



Karl Urban *Hrsg.*

# Der Mond

Von lunaren Dörfern,  
Schrammen  
und Lichtblitzen

SACHBUCH

 STERNE UND  
WELTRAUM



Springer

# Der Mond

Karl Urban  
Hrsg.

# Der Mond

Von lunaren Dörfern, Schrammen  
und Lichtblitzen

 Springer

*Hrsg.*  
Karl Urban  
Freier Journalist  
Tübingen, Deutschland

ISBN 978-3-662-60281-2      ISBN 978-3-662-60282-9 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-60282-9>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Lisa Edelhäuser  
Einbandabbildung: [moon.nasa.gov/deblik](http://moon.nasa.gov/deblik)

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

# Vorwort

Im Januar 1994 beginnt eine kleine, scheinbar unbedeutende Raumsonde, den Mond zu umkreisen. Clementine stammt aus den USA, wurde aber nicht von der NASA gebaut. Sie scheint unbedeutend, weil das US-Verteidigungsministerium mit ihr kaum vier Monate lang einige experimentelle Überwachungstechnologien testet, während wissenschaftliche Ziele eher im Hintergrund stehen. Und doch markiert ausgerechnet diese Raumsonde eine Zeitenwende in der Raumfahrt, was aber damals noch niemand ahnt. Diese Neuausrichtung der Raumfahrt hält bis heute an und ist längst noch nicht vorüber: Es ist das wieder aufflammende Interesse und die Wiederentdeckung des Mondes.

Der gute Mond kann ein treuer, unbestechlicher Begleiter sein oder ein Schönheitsideal verkörpern wie in Fernost: Der Erdtrabant war wohl schon immer fester Bestandteil menschlicher Kultur. Er ist kein Himmelskörper, der Fruchtbarkeit bringt wie die Venus oder Zwist und Krieg wie der Mars – der Mond ist anders. Er wird zwar manchmal weniger und manchmal mehr, sein Licht kommt und geht mit den Mondphasen; aber doch ist er immer da. Entsprechend war der Mond für uns Menschen zumeist positiv besetzt. Mit den ersten Fernrohren und Teleskopen wurde unser Verhältnis sachlicher, denn die Menschen sahen zunehmend Gemeinsamkeiten jenes Himmelskörpers mit unserer Erde. Die Beobachter entdeckten hohe Gebirge; sie erkannten in den dunklen Maren gewaltige flache Ebenen. Nur über die Natur der kreisrunden und weit verbreiteten Ringstrukturen rätselten und stritten die Wissenschaftler lange, denn vergleichbare Geländeformen gibt es auf der Erde nur sehr selten. Entsprechend stritt man sich, ob es sich nicht vielleicht um Vulkankrater handelte. Es dauerte bis zu den

ersten Mondlandungen und dem von Menschen gesammelten und zur Erde beförderten Gestein, das die Geologengemeinde befriedete. Die Krater entstanden durch äußere Einwirkung und der Mond muss entsprechend von Meteoriten geradezu verwüstet worden sein. Die Konsequenz war die Einsicht, dass das Sonnensystem nicht per se friedlich ist. Dieses Wissen verdanken wir dem Mond, der uns die Augen öffnete.

Als ich als junger Student nach meinem Abitur im Institut für Planetenforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Berlin-Adlershof ein Praktikum absolvierte, lernte ich: Die Erkenntnisse über den Mond stammten bis dahin noch weitgehend von den Mondlandungen mehr als drei Jahrzehnte zuvor und von jener (nur scheinbar) unbedeutenden Raumsonde Clementine: Die Planetenforscher an dem Institut unterhielten sich über ein sogenanntes Laser-Altimeter, mit dem Clementine die Höhe und Tiefen von Kratern, Ebenen und Gebirgen auf dem Mond sehr genau vermessen hatte. Diese Daten waren in Berlin-Adlershof begehrt, immerhin hatte der ehemalige Leiter jenes Instituts Gerhard Neukum in den 1970er Jahren eine Methode erfunden, das Alter verschiedener Regionen auf dem Mond mit dem Zählen von Kratern zu bestimmen, die sich nun, dank der Höhendaten der Clementine-Sonde, stark verfeinern ließ. Das Alter von Kratern auf dem Mars oder dem Merkur können wir heute nur deswegen abschätzen, weil wir dem Mond dieses Wissen mühsam abgerungen haben.

Es waren solche Einsichten, die mich selbst vor fast zehn Jahren dazu bewogen, mich in die Geologie einzuarbeiten und schließlich als Wissenschaftsjournalist zu arbeiten. Und tatsächlich hat mich der Mond seither nicht mehr losgelassen. Die lange Zeit ohne einen einzigen Besuch von Menschen oder Raumsonden zwischen 1976 und 1990 ist lange überwunden. Nach der letzten sowjetischen Sonde Luna-24 von 1976 flog kurz vor Clementine lediglich die japanische Hiten-Mission zum Mond. Speziell in den letzten Jahren ist auf diesem Gebiet viel passiert, was ich und etliche geschätzte Autoren aus der Zeitschriften *Sterne und Weltraum* und *Spektrum der Wissenschaft* über die Jahre zusammengetragen haben: Raumsonden aus den USA, Japan, China, Indien und sogar von Privatunternehmen haben ihn besucht. Dieses wiedererstarbte Interesse hängt eng mit Clementine zusammen: Die Sonde hatte 1995 erstmals klare Anzeichen für Wasser auf dem Mond gefunden: für einen Rohstoff, den Menschen vor Ort nutzen könnten, wenn sie dort eines Tages eine Basis aufbauen werden.

