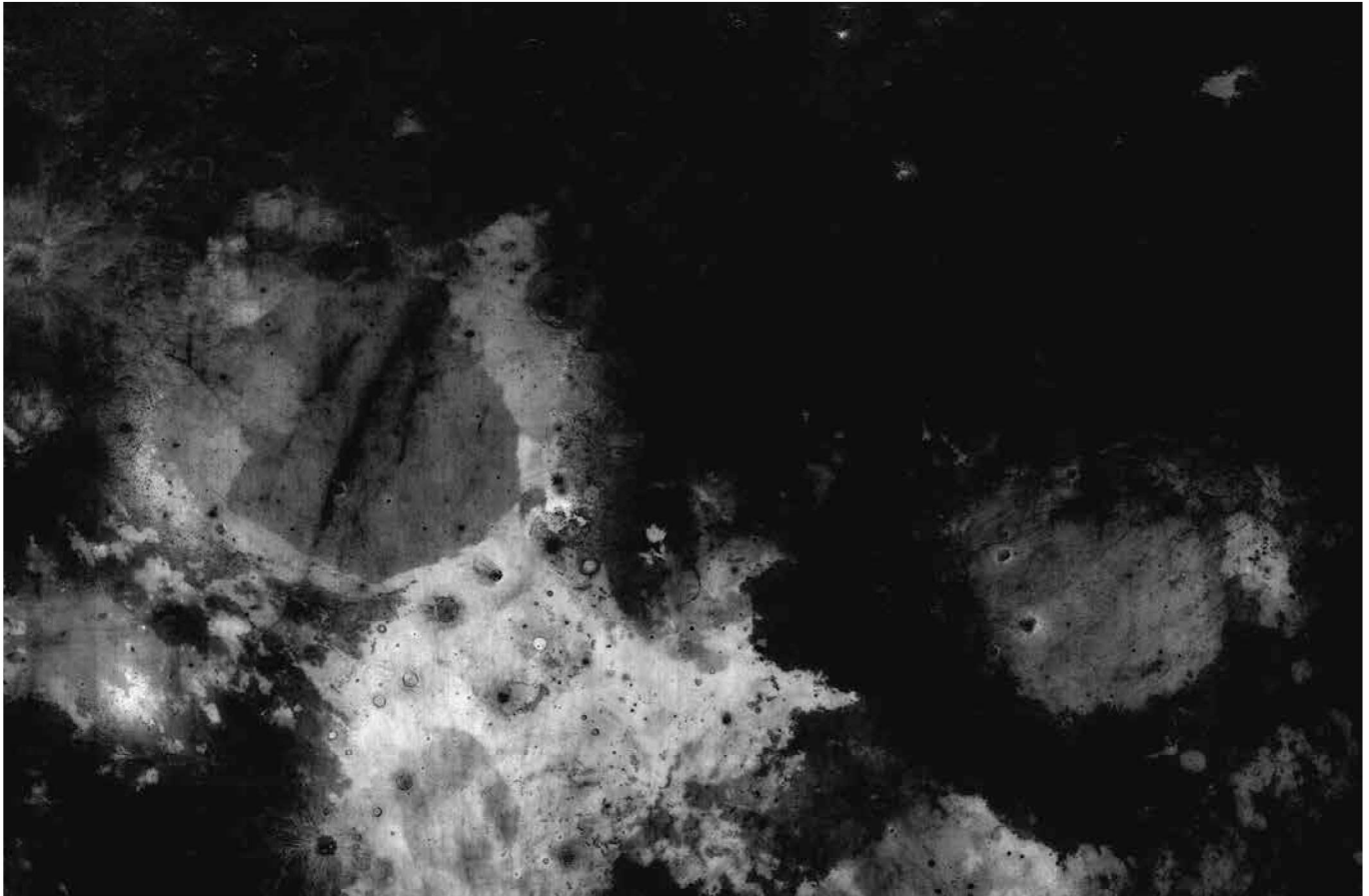
Die Aufnahme der Videos ist recht speicherintensiv und die Bildfrequenz ist mit ca. 6-7 Bildern pro Sekunde eher gering. Es wurden pro Teilbild 500 Einzelbilder aufgenommen, bei fünf Filtern sind das bereits

10 Videos von je 80 Sekunden Dauer. Da die Filter teilweise nicht homofokal sind, kommt zwischen den Aufnahmen noch die Anpassung des Bildbereichs und die Fokussierung hinzu. Insgesamt ist man mit einer kompletten Aufnahmeserie 20-30 Minuten beschäftigt.

