

# Planetenumgebungen Teil 2: Der Mond

von Garry Toth und Don Hillger (Un-manned Satellite Philately)

Übersetzung mit freundlicher Genehmigung der Autoren durch Frank Kunze

Dies ist der zweite Artikel in der Astrofax-Reihe über die Planetenumgebungen. Die erste Folge erschien im Astrofax Sommer 2023 (Band 31, Ausgabe 2). Teile dieses Artikels dienen auch als Hintergrundmaterial für spätere Artikel dieser Serie. Der Mond befindet sich astronomisch gesehen sehr nah an der Erde. Die Menschen haben ihn Jahrtausende lang mit bloßem Auge beobachtet und er ist zu einer kulturellen Ikone geworden. In der chinesischen Mythologie zum Beispiel ist Chang'e beispielsweise die schöne Göttin des Mondes, gefeiert in Kunst und Literatur sowie auf Mondfesten. In Gemälden wird sie oft auf dem Weg zum Mond gezeigt (Abb. 1). Chinas jüngste Mondmissionen erhielten den Namen Chang'e. Westliche Kulturen haben „den Mann im Mond“ und „die Kuh, die über den Mond sprang“ (Abb. 2).



Abb. 1: VR China, 1987, Mi.-Nr. 2140



Abb. 2: Großbritannien, FDC, Mi.-Nr. aus MH 96

Wer kann das ikonische Bild des Manns im Mond vergessen, welcher mit einem Weltraum-Fahrzeug in einem Auge steckengeblieben war (Abb. 3). Es stammt aus dem Kurzfilm von 1902 „Le Voyage



Abb. 3: Monaco, 2002, Mi.-Nr. 2619

„dans la Lune“ des wegweisenden französischen Filmemachers Georges Méliès. Der Film orientiert sich an Mondflügen aus utopischen Romanen von Jules Verne und H. G. Wells. Dieser Artikel wird sich allerdings auf den Mond als wissenschaftliches Objekt konzentrieren und nicht auf dessen kulturellen Einfluss.

Die Geschichte beginnt mit Thomas Harriot, einem Engländer, der den Mond mit einem frühen Teleskop beobachtete und im Juli 1609 die ersten bekannten Zeichnungen der Mondoberfläche anfertigte (Abb. 4). Galileo Galilei baute sein eigenes Teleskop und begann Ende 1609 es zu benutzen. Er beobachtete den Mond, die Venus, den Jupiter, aber hauptsächlich den Mond, Sonnenflecken und verschiedene Sterne und gilt somit als „Vater“ der modernen Astronomie. Er veröffentlichte einige seiner Ergebnisse im Jahr 1610 in einem Bericht mit dem Titel „Sidereus Nuncius“ (Sternenbote). Dieser enthielt einige seiner Zeichnungen der Mondoberfläche, so wie er sie vorgefunden hat - eher robust als flach. Eine von seinen Zeichnungen (von Seite 16)



Abb. 4: Guinea, 2009, Mi.-Nr. 6519 A

ist auf der Briefmarke in Abb. 5 wiedergegeben. Darauf sind die dunkle und die helle Hälfte durch eine Grenze getrennt, die in der unteren Bildmitte einen großen Krater (möglicherweise Tycho?) kreuzt. Von besonderem Interesse sind die dunkleren Flecken im sonnenbeschienenen Bereich oben rechts im Bild. Galilei beschreibt sie auf den Sei-



Abb. 5: Guinea-Bissau, 2009, Mi.-Nr. 4445A



ten 19-20 im „Sidereus Nuncius“: „Nun sieht man die großen Flecken des Mondes“ als „gleichmäßig und einheitlich ... so dass, wenn jemand die alte Meinung der Pythagoräer wiederbeleben möchte, dass der Mond sozusagen eine andere Erde ist, er den helleren Teil der Oberfläche sehr gut als Festland und die dunkleren Gebiete als Wasserfläche interpretieren könnte.“ Mit anderen Worten, Galileo sieht die Möglichkeit der Existenz von Wasser in diesen Gebieten. Seine Beobachtungen brachten ihn auch zum Staunen (Seite 26), wenn „es um den Körper des Mondes, genau wie um die Erde, eine Hülle von etwas gibt, eine Substanz, die dichter als der Rest des Äthers ist und ausreicht, um Sonnenstrahlen zu empfangen und zu reflektieren, aber nicht so undurchsichtig, dass sie unsere Blick hindurch verhindern könnte.“ Dies waren seine Spekulationen über die Möglichkeit einer Mondatmosphäre.