Viele vor 1969 geborene Menschen bekennen sich heute zur Raumfahrt und zu glühenden Anhängern der Weltraumforschung, weil sie dabei waren: Sie erlebten ihren Apollo-Moment vor dem Fernseher, als Neil Armstrong

und Buzz Aldrin als erste Menschen auf dem Mond aufsetzten. Mir fehlt diese Erfahrung, denn als ich zur Welt kam war die letzte Apollo-Mondlandefähre schon seit einem Jahrzehnt verlassen. Und doch spielte das Weltall und der Mond für mich immer eine große Rolle, zumindest rückblickend: Die Zahl der Artikel und Radiobeiträge, die ich zum Mond verfasst habe, ist seit Jahren zunehmend und kulminierte für mich jetzt, zum 50. Jubiläum der ersten Mondlandung. Und es könnte genau so weiter gehen: Raumfahrtagenturen planen derzeit eine Raumstation in einer lunaren Umlaufbahn zu bauen; die US-Politik hat kürzlich angekündigt, der nächste Mensch auf dem Mond werde eine Frau sein und noch 2024 dort landen. Und junge Astronauten wie der 2015 von der ESA nominierte Matthias Maurer sprechen davon, sie könnten in einigen Jahren vielleicht mit den Chinesen zum Mond fliegen. Der Mond dürfte weiter spannend bleiben.

Die in diesem Buch zusammengetragenen Texte sind ein Abriss der aktuellen Entwicklung, deren Inhalt den Wissensstand zum Zeitpunkt der jeweiligen Veröffentlichung darstellt. Ich wage, damit einen Überblick über verschiedene Wellen der menschlichen Mondsucht zu geben: von den ersten Spekulationen auf der Basis astronomischer Beobachtungen, über Armstrongs vermeintlich „riesigen Schritt für die Menschheit“ und das aufdämmernde Wissen über die ungemütliche Vergangenheit des Trabanten und aller Planeten bis zum gegenwärtigen Mondhype, dessen Endpunkt sich derzeit nur erahnen lässt: Denn ob Menschen wieder auf dem Mond landen, aus welchen Ländern sie kommen, ob sie friedlich zusammenarbeiten oder sich aus ideologischen Gründen vornehm ignorieren werden, all das ist derzeit noch nicht abzusehen. Zuletzt wagt auch ein Beitrag einen gar nicht so spekulativen Blick in Regionen fernab unseres Planetensystems. Denn anderswo könnte sich Leben auch auf Monden selbst entwickelt haben.

Ich wünsche Ihnen, dass Sie mit diesem Buch vom Mond in den Bann ziehen lassen.

Tübingen  
20. Juli 2019

Karl Urban

# Inhaltsverzeichnis

## **Teil I Mondsüchtig: Luna im Teleskop**

<b>Das Bild des Mondes</b>	3
<i>Peter Janle</i>	
<b>Ein lunares Luftschloss</b>	15
<i>Martin J. Neumann</i>	
<b>Aristarch und die Kobra</b>	19
<i>Klaus-Peter Schröder</i>	
<b>Das Supermond-Phänomen</b>	25
<i>Uwe Reichert</i>	
<b>Lichtblitze auf dem Mond</b>	31
<i>Bernd Gährken</i>	
<b>Was erzeugte die Schrammen um das Mare Imbrium?</b>	41
<i>Tilman Althaus</i>	
<b>Dem Mond unter die Haut geblickt</b>	45
<i>Emily Lakdawalla</i>	
<b>Das heiße Herz des alten Mondes</b>	61
<i>Tilman Althaus</i>	

<b>Erdmond und Vesta durchlebten ähnliche Geschichte</b>	65
<i>Tilman Althaus</i>	
<b>Astronomen ziehen mondwärts</b>	69
<i>Karl Urban</i>	
<b>Extrasolare Monde – schöne neue Welten?</b>	75
<i>René Heller</i>	
<b>Teil II Mondfahrten, früher und heute</b>	
<b>Ein Zeitzeuge erinnert sich</b>	99
<i>Harro Zimmer</i>	
<b>Die ersten Worte auf dem Mond</b>	117
<i>Eugen Reichl</i>	
<b>Was uns die Mondsteine verraten haben</b>	123
<i>Herbert Palme</i>	
<b>Apokalypse light</b>	141
<i>Karl Urban</i>	
<b>Mensch, zum Mond! – Was von Apollo bleibt</b>	147
<i>Karl Urban</i>	
<b>Trump: zu neuen Welten (for national security)</b>	161
<i>Karl Urban</i>	
<b>Guter Mond – oder wer baut da oben das Dorf?</b>	167
<i>Karl Urban</i>	
<b>Chang’e 4: Geologisches Neuland auf dem Mond</b>	179
<i>Karl Urban</i>	
<b>Lunar Gateway: Nächster großer Schritt in den Treibsand?</b>	185
<i>Karl Urban</i>	
<b>Missionsziel</b>	191
<i>Eugen Reichl</i>	