Besondere Aufmerksamkeit benötigen die Aufnahmehistogramme. Auch nach der späteren Schärfung muss Übersättigung vermieden, der Histogrammbereich darf

3 Mond am 6. April 2020: Quotient aus der Summe von UV- und IR2-gelichteten Aufnahmen und der rotgelichteten Aufnahme

also nicht vollständig ausgenutzt werden. Am wichtigsten ist es aber, dafür zu sorgen, dass die Empfindlichkeitsschwelle (die bei Verwendung jedes Filters etwas anders liegt!) klar erfasst wird. Das Signal des dunklen Himmelhintergrundes darf also keinesfalls beschnitten sein! Das Histogramm muss etwas abgesetzt vom linken Rand bleiben.



4 Graustufendarstellung von Titangehalten aus Aufnahmen des Lunar Reconnaissance Orbiters (Ausschnitt aus [7]).

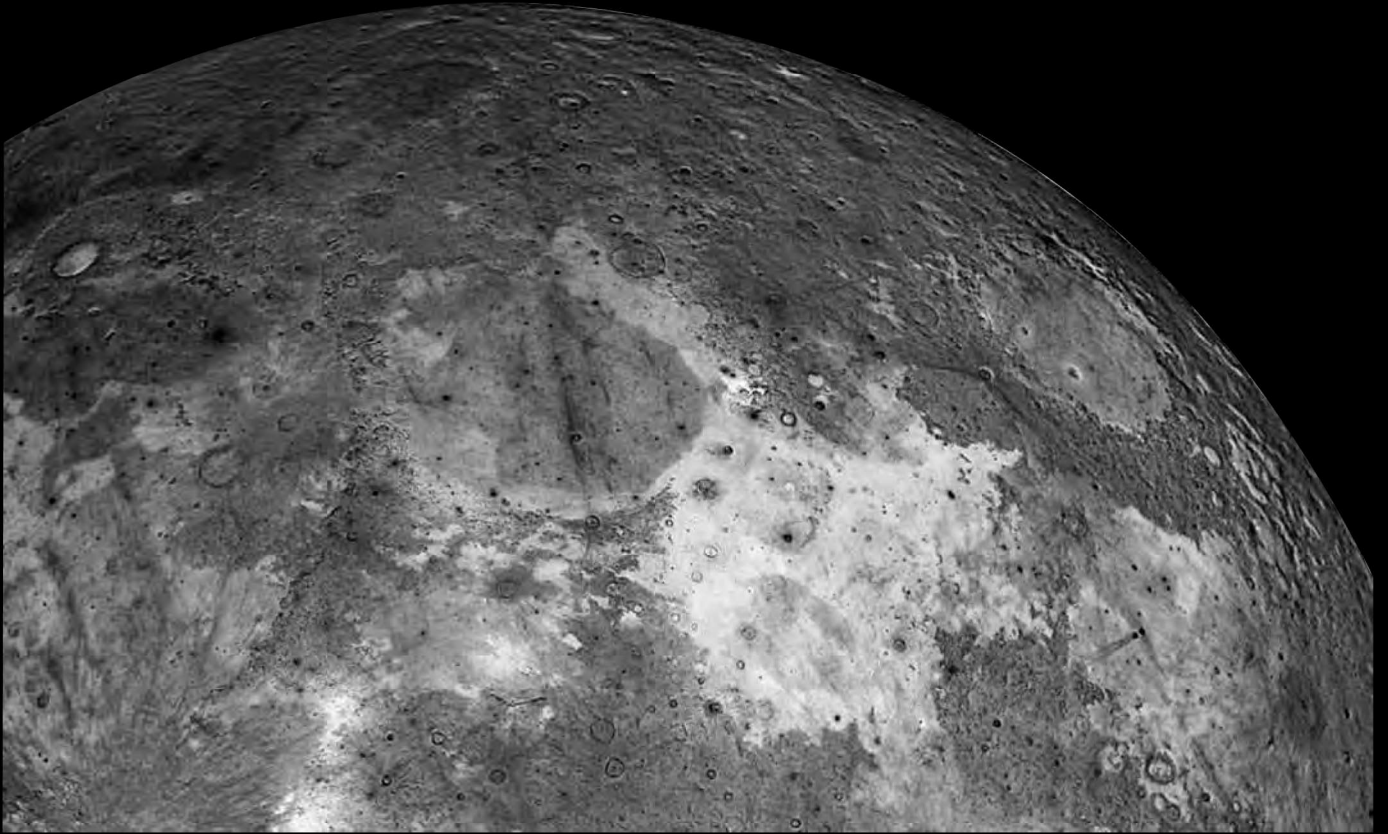
Die hier verwendeten Aufnahmen wurden am 6. April 2020 kurz vor Vollmond gewonnen. Aus den aufgenommenen Videos wurden 20% der Aufnahmen mit dem Programm AutoStakkert selektiert und gestackt und anschließend mit dem Programm Giotto geschärft. Vor der Weiterverarbeitung ist es erforderlich, über eine lineare Gradationsanpassung die Histogramme der Aufnahmen peinlich genau aufeinander auszurichten. Das Signal des Himmelshintergrundes muss bei allen Histogrammen exakt an derselben Stelle liegen. Nun kann man aus den resultierenden Graustufenbildern mittels eines Arithmetikmoduls eines astronomischen Bildbearbeitungsprogramms (hier Astro- Art 6) direkt Farbquotienten der einzelnen Farbkanäle erzeugen. Das Ergebnis sind Luminanzverhältnisse der Spektralbereiche, also genau das, was man sehen möchte und direkt mit den Tabellenwerten in der Abbildung 2 in Beziehung setzen kann!