Abb. 6: Ajman, 1970, Mi.-Nr. 604

Eine Mondkarte, die 1645 vom niederländischen Astronomen Michael van Langren veröffentlicht wurde bezeichnete die dunklen Bereiche auf dem Mond als Maria („Meere“, der Plural des lateinischen Substantivs mare) und in einem Fall als Ozeanus. Er war wahrscheinlich mit dem „Sidereus Nuncius“ vertraut, so dass seine Verwendung dieser lateinischen Begriffe von Galileis Spekulationen über Wasser auf dem Mond inspiriert gewesen sein könnte. Karten des Mondes waren ebenfalls von Johannes Hevelius (Selenographia, 1647) und Giovanni Riccioli (Almagestum Novum, 1651) veröffentlicht worden. Auch diese Beiden nutzten die mare-Nomenklatur, die uns bis heute erhalten geblieben ist (ebenso wie Oceanus, in Oceanus Procellarum). Wir wissen jetzt, dass die Mare große und dunkle basaltische Mondebenen sind. Eine Briefmarke mit einem modernen Foto des Mondes (Abb. 6) zeigt den starken Kontrast zwischen den dunklen und hellen Bereichen, die Galileo so beeindruckten.

Ein Jahrhundert später argumentierte der kroatische Jesuitenwissenschaftler Rudjer Bošković (Abb. 7) in „De Lunae Atmosphaera“ (1753), dass der Mond höchstens eine extrem dünne Atmosphäre hat, nicht vergleichbar mit dem, was es auf der Erde gibt. Das bedeutet, dass der Oberflächendruck auf dem Mond nahe bei Null sein muss (Druck ist das Gewicht der Atmosphäre über einem gegebenen Punkt). Im Jahr 1892 berechnete der amerikanische Astronom William Pickering, dass die Mondoberfläche weniger als  $1/4000$  ( $2,5 \times 10^{-4}$ ) des Erdoberflächendrucks haben muss (aktuelle Schätzungen sind mit Werten um  $3 \times 10^{-15}$  viel kleiner). Dies führte ihn zu dem Schluss, dass Wassereis, eine „flüchtige“ Substanz (eine, die leicht verdampft) auf dem Mond nicht existieren könnte, weil es sich schnell sublimieren (direkt transformieren zu Dampf) würde im nahen Vakuum. Dies war der Konsens für eine lange Zeit. Doch in einem 1961 veröffentlichten Aufsatz zeigt der amerikanische Physiker Kenneth Watson, dass das Eis auf dem Mond weitaus stabiler wäre als mögliche atmosphärische Bestandteile. Er schlug dies vor, obwohl es „verdampfen“ würde, wenn es der Sonneneinstrahlung ausgesetzt sein würde, aber in dauerhaft beschatteten Kratern („Kältefallen“) könnte Mondeis existieren. Wir werden sehen, dass diese Idee sich letztendlich als richtig erwiesen hat.



Abb. 7: Vatikan, 2011, Mi.-Nr. 1720

Für praktische, technische Zwecke (z. B. die Landung eines LEM) kann die Mondatmosphäre als Vakuum betrachtet werden. Das bedeutet jedoch nicht, dass sie nicht grundlegend und bedeutsam für wissenschaftliche Studien ist.

Die Erde hat eine dichte Atmosphäre, eine Flüssigkeit, in der es ständig zu Kollisionen zwischen ihren Atomen und Molekülen kommt. Sie besteht aus mehreren Schichten, symbolisch dargestellt in Abb. 8. Die Briefmarke zeigt einen Wetterballon/Forschungsballon in den beiden untersten