# Teil I

**Mondsüchtig: Luna im Teleskop**



# Das Bild des Mondes

## Vom Altertum bis zum Beginn der Weltraumfahrt

Peter Janle

*Der Mond ist zweifellos der uns vertrauteste Himmelskörper. Unsere Kenntnis von ihm hat sich im Laufe der Jahrtausende entwickelt und manche der Fragen, auf die wir erst heute eine Antwort finden, wurden von den Menschen schon immer gestellt.*

Das Ende eines Jahrhunderts, oder, in noch größerem Maße, eines Jahrtausends bietet immer Anlaß, eine Bilanz über eine Thematik zu ziehen. Dieses gilt auch, und ist überaus lohnend, für unsere Kenntnis vom Mond. Die in Sterne und Weltraum vorgestellten Artikel über die detaillierten und spannenden Ergebnisse, die uns die Weltraummissionen gebracht haben, sollen nicht vergessen lassen, daß der Mensch sich schon im Altertum mit dem Mond befaßt hat, und daß unsere Vorfahren mit Teleskopbeobachtungen wichtige Grundlagen über die Formen und die Natur seiner Oberfläche gewonnen haben. Wegen der gebundenen Rotation des Mondes war die Enthüllung der Rückseite jedoch erst mit der Weltraumfahrt möglich. Leider können hier nur wenige Aspekte angesprochen werden. Eine neuere umfassende Darstellung im deutschen Sprachraum ist mir nicht bekannt. Es sei hierfür auf ein älteres Buch von Günther (1911) verwiesen. Der Nagel-Verlag (1970) hat in seiner Reihe „Enzyklopädie-Reiseführer“ einen Band mit zahlreichen historischen Karten des Mondes und Abbildungen zur Astronomiegeschichte herausgebracht.

---

P. Janle (✉)

Geophysiker und Planetenforscher, Christian Albrechts Universität Kiel,  
Kiel, Deutschland

## Der Mond im Altertum bis zur Erfindung des Fernrohrs Anfang des 17. Jahrhunderts

Durch seine Prägnanz am Himmel erscheint der Mond oft greifbar nahe; bis zum Beginn der Weltraumfahrt war er jedoch für den Menschen unerreichbar. Seine Veränderlichkeit regte zu Mythen und Märchen an. Seine gute Beobachtbarkeit und seine Veränderlichkeit waren die Grundlage für einen sehr praktischen Nutzen der Menschen schon im frühen Altertum, vielleicht sogar schon in der Steinzeit: die Aufstellung eines Mondkalenders, der heute noch in islamischen Ländern im Gebrauch ist.

Den Beginn der Selenologie könnte man Thales von Milet zuschreiben. Er sagte eine Sonnenfinsternis für den 28. Mai 585 v. Chr. voraus und erklärte sie auch richtig mit der Bahnposition des Mondes zwischen Erde und Sonne. Seine Grundlage bildeten wahrscheinlich genaue Bahnbeobachtungen der Chaldäer. Diese entdeckten den Saroszyklus. Das ist die Rückwärtsbewegung der Mondknoten, d. h. nach 18 Jahren und  $11\frac{1}{3}$  Tagen hat der Mond wieder die gleiche Stellung zur Sonne, Erde und Knotenlinie, so daß sich Sonnen- und Mondfinsternisse im gleichen Zyklus wiederholen. Aristoteles (384–322 v. Chr.) leitete die Kugelform des Mondes aus Sonnenfinsternissen und wechselnden Mondphasen ab. Durch den hohen Stand der Geometrie gelang es erstmals Aristarch von Samos (320–250 v. Chr.) die Erde-Mond-Distanz mit 56 Erdradien zu bestimmen; der Fehler zum wahren Wert beträgt nur 7 %. Es sei hier daran erinnert, daß Aristarch erstmals das heliozentrische System postulierte. Einer der größten Geometer des Altertums war Hipparch von Nizäa (um 190–120 v. Chr.). Er bestimmte die Erde-Mond-Distanz fast genau mit 59 Erdradien (genau: 60,4) und den Mondradius mit 0,33 Erdradien (genau: 0,27). Er entdeckte weiterhin die Exzentrizität des Mondumlaufs und die Inklination der Mondbahn von  $5^\circ$  gegenüber der Bahn der Erde um die Sonne. Poseidonius von Apameia (um 135- um 50 v. Chr.) führte die Meereszeiten auf die Einwirkung des Mondes zurück. Abgesehen von der Entwicklung von Beobachtungsinstrumenten und hervorragenden Beobachtungen (u. a. Sternkataloge) im arabischen Kulturkreis gab es im ausgehenden Altertum und im Mittelalter keine entscheidenden Fortschritte in der Astronomie. Erst die Renaissance im 14. und 15. Jahrhundert löste sich von der mittelalterlichen Scholastik und führte zu einem kritischen Denken mit Beobachtungen und Experimenten. Ein entscheidender Wendepunkt für das allgemeine Weltbild war hier die (Wieder-)Einführung des heliozentrischen oder kopernikanischen Systems durch Nikolaus

Copernicus (1473–1543). Neben der zentralen Stellung der Erde im alten geozentrischen oder ptolemäischen System war ein wichtiger Unterschied zum heliozentrischen System die Göttlichkeit der Himmelskörper und der Umlaufbahnen oder Himmelsphären. Sie bestanden nicht aus irdischem Material (Feuer, Wasser, Luft und Erde nach Leukipp und Aristoteles) sondern aus quinta essentia, der fünften Essenz. Hier spielte der Mond eine kleine, aber wichtige Rolle, um dieses Bild zu erschüttern, wie es im nächsten Abschnitt geschildert wird.