Wie wir schon wissen, ist der Luminanzanteil der titanreichen Böden im UV und IR2 sehr ähnlich und relativ hoch, im roten Spektralbereich dagegen relativ niedrig. Deshalb wurden die UV- und die IR2-Aufnahmen addiert und das Ergebnis durch die R-Aufnahme dividiert. Als Ergebnis erhält man die Graustufenkarte in der Abbildung 3. In den helleren Gebieten kann man einen erhöhten, in den dunklen Gebieten einen geringeren Titananteil erwarten. Dabei fallen vor allem das Mare Tranquilitatis und einige Gebiete in der Mondmitte besonders ins Auge. Am Terminator (unten links) sind Artefakte erkennbar. Die Schatten der Kraterwälle führen bei der Quotientenbildung zu einer Division durch Null.

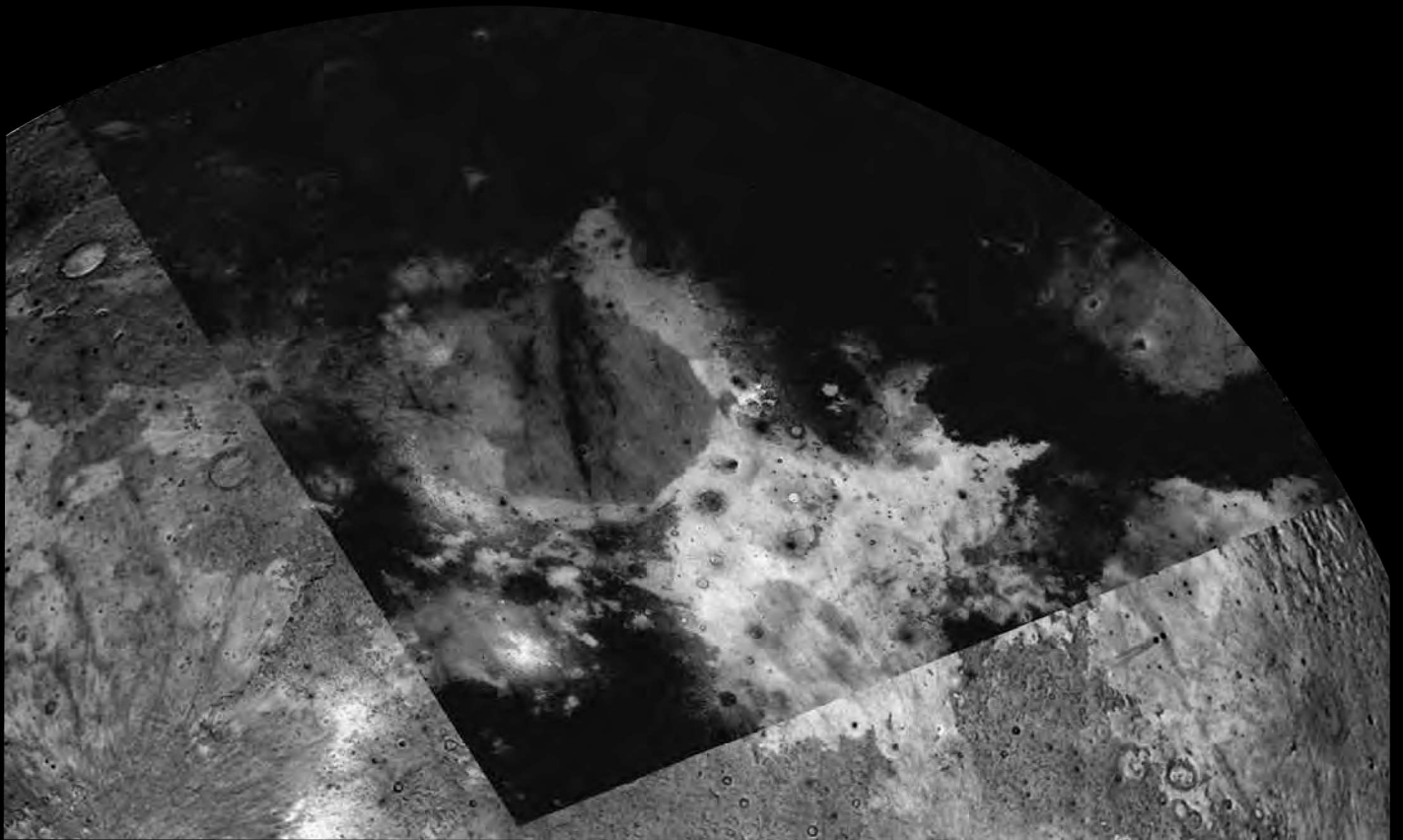
Zur Überprüfung des Ergebnisses findet man zahlreiche Publikationen im Netz [5, 6], dabei auch eine recht detaillierte Karte von TiO_2 -Vorkommen auf dem Mond [7], die von der Weitwinkelkamera des Lunar Reconnaissance Orbiter aufgenommen worden ist. Der Ausschnitt, der von der