Schichten (die Troposphäre und Stratosphäre, gemeinsam dargestellt als die untere weiße Schicht) und eine Forschungsrakete, die sich durch die unterste Schicht sowie die Mesosphäre (blau) und in die Thermosphäre (lila) bewegt. Die äußerste Schicht, die Exosphäre, ist die obere weiße Schicht. Ihre Basis variiert zwischen etwa 500 und 1000 km. In Abhängigkeit von der Sonnenaktivität verschmilzt sie mit dem Weltraum. In der Exosphäre ist die atmosphärische Dichte so gering, dass man davon ausgehen kann, dass sich ihre Atome und Moleküle ohne Kollisionen bewegen können. Die Atmosphären einiger Planetenkörper, wie zum Beispiel des Mondes und des Merkur sind oberflächengebundene Exosphären. Für diese ist es auch schwierig, messbare Strahlungsmengen zu absorbieren, es fehlt die Zirkulation, wie sie in dichten Atmosphären vorkommt, und sie verlieren ihre Gasbestandteile, die mit erheblicher Geschwindigkeit in den Weltraum abgegeben werden (und diese müssen daher ständig auf irgendeine Weise aufgefüllt werden).



Abb. 8: Kuba, 1965, Mi.-Nr. 1024

Die Temperatur eines Objekts kann in Beziehung gesetzt werden mit der Bewegungsenergie seiner Moleküle. Wärme fließt von Bereichen mit schnelleren Bewegungen („wärmer“) zu Bereichen mit langsamere-

ren Bewegungen („kälter“). Diese Übertragung erfolgt durch Leitung (direkter Kontakt, wie z.B. bei einem Mundthermometer), Konvektion (aufgrund von Flüssigkeitsbewegungen, wie bei einem Thermometer mit darüber strömender Luft) oder Strahlung (Energie, welche durch elektromagnetische Wellen übertragen wird). Ein Thermometer, welches mit diesen Wärmeströmen ins Gleichgewicht kommt, liefert einen Temperaturwert. Ein Lufttemperaturthermometer muss abgeschattet werden – wenn es Sonnenlicht absorbiert, würde dies zu falschen Ablesewerten führen.

Anders sieht es im Weltraum aus. Die Temperatur des Vakuums kann mit 2,73 Kelvin definiert werden, (-270,42 °C), die Temperatur der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung, gemessen von Raumfahrzeugen wie COBE (Cosmic Background Explorer). Normalerweise möchte man die Temperatur eines Objekts im Weltraum messen. Da es keine Flüssigkeit gibt, kann keine Energie über Konvektion übertragen werden, und es ist unpraktisch, wenn nicht gar unmöglich, ein her-



Abb. 9: Costa Rica, 2005, Mi.-Nr. 1613

kömmliches Thermometer in direkten Kontakt mit dem Objekt zu bringen, um eine Temperatur durch Wärmeleitung zu erhalten. Es bleibt die Tatsache, dass jedes Objekt spontan und kontinuierlich elektromagnetische Strahlung aussendet. Im Jahr 1900 entwickelte der Physiker Max Planck (Abb. 9) eine Relation zwischen dieser Strahlung und der Temperatur des Objekts. Diese Temperatur kann daher berechnet werden wenn die Strahlung gemessen wurde (mit einem Instrument namens Radiometer), aber die Details sind sehr komplex. Bei diesem Ansatz wird die Temperatur „aus der Ferne erfasst“. In einem bekannten Beispiel können Instrumente an Bord erdumlaufender Satelliten innerhalb bestimmter Grenzen die Temperaturen der Wolkenoberflächen messen oder aber der Oberfläche, wenn keine Wolken vorhanden sind. Viele andere Typen physikalischer Variablen können auch durch Fernerkundungstechniken gemessen werden.

Die Wärmeübertragungen in einer dichten Atmosphäre dienen dazu, die mögliche Reichweite der Temperaturen zu „glätten“. Im Weltraum ist die Spanne viel größer. Zum Beispiel sind die Infrarot-Instrumente des JWST (James Webb Space Telescope) für den Betrieb bei sehr kalten Tempera-

turen ausgelegt und müssen daher vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt werden. Die heiße Seite des Schildes liegt bei ca. 85 °C, während die schattige Seite bei etwa -233 °C liegt.