Die erste kartographische Darstellung des Mondes wurde um 1600 noch vor der Erfindung des Fernrohrs von dem Engländer William Gilbert angefertigt und in seinem Buch „De Mundo Nostro Sublunari etc.“ präsentiert. Man erkennt recht gut die Verteilung der dunklen Marebecken und hellen Hochländer auf der Oberfläche. Gilbert war der Leibarzt der englischen Königin Elizabeth I. Er beschrieb erstmals im Jahre 1600 wissenschaftlich das Magnetfeld der Erde als Dipol („De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure“). Gilberts und die weiteren ersten frühen Mondkarten sind mit Norden nach oben ausgerichtet. Spätere Mondkarten sind zum Teil gemäß den bildumkehrenden Linsensystemen mit Süden nach oben orientiert.

## Erkundung des Mondes mit Teleskopen

Der nächste entscheidende Schritt für die Astronomie wurde mit der Erfindung des Fernrohrs durch den holländischen Brillenschleifer Jan Laprey im Jahre 1608 gemacht. Während es bis dahin nur vage Vermutungen über die Helligkeitskontraste der Mondoberfläche gab und die Planeten nur als helle Punkte bekannt waren, konnte man mit dem Fernrohr Informationen über die Oberflächen der planetaren Körper gewinnen. 1609 baute Galileo Galilei sein erstes Fernrohr, und er publizierte 1610 seine erste kartographische Darstellung der Mondoberfläche im Sidereus Nuntius. Diese Darstellung war schon so genau, daß wir heute den Strukturen auf der Karte leicht die größeren Mondformationen zuordnen können. Auffällig sind, wie auch auf den nachfolgenden Karten, die großen Krater. Galilei interpretierte die Strukturen auch als Berge und Täler und in diesem Sinne als erdähnlich. Damit holte er den Mond aus dem Bereich der Himmelsphären. Diese Sichtweise untergrub das ptolemäische zugunsten des kopernikanischen Systems (s. o.). Seine weiteren Beobachtungen zur Stützung des heliozentrischen Systems waren die Beobachtung von Sonnenflecken, des Jupiters mit seinen Monden als Miniatursonnensystem, und der Phasen der

Venus. Er verstieß mit seinen Beobachtungen gegen das kirchliche Dogma, das das geozentrische System stützte, und bekam damit seine bekannten Probleme mit der Inquisition.

## Die Karten werden immer genauer

Mit der rasanten Entwicklung der Teleskope gab es immer bessere kartographische Darstellungen der Mondoberfläche. Einige der besten Autoren von frühen Karten der gesamten Mondvorderseite seien hier genannt: Michael van Langren (Langrenus), Antwerpen 1645; Johann Höwelcke (Hevelius), Danzig 1647; Francesco Maria Grimaldi, Bologna 1651; Gian Domenico Cassini, Paris 1680; Tobias Mayer um 1750; Wilhelm Beer und Johann Heinrich Mädler, Berlin 1834, 1837. Stellvertretend sei hier in die Mondkarte von Hevelius aus dem Jahre 1647 erwähnt. Das Phänomen der Libration, die Galilei schon erkannte, ist in der Karte berücksichtigt. Hevelius war Ratsherr der Stadt Danzig und Privatastronom. Er baute sich aus Eigenmitteln eine Sternwarte und konstruierte riesige sogenannte Luftfernrohre mit bis zu 45 m Brennweite. 1647 veröffentlichte er „Selenographia sive Lunae Descriptio etc.“, das erste wissenschaftlich fundierte Werk der Selenographie.

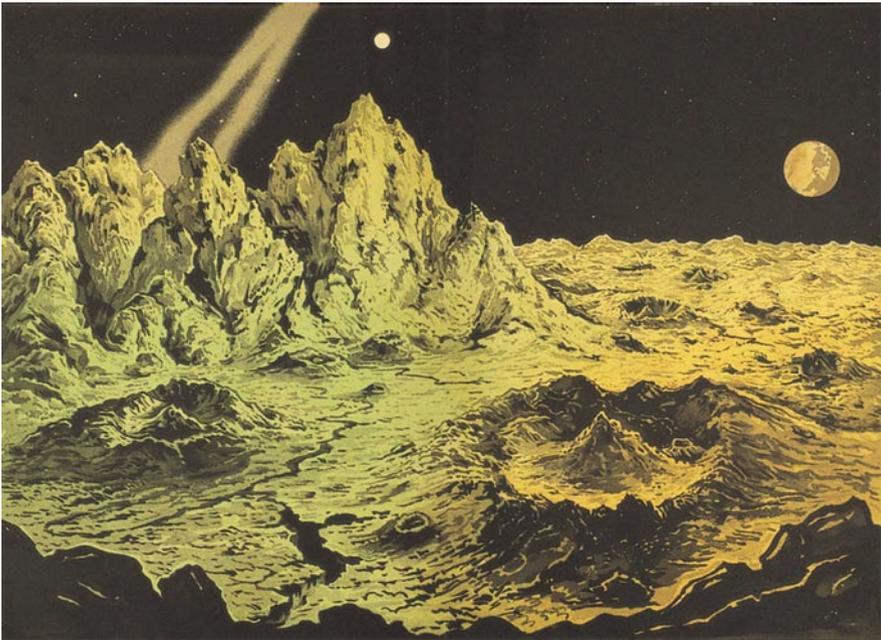
Giovanni Battista Riccioli führte in seinem „Almagestum Novum Astronomiam Veterem etc.“, Bologna 1651, die im wesentlichen bis heute geltende Nomenklatur für die Mondoberfläche ein. Frühe Beobachter hielten die dunklen, strukturlosen Ebenen für Meere; daher rührt die Bezeichnung Mare (Plural: Maria). Die hellen Hochländer wurden Terrae (Singular: Terra) genannt. Ende des 17. Jahrhunderts schloß Christian Huygens aus der Abwesenheit von Flüssen und Wolken auf das Fehlen von Wasser. Weiterhin hatte er beobachtet, daß Sterne, die sich dem Mondrand nähern, ohne Abschwächung hinter dem Mond verschwinden. Er schloß daraus richtig auf die Abwesenheit einer Atmosphäre.