Erde sichtbar ist, ist in der Abbildung 4 wiedergegeben. Zum Vergleich dient nun die Abbildung 5 als Ausschnitt aus der eigenen Aufnahme (Abb. 3). In der Abbildung 6 sind beide Bilder (Abb. 4 und 5) überlagert worden. Die Übereinstimmung ist überraschend gut! Offenbar sind auch amateur-astronomische Arbeiten geeignet, auf dem sehr aktuellen Gebiet der Lagerstätten- erkundung auf dem Mond mitzuwirken. Allerdings, und das sollte man immer bedenken, bleibt man normalerweise auf wenige Spektralbereiche beschränkt und damit auf einem bescheidenen Niveau.

Zum Schluss noch etwas für das Auge: Multispektrale Aufnahmen lassen sich immer auch als Falschfarbenaufnahmen kombinieren. Die in der Abbildung 3 verwendeten Farbkanäle wurden zu einem IR-R-UV Falschfarbenbild kombiniert (Abb. 7). IR ist dabei rot, R grün und UV blau codiert. Zur Erstellung solcher Bilder gibt es eine Webseite des Verfassers [8] mit weiteren Informationen.



5 Ausschnitt aus der Abb. 3 (eigene Aufnahmen) zum Vergleich mit Abb. 4 (LRO-Aufnahmen).



6 Vergleich der unterschiedlichen Beobachtungen der Abb. 4 (LRO-Aufnahmen) und 5 (eigene Aufnahmen), Details im Text



7 Falschfarbenaufnahme
des Mondes vom 6. April 2020
(Details im Text)

Literatur- und Internethinweise

(Stand 21.04.2020):

- [1] Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Homepage: „Oberfläche des Mondes“, www.mps.mpg.de/planetenforschung/mond-oberflaeche
- [2] C. M. Pieters et al., 2009: "The Moon Mineralogy Mapper (M3) on Chandrayaan-1", *Current Science* 96, No. 4, 25.02.2009, www.planetary.brown.edu/pdfs/m3_curr_sci_96.pdf
- [3] Farbtemperatur: <https://de.wikipedia.org/wiki/Farbtemperatur>
- [4] Ciocca & Wang, 2013: Bild: "Comparison of sunlight and moonlight spectra..." <https://i.stack.imgur.com/72dkh.png>
- [5] B. Hapke et al., 2018: "A LROC WAC Algorithm for TiO₂ Abundances in the Lunar Highlands and Low-Ti Maria", 49th Lunar and Planetary Science Conference 2018 (LPI Contrib. No. 2083), www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2018/pdf/1194.pdf
- [6] H. Sato et al., 2015: "New LROC WAC TiO₂ Abundance Map of the Moon", 46th Lunar and Planetary Science Conference (2015), www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2015/pdf/1111.pdf
- [7] Lunar Reconnaissance Orbiter, Homepage: "Lunar Reconnaissance Orbiter Camera, WAC TiO₂ Abundance Map", http://wms.lroc.asu.edu/lroc/view_rdr/WAC_TiO2
- [8] W. Bischof, Homepage: „Mond in Farbe“, <http://magicviews.de/mond%20farbe.htm>
- [9] M. Lemelin et al., 2013: "Ilmenite Mapping of the Lunar Regolith over Mare Australe and Mare Ingenii Regions: An optimized multisource approach based on Hapke radiative transfer theory", *J. Geophys. Res.: Planets*, Vol. 118, 2582–2593, doi:10.1002/2013JE004392, 2013, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2013JE004392>
- [10] P. J. Isaacson et al., 2011: "Reflectance Spectroscopy of Ilmenite: New Constraints from Apollo Sample Measurements", 42nd Lunar and Planetary Science Conference (2011), <https://pdfs.semanticscholar.org/dd2c/81ee963fe84e1145ec5d3d0a4724ba464834.pdf>