Im Weltraumzeitalter entwickelten sich die wissenschaftlichen Erkenntnisse über den Mond rasant. Wikipedia bietet eine Liste der Mondmissionen. Dabei gab es viele frühe Misserfolge. Die sowjetische Raumsonde Luna-2 erreichte am 14. September 1959 als erstes die Mondoberfläche (Absturz). Luna-9 war am 3. Februar 1966 der erste Flugkörper, der sanft auf dem Mond landete. Das amerikanische Raumfahrtprogramm entwickelte sich, nachdem Kennedy die Nation auf den Weg zu bemannten Mondmissionen vorbereitet hatte. Viele amerikanische Raumschiffe der 1960er Jahre waren teilweise oder voll und ganz auf die Unterstützung der bevorstehenden Apollo-Missionen ausgerichtet. Insbesondere mit den Ranger-, Surveyor- und Lunar



Abb. 10: Paraguay, 1966, Mi.-Nr. 1593

Orbiter-Programmen wurden wissenschaftliche Informationen gesammelt und so die Machbarkeit von

Mondlandungen demonstriert. Surveyor-1 (Abb. 10) war die erste amerikanische Raumsonde, die am 02. Juni 1966 sanft auf dem Mond aufsetzte.

Die Apollo-Missionen lieferten viel detailliertere Informationen über den Mond als die automatischen Landungen. Während des kurzen Aufenthaltes von Apollo-11 auf dem Mond setzte Edwin Aldrin das EASEP (Early Apollo Lunar Surface Experiments Package) ein, ein Vorläufer des ALSEP (Apollo Lunar Surface Experiments Package), welches Teil davon nachfolgender Apollo-Missionen (Abb. 11) war. In Abb. 12 sind Aldrin und das EASEP dargestellt. Dazu gehörte das Apollo-11 DTREM (Dust, Thermal and Radiation Engineering Measurement)-Paket.

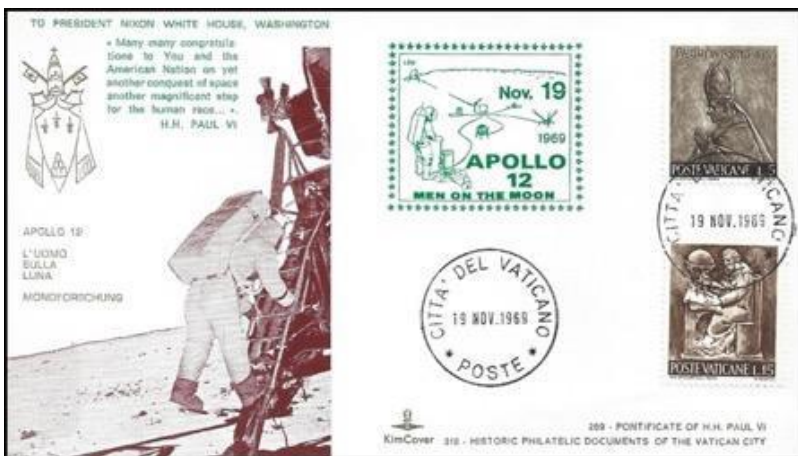


Abb. 11: Apollo 12 Kim Cachet Covers, ALSEP-Einsatz auf dem Mond



Abb. 12: Sierra Leone, 1989, Mi.-Nr. 1237

Das DTREM nutzte ein Radiometer, um die Oberflächentemperatur zu messen und lieferte Werte von -23°C bis +7°C, (<https://archive.org/details/lunarsurfacetemperaturesfromapollo11data>), während Apollo-11 auf der Oberfläche war, und von -53 °C bis auf +67 °C während eines vollständigen Zyklus Montag und Mondnacht gemessen hat.



Abb. 13: Mauritius, 1983, Mi.-N. 782

Aldrin setzte auch das SWCE (Solar Wind Composition Experiment) ein, dessen Ziel es war, den Sonnenwind an einem Ort außerhalb der Erdmagnetosphäre (einer magnetische „Hülle“ um die Erde) zu erfassen. Es war auch Teil der Apollo-12-, 14-, 15- und 16-Wissenschaftspakete. Es handelte sich um ein einfaches Stück Metallfolie, das für die Dauer der Landung dem Sonnenwind ausgesetzt war und dann zur Analyse zur

Erde zurückkehrte. Abb. 13 zeigt Aldrin und das SWCE. Das SWS (Solar Wind Spectrometer) im Einsatz bei Apollo-12 und 15, war ebenfalls für Sonnenwindmessungen entwickelt worden. Das SWS steht in Abb. 14 im Vordergrund (David Scott, in der Mitte der Briefmarke, richtet andere Elemente der Apollo-15 ALSEP ein). SWCE und SWS sind Weltraumwetter-Instrumente, aber auch relevant für Studien der Mondatmosphäre, da diese vom Sonnenwind beeinflusst wird.