Anfang des 19. Jahrhunderts gestattete das Auflösungsvermögen der Teleskope die Anfertigung von mehrblättrigen Kartenwerken des Mondes. Hier wird als Beispiel die Sektion IV des 25blättrigen Werkes von Wilhelm Gottlieb Lohrmann vorgestellt (Ahnert 1963). Das Blatt umfaßt die Apenninen und das Randgebirge des Mare Imbrium. Lohrmann zeichnete seine Karten von 1824 bis 1836. Das Gesamtwerk wurde 1878 von J. F. Julius Schmidt mit punktuellen Höhenangaben neu herausgegeben. Man beachte die Landestelle von Apollo 15 bei Mons Hadley westlich der Palus putredinis, etwa 26° Nord und 40° West (Ost in modernen Karten).

Das gleiche Gebiet wird in einer Reliefdarstellung von Nasmyth und Carpenter (1906) gezeigt. Die Darstellung der Mondoberfläche dieser beiden britischen Autoren vom Ende des 19. Jahrhunderts fand in der Literatur eine weite Verbreitung. Man beachte die erfaßten Rillensysteme, die bei Lohrmann nur schwach angedeutet sind.

Die Landschaft in Abb. 1 zeigt, wie man sich Ende des 19. Jahrhunderts den Blick vom Mond auf die Erde vorgestellt hat. Heute wissen wir, daß der Mond keine steilen Gebirge besitzt; die Topographie zeigt nur recht sanfte Undulationen.

Die vergangenen 150 Jahre haben den hohen Wert der Photographie in der Astronomie und auch bei der Erkundung des Mondes erwiesen. Schon bald nach der Erfindung der Photographie 1826/1827 durch den Franzosen Joseph Nicephore Niepce gelang J.W. Draper am 23. März 1840 die erste Mondphotographie.



**Abb. 1** Vorstellung des Blicks vom Mond auf die Erde Ende des 19. Jahrhunderts. (Aus Weiß 1888)

## Die Mondkartographie ist nicht einfach

Zwei Probleme einer genaueren Mondkartographie sollen jetzt angesprochen werden. Zum einen ist es wichtig, die Strukturen möglichst genau relativ zu einem Gradnetz des Mondes in die Karten einzutragen. Das geschah zunächst visuell mit einigen Hilfsmitteln. Hier leistete die Photographie eine entscheidende Hilfe, da man jetzt die Lage der Strukturen auf der Photoplatte genau ausmessen konnte. Das andere Problem war die dritte räumliche Dimension bzw. die Höhenverteilung. Es wurde schon oben erwähnt, daß Schmidt in die Lohrmannschen Karten Höhenpunkte eintrug. Eine grundlegende Methode zur Vermessung von Höhen auf dem Mond hatte schon Galilei vorgeschlagen. Aus geometrischen Überlegungen, bei Kenntnis des Durchmessers bzw. Umfangs des Mondes, kann man aus dem Schattenwurf von topographischen Erhebungen und der Beleuchtung von hohen Punkten jenseits des Terminators bei Sonnenaufgang lokale Höhen rekonstruieren. Ende des 19. Jahrhunderts gestattete die Photographie eine weitere, sehr effektive Methode zur Höhenbestimmung. Die Aufnahme von zwei Bildern zu verschiedenen Zeiten mit *nahezu* gleicher Phase gestattet die stereographische Höhenbestimmung. Dieses Prinzip der Stereophotographie wird heute noch von Satelliten aus angewendet. Die Breslauer Astronomen J.H. Franz und C. von Mainka hatten mit dieser Methode erstmals 1890 und 1891 zwei Platten des Lick-Observatoriums ausgewertet. Das Ergebnis ihrer Arbeiten mündete 1899 in die erste globale Höhenschichtkarte der Mondvorderseite. Sie ist zwar noch sehr grob, aber damit wurde erstmals quantitativ die Beckennatur der Maregebiete nachgewiesen. Man vergleiche diese Karte mit der neuesten globalen topographischen Karte des Mondes, die auf Clementine-Daten basiert (Beitrag Janle zum Aufbau des Mondes, Heft 10/99).