Apollo-15, -16 und -17 transportierten ein Paket namens SIM (Scientific Instruments Module). Es enthielt ein Massenspektrometer, mit dem die Mondatmosphäre aus dem umlaufenden Service-Modul heraus untersucht werden sollte.

Das Apollo-17-SIM-Modul enthielt zusätzlich ein ISR (IR Scanning Radiometer) um die Nachttemperaturen und Abkühlungsraten des Mondes zu bestimmen sowie ein Fern-UV-Spektrometer zum Studium der Mondatmosphäre anhand ihrer UV-Emissionen.

Das Apollo-17-ALSEP enthielt ein wichtiges neues Instrument: ein Massenspektrometer - bekannt als LACE (Lunar Atmospheric Composition Experiment). LACE hat die CCG (Cold Cathode Gauge)-Experimente der Apollo-14- und 15-ALSEPs aktualisiert. Sie hatten die Existenz einer dünnen Mondatmosphäre bewiesen und lieferte eine Obergrenze für deren Dichte, konnte aber seine Zusammensetzung nicht messen. All diese wissenschaftlichen Aktivitäten gipfelten in der letzten Apollo-Mondmission und sind im grünen kreisförmigen Teil des Cachet im Zudruck des Apollo-17-Umschlages zusammengefasst (Abb. 15). Studien zur „Mondatmosphäre“ werden im oberen linken Teil dieses Kreises symbolisiert.



Abb. 14: Ajman, 1071, Mi.-Nr. 1268a

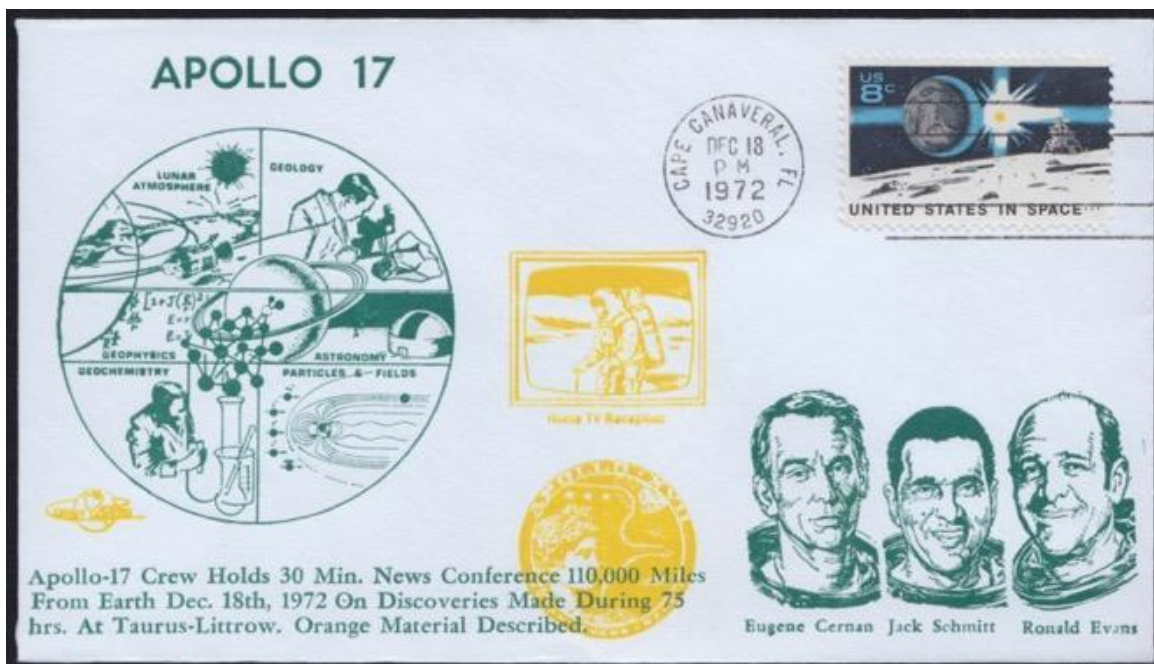


Abb. 15: Apollo-17 Cover, Orbit Cache, News Conference 18.12.1972

Forscher untersuchten die Apollo-Daten und veröffentlichten ihre Ergebnisse in den 1970er Jahren. In Kapitel 17 des vorläufigen wissenschaftlichen Berichts zu Apollo-17 von 1973 wurden die Ergebnisse des LACE erörtert. Andere verwandte Arbeiten widmen sich ausschließlich der Mondatmosphäre. Seine Gesamtmasse ist gering – etwa 25.000 kg. Seine Hauptbestandteile sind Argon, Helium und Neon sowie Spuren vieler anderer Elemente, einschließlich Natrium, Kalium, Wasserstoff; Ammoniak, Methan und Kohlendioxid wurden ebenfalls nachgewiesen. Einige von ihnen stammen aus „Sputtern“ (eine Art Weltraumverwitterung, bei der mikroskopisch kleine

Partikel aus der Mondoberfläche entstehen, wenn sie mit der Energie des Sonnenlichts, des Sonnenwinds oder durch Mikrometeoriten bombardiert wird).

Eine weitere Quelle ist das Ausgasen einiger Elemente aus dem Mondinneren. Der Hauptabfluss ist der Verlust von Gasen in den Weltraum, begünstigt durch die geringe Schwerkraft des Mondes, das Fehlen einer Mond-Magnetosphäre und die Art und Weise, wie sich Atome und Moleküle ohne Kollisionen bewegen. Licht-Elemente wie Wasserstoff und Helium können aus Sonnenlicht ausreichend Wärmeenergie gewinnen, um direkt und schnell zu entkommen. Schwerere Elemente benötigen mehr Energie, um sich zu bewegen. Diese Energie kann aus der Photoionisierung der Sonne stammen, die sie in eine Art zufälligen Weg versetzt, bei dem sie wiederholt von der Oberfläche abprallen. Ungefähr die Hälfte dieser Ionen wird schließlich vom elektrischen Feld des Sonnenwinds eingefangen und entweicht in den Weltraum. Es sind auch Oberflächeneffekte zu berücksichtigen. Adsorption (Ablagerung) von Gasen an die kalte Oberfläche in der Mondnacht verdünnt die Atmosphäre, die „zu Boden fällt“ (<https://www.space.com/18067-moon-atmosphere.html>). Ihr anschließendes Aufheizen mit der Rückkehr der Sonne lässt die atmosphärische Dichte an der Sonnenaufgangsgrenze zunehmen, aber später am Montag wird er durch die oben beschriebenen Energie- und Fluchteffekte wieder reduziert. Bestimmte Dichteschwankungen können mit der Latitude des Mondes und möglicherweise auch mit anderen chemischen Oberflächeneffekten zusammenhängen. Vorausgesetzt, dass die Mondatmosphäre dort insgesamt stabil ist, muss ein Gleichgewicht zwischen den verschiedenen Quellen und Senken bestehen.

Das Apollo-14-ALSEP beinhaltete das SIDE (Suprathermal Ion Detector Experiment). Es wurde auf dem Mond zurückgelassen und beobachtete am 7. März 1971 Ionen, konsistent mit Wasserdampf. Bei der Analyse der Daten kam man zu dem Schluss, dass das Signal wahrscheinlich mit Mission-bedingtem Wasserdampf zusammenhing. Dennoch geht die Suche nach Mondwasser/-eis weiter. Die Apollo-17-Mission beinhaltete ein Paket namens SEP (Surface Electrical Properties) Experiment. Es wurde mit mehreren Zielen entworfen: einschließlich der Erkennung von Untergrundeis. Leider wurde keines gefunden.