## Woher stammen die Mondkrater?

Es sei in diesem Zusammenhang eine weitere interessante Bemerkung aus der Geschichte der Mondforschung gestattet. Wegener (1921) erwähnt, daß Franz die Anordnung der großen Maria als Gürtel bezeichnet hat, der gegenüber dem jetzigen Äquator um  $21^\circ$  geneigt ist und vielleicht als frühere Äquatorialzone anzusprechen ist. Der englische Geophysiker und Planetologe Keith Runcorn hat ebenfalls aus dieser Anordnung der Maria und dem Auftreten von magnetischen Anomalien auf der Mondoberfläche auf eine

Polwanderung geschlossen (Runcorn 1988). Diese Hypothese ist jedoch sehr umstritten. Der Autor gibt in seinem dritten Beitrag dieser Artikelserie (Heft 11/99) einen Überblick über die Interpretation der neuen Daten des Mondmagnetfeldes, die mit den Apollo-Missionen und Lunar Prospector gewonnen wurden.

Obwohl schon in den ersten Kartenskizzen von Galilei Mondkrater zu erkennen sind, wurde der Ursprung dieser Strukturen zunächst ausgespart. Erste Spekulationen über den Ursprung der Krater veröffentlichte der Engländer Robert Hooke in seinem Buch „Micrographia“ im Jahre 1665. Er schlug schon die beiden Hypothesen vor, die später am eingehendsten diskutiert wurden: die Vulkanhypothese und die meteoritische Aufsturz- oder Impakthypothese. Hooke bevorzugte die Vulkanhypothese, da er den interplanetaren Raum für leer hielt. Nach unserem heutigen Erkenntnisstand war diese Annahme falsch. Die Vulkanhypothese wurde begründet mit der morphologischen Ähnlichkeit der Mondkrater mit vulkanischen Strukturen auf der Erde. Verfechter dieser Hypothese waren u. a. Immanuel Kant, Wilhelm Herschel, Alexander von Humboldt, Leopold von Buch, Eduard Suess sowie J. Nasmyth und J. Carpenter.

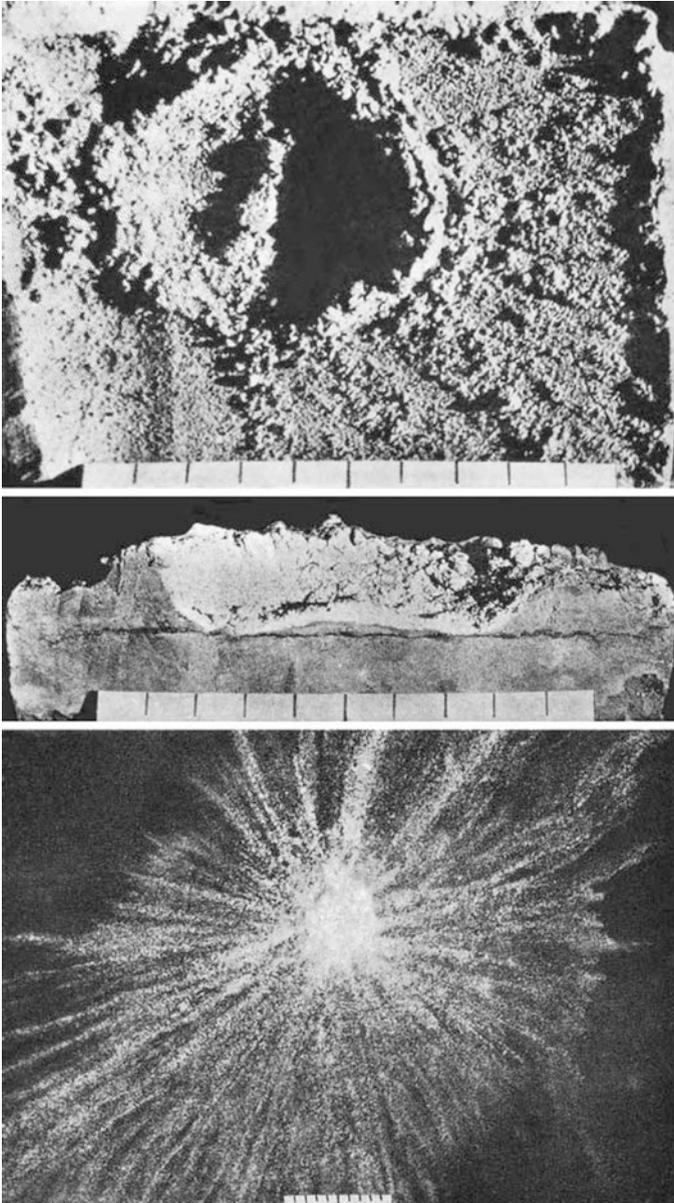
Eine frühe grundlegende Diskussion der verschiedenen Ursprungshypothesen der Mondkrater gibt der Geophysiker und Meteorologe Alfred Wegener (1921). Er setzt sich neben den beiden schon erwähnten Hypothesen auch mit der Blasenhypothese und der Gezeitenhypothese auseinander, die aber hier nicht weiter verfolgt werden sollen. Alfred Wegener hatte mehrere Einwände gegen die vulkanische Deutung. Er erkannte von der Morphologie her, daß in der Regel bei Impaktkratern der Kraterboden unterhalb des Umgebungsniveaus liegt, während die Vulkankraterböden über dem Umgebungsniveau liegen. Weiterhin erkannte er, daß die Vulkane der Erde an tektonische Bewegungslinien gebunden sind, während Impaktkrater wie auf dem Mond statistisch verteilt sind. Letztere Bemerkung muß in Zusammenhang mit seinem großartigen Konzept der Kontinentaldrift gesehen werden, das sich jedoch erst nach 1960 durchsetzte.