Abb. 16: Grenada, 2000, Mi.-Nr. 4193



Abb. 17: Bhutan, Mi.-Nr. 2122  
Lunar Prospector

Nach dem Ende des Apollo-Programms

gab es eine längere Pause in der Mondforschung und -erkundung, die erst mit der Raumsonde Clementine wieder aufgenommen wurde (Start 1994, Abb. 16) und Lunar Prospector (Start 7. Januar 1998, Abb. 17). Sie haben hoffnungsvolle Hinweise auf die Existenz von Wassereis an den Mondpolen im Zuge ihrer Beobachtungen von Wasserstoff (ein Bestandteil von Wasser) gefunden. Im Jahr 2008 erfolgte eine erneute Analyse von Apollo-Mond-

gestein, wobei Wasserstoff in winzigen Perlen aus vulkanischem Glas gefunden wurde. Das war ein Hinweis darauf, dass Wasser ausgetreten sein könnte mit ausbrechenden Vulkanen in der dunklen Mondvergangenheit. Könnte da noch einiges möglich sein?



Abb. 18: St. Thomas, 2009, Mi.-Nr. 3909

Chandrayaan-1 (Start 2007, Abb. 18), setzte das NASA-M3-Instrument „Moon Mineralogy Mapper“ ab, diesem wird die Entdeckung von Eis im Shackleton-Krater am Mondsüdpol am 14. November 2008 zugeschrieben (und etwas



später an Orten in der Nähe des Nordpols, bevor die Raumsonde im August 2009 scheiterte). Dies war die erste solide Beobachtungsbestätigung von Watsons Theorie von 1961, dass Krater in der Nähe der Pole als Kältefallen wirken, welche Eis erhalten können.



Abb. 19: St. Thomas, 2009, Mi.-Nr. 3912

LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) und LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) (Abb. 19) wurden im Juni 2008 gemeinsam gestartet und markierten die Rückkehr der NASA zur aktiven Mondforschung. LCROSS schickte eine leere Rakete als „Sammler“ in die permanent im Schatten liegende Region des Cabeus-Kraters nahe des Südpols, danach flog sie in die Wolke und machte vier Minuten lang Messungen bevor es zum Aufschlagen auf die Oberfläche kam. Neben anderen Materialien wurden Eiskristalle gefunden – ein wichtiges Ergebnis, das das Vorhandensein von Eis auf dem Mond bestätigte! Währenddessen kartierte LRO vom

Orbit aus die Verteilung von Wasserstoff. Die Daten führten zu dem Schluss, dass Mondeis nicht nur in den beschatteten Kältefallen zu finden ist, sondern auch in Löchern, die außerhalb der schattigen Polarregionen liegen. Der Anteil flüchtiger Stoffe im Verhältnis zum Wasser im Mondboden weist darauf hin, dass ein Prozess namens „Kaltkornchemie“ im Gange ist. Wissenschaftler gehen davon aus, dass dieser Prozess Hunderttausende von Jahren dauern könnte und dass er auch auf anderen kalten, luftleeren Körpern wie Asteroiden auftreten kann; die Monde von Jupiter und Saturn, einschließlich Europa und Enceladus; Marsmonde; interstellare Staubkörner, die um andere Sterne schweben; und die Polarregionen von Merkur eingeschlossen. [22. Oktober 2010, Science];

<https://nevatlas.com/much-more-than-water-found-on-the-moon/16713>

Könnten zukünftige Mondforscher Wasser, Luft und Treibstoff aus Eis und anderen Verbindungen gewinnen, die dort gefunden wurden? Der VIPER (Volatiles Investigating Polar Exploration Rover) der NASA ist entwickelt worden, um zumindest einen Teil der Antworten zu liefern. Ab Ende 2024 wird seine Mission beginnen, um die Verteilung und Konzentration des Eises am Mondsüdpol zu kartieren.

LRO beobachtete auch Temperaturen aus dem Orbit heraus und stellte fest, dass die thermische Umgebung der Mondoberfläche „einer der extremsten aller Planetenkörper im Sonnensystem“ ist. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103516304869#bib0058>). Am Äquator liegt die durchschnittliche maximale Oberflächentemperatur bei etwa +120 °C, während das durchschnittliche Minimum kurz vor Sonnenaufgang bei -178 °C liegt – eine Spanne von fast 300 Grad! Nahe an den Polen liegt die durchschnittliche Höchsttemperatur bei -71 °C und die durchschnittliche Tiefsttemperatur bei -223 °C – eine Spanne von knapp über 150 Grad. Permanente Schatten in Kratern in der Nähe der Pole verbergen einige der kältesten Stellen im Sonnensystem – bis zu minus 250 °C. Diese eiskalte Dunkelheit fungiert als Senke für Eis, das verdampfen würde, wenn

jemals Sonnenlicht darauf treffen würde. Mit diesen Messungen wissen wir jetzt, dass die Temperaturbereiche, die das DTREM-Radiometer von Apollo-11 geliefert hatte, überhaupt nicht repräsentativ für die gesamte Mondumgebung sind.