Alfred Wegener war ein entschiedener Verfechter der Aufsturzhypothese. Er diskutiert ausführlich die Entwicklung dieser Hypothese, wobei seine Recherchen bis zum Münchener Astronomen Gruithuisen 1828 zurückreichen. Die frühen Befürworter der Aufsturzhypothese stützten sich vor allem auf Aufsturzexperimente. Interessant sind hier die Experimente des Geheimen Bergrats Althans, der Artillerieeinschüsse in Panzerplatten mit den Mondkratern verglich. Dies ist eine erste Annäherung an die Hochgeschwindigkeitsbedingungen bei Impakten. Zwischen 1892 und 1894

publizierte der amerikanische Geologe G. K. Gilbert eine umfassende Studie zur Aufsturzhypothese (Gilbert 1892–1894). Wegener selbst führte zahlreiche Impaktexperimente durch, wobei er Zementpulver sowohl als Grundmasse als auch als aufstürzende Masse benutzte (Wegener 1920, 1921). Er konnte damit zahlreiche morphologische Phänomene der Mondkrater simulieren, wie den Ringwall, Zentralberge, die Auswurfdecke und das helle Strahlensystem junger Krater (Abb. 2). Sein Verdienst ist es auch, den Impaktursprung der großen Marebecken begründet zu haben. Er spricht in seiner Schrift von 1921 schon die wichtigsten Probleme der modernen Impaktkraterforschung an.

Diese Impaktexperimente haben jedoch ein Problem, das dazu führte, daß eine Entscheidung zwischen beiden Hypothesen erst möglich wurde, als Mondgesteine zur Erde gebracht wurden. Es gibt nämlich zahlreiche irdische vulkanische Explosionskrater, die nur durch eine oder wenige heftige Explosionen erzeugt wurden, mit Kraterböden, die unterhalb des Umgebungsniveaus liegen. Dazu gehören die Maare (nicht zu verwechseln mit Mare auf dem Mond), z. B. in der Eifel, aber auch einige größere Explosionskrater wie der Ngorongoro im Ostafrikanischen Graben, Tansania, mit 22 km Durchmesser. Es gibt auf dem Mond und auch auf anderen planetaren Körpern Kraterketten im Zusammenhang mit tektonischen Linien, die wahrscheinlich vulkanische Explosionstrichter sind, wie z. B. in der Hyginusrille. Die Entscheidung für den Impaktursprung fiel in zwei Schritten.

Schon vor der ersten Mondlandung fanden die amerikanischen Geologen E.M. Shoemaker und E. C.T. Chao 1960/1962 Coesit und Stishovitt, Hochdruckmodifikationen des Quarz, im Nördlinger Ries. Diese Hochdruckmineralien können vulkanisch nicht erzeugt werden. Damit war der Impaktursprung für das Ries und ähnliche Krater auf der Erde akzeptiert, und indirekt auch der Impaktursprung für die Mondkrater. Der endgültige Beweis für den Impaktursprung der Mondkrater wurde dann durch die Entdeckung von Hochdruckmineralien in den Mondproben erbracht. Es gab allerdings noch einige wenige Wissenschaftler, wie den Amerikaner John A. O'Keefe, die nach den Mondlandungen auch weiterhin für den vulkanischen Ursprung von einigen größeren Mondkratern plädierten. Heute ist jedoch allgemein akzeptiert, daß ein vulkanischer Ursprung nur bei wenigen kleinen Kratern eine Rolle gespielt hat. Zu bemerken ist vielleicht noch, daß O'Keefe wie viele andere Autoren vor ihm forderte, daß die glasartigen Tektite vom Mond stammen. Auch hierbei ist heute allgemeine Ansicht, daß die Tektite durch bei größeren Meteoriteneinschlägen auf die Erde aufgeschmolzenes und



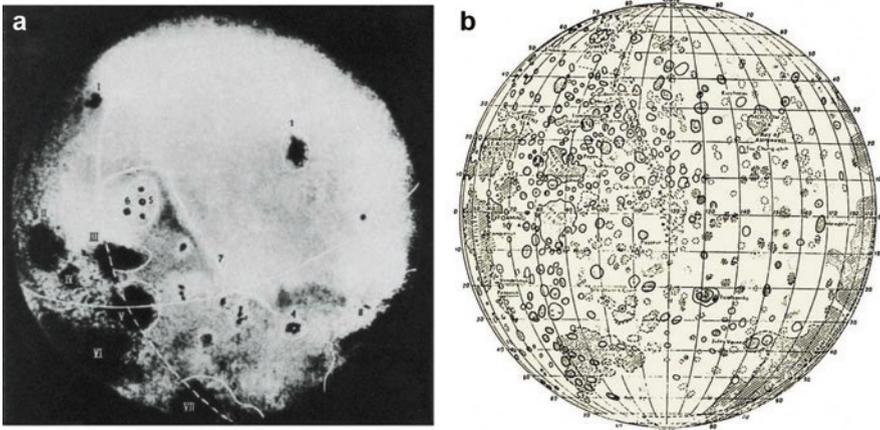
**Abb. 2** Simulation von Impaktkratern von Alfred Wegener aus den Jahren 1919/1920. Bei den Experimenten wurden Ringwalle, zentrale Erhebungen und Strahlensysteme erzeugt. (Aus Wegener 1920)

herausgeschleudertes Erdkrustenmaterial entstanden sind (z. B. die Moldavite vom Nördlinger Ries). Der neuseeländische Planetologe S. R. Taylor erklärte 1975: „Der lunare Ursprung der Tektite ... starb am 20. Juli 1966. Die Diagnose der Todesursache war eine Überdosis von Monddaten.“

Es wurde oben schon angesprochen, daß sich Wegeners Konzept der Kontinentaldrift sehr spät im Rahmen der modernen Plattentektonik durchgesetzt hat. Zu seiner Zeit konnte man sich die in geologischen Zeiträumen hohe Mobilität der Erdkruste nicht vorstellen. Man hatte keine Erklärung für die verursachenden Kräfte. Bis etwa zur Mitte des 20. Jahrhunderts dominierte ein fixistisches Weltbild bezüglich der Lage der Kontinente und Ozeane. Mit dem schottischen Geologen Charles Lyell hatte sich im 19. Jahrhundert eine gradualistische Vorstellung von den geologischen Gestaltungsvorgängen für die Erdkruste durchgesetzt, d. h. alle Änderungen verlaufen sehr langsam. Da hatten katastrophale Gestaltungsmechanismen wie Meteoriteneinschläge auf der Erde und also auch auf dem Mond keinen Platz. Aus der Diskussion des Ursprungs der Mondkrater und ähnlicher Krater auf der Erde geht hervor, daß hier Alfred Wegener wegweisend war. Allerdings muß erwähnt werden, daß er zögerte, den Impaktursprung auf irdische Krater zu übertragen. Die Abneigung gegen Katastrophen in der Erdgeschichte führte auch dazu, daß der Impaktursprung für die Chicxulub-Struktur in Yucatan mit 180–300 km Durchmesser in den achtziger Jahren kontrovers diskutiert wurde. Untersuchungen von großen Impaktkratern auf dem Mond und anderen Planeten zusammen mit neuen Felddaten der Chicxulub-Struktur haben aber zur allgemeinen Akzeptanz des Impaktursprungs geführt. Diese Katastrophe wird für das Artensterben an der Kreide/Tertiärgrenze vor 65 Mio. Jahren verantwortlich gemacht. Dieser Punkt wird aber bis heute noch kontrovers diskutiert.

## **Ausblick auf die Weltraumerkundung des Mondes**

Die ersten Erfolge bei der Weltraumerkundung des Mondes gelangen der Sowjetunion. 1959 umrundete Luna 3 zum ersten Mal erfolgreich den Mond und gestattete der Menschheit den ersten Blick auf die Mondrückseite. Abb. 3 zeigt das noch etwas schemenhafte Bild der Mondrückseite zusammen mit der ersten resultierenden Kartographie. Man vergleiche dieses Bild mit modernen Darstellungen im zweiten Beitrag von Janle. 1964 und 1965 lieferten die amerikanischen Ranger-Sonden erste hochauflösende



**Abb. 3** a) Erste Aufnahme der Mondrückseite von der sowjetischen Sonde Luna 3 aus dem Jahre 1959. b) zeigt die kartographische Auswertung der Bilder der Mission. Formationen auf der Rückseite: 1) Mare Moscoviense, 2) Golf der Kosmonauten, 3) Fortsetzung von Mare Australe, 4) Krater Tsiolkovsky, 5) Krater Lomonosov, 6) Krater Joliot-Curie, 7) Sowjetgebirge, 8) Meer der Träume. Formationen auf der Vorderseite: I. Mare Humboldt, II. Mare Crisium, III. Mare Marginis, IV. Mare Undarum, V. Mare Smythii, VI. Mare Fecunditatis, VII. Mare Australe. (Aus: Greeley und Batson, 1990).

Bilder im Sturzflug auf die Mondoberfläche aus den Gebieten Mare Nubium, Mare Tranquillitatis und Krater Alphonsus; die Missionen endeten jedoch planmäßig mit einer harten Landung. 1966 gelang der Sowjetunion mit Luna 9 die erste weiche Landung auf dem Mond in Oceanus Procellarum. Elf Fernsehbilder wurden gesendet. Das erste Bild, das von der Mondoberfläche aus aufgenommen wurde, wurde jedoch nicht von der sowjetischen Weltraumagentur veröffentlicht, sondern von britischen Radioastronomen. Diese haben mit dem Radioteleskop von Jodrell Bank die Signale von Luna 9 empfangen und das erste Bild, wenn auch etwas verzerrt, an die Presse weitergegeben. Man könnte dieses Vorgehen als Datenpiraterie in der Weltraumfahrt bezeichnen. Dieses ist jedoch das einzige mir bekannte Beispiel; es wird heute mit einem gewissen Schmunzeln betrachtet und muß im Rahmen der damals herrschenden Begeisterung für die Weltraumfahrt gesehen werden. Wenig später folgte das entsprechende von den Sowjets veröffentlichte Bild. Beide Bilder zeigen am oberen Bildrand einen markanten Impaktkrater. Der im Vordergrund liegende Stein mit dem langen Schlagschatten hat eine Höhe von 15 cm. Typisch ist die makroskopisch rauhe Struktur der Oberfläche, die auch durch teleskopische photometrische Verfahren bestimmt wurde und als „fairy castle“-Struktur beschrieben wurde. Die folgenden unbemannten Landesonden der Sowjetunion (u. a. Luna-Serie) und der USA