NASA's SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrarot-Astronomie) war ein 2,7-m-IR-Teleskop an Bord einer Boeing 747. Der letzte Flug fand am 29. September 2022 statt. Es hat eine Flughöhe von etwa 12 km und vermied so fast den gesamten atmosphärischen Wasserdampf der Erde, welcher einige bodenge-

stützte Beobachtungen blockieren kann. Im Jahr 2020 entdeckte SOFIA zum ersten Mal überhaupt Wasser-Moleküle auf der sonnenbeschienenen Mondoberfläche. Das heißt nicht, dass der Mond ein feuchter Ort ist. Die Daten deuten darauf hin, dass solche Moleküle eingebettet sind in Mondstaubkörnern oder sie bleiben möglicherweise daran haften, aber diese Bereiche sind immer noch 100-mal trockener als die Wüste Sahara! Dennoch zeigt dieses Ergebnis, dass Eis nicht auf die kalten, dunklen Polargebiete beschränkt ist. Gibt es Wasserwege durch die Mondatmosphäre? Könnte alles dynamischer sein, als irgendjemand gedacht hat? Das sind Fragen für zukünftige Forschung.

Die Apollo-Astronauten hatten einige Probleme mit Mondstaub, der größtenteils von der Mondoberfläche aufgewirbelt wurde. Schwebt auch etwas Staub in der Atmosphäre? „Es gibt einige Beweise dafür, dass der Mond eine dünne Schicht aus sich bewegenden Staubpartikeln hat, die ständig von der Mondoberfläche aufwirbeln und zurückfallen [durch elektrostatische Levitation], wodurch ein „Staub“ entsteht, „Atmosphäre“, die statisch aussieht, aber aus Staubpartikeln in ständiger Bewegung besteht.“

([https://en.wikipedia.org/wiki/Lunar\\_soil#Moon\\_dust\\_fountains\\_and\\_electrostatic\\_levita](https://en.wikipedia.org/wiki/Lunar_soil#Moon_dust_fountains_and_electrostatic_levita))

Dies könnte die Ursache für das Mondhorizontglühen oder LHG sein, welches bei Sonnenaufgang und Sonnenuntergang von einigen Surveyor-Landern und verschiedenen Apollo-Astronauten beobachtet wurde. Der physikalische Prozess ist kaum verstanden. Es kann am stärksten an den Grenzen sein. Die Raumsonde LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer) (Abb. 20) wurde 2013 mit Instrumenten für Messung der Zusammensetzung der Mondatmosphäre und zur Sammlung von Mondstaub in eine niedrige Mondumlaufbahn gebracht. (<https://www.space.com/8715-mysterious-moon-light-glowing-dust-fountains.html>)

Die Daten zeigten, dass Argon, Helium und Neon die Hauptbestandteile der Mondatmosphäre sind und der Sonnenwind die ultimative Quelle der beiden letztgenannten ist. LADEE verzeichnete auch mindestens 11.000 Einschläge durch Staubpartikel. Diese korrelierten jedoch mit dem Impact aus den Geminiden-Mondmeteoroiden, und es wurden keine Hinweise auf elektrostatisch aufgewirbelten Staub gefunden. Das Rätsel bleibt also noch ungelöst.

Wichtig sind auch neuere Mondraumsonden wie LADEE aus einem besonderen Grund: der zunehmenden Zahl von Mond-Missionen in den kommenden Jahrzehnten, und insbesondere bemannte Einsätze. Die Atmosphäre des Mondes ist so dünn, dass sie durch diese Missionen erheblich verändert werden könnte. Wir müssen die wissenschaftlichen Details möglichst gut festlegen, bevor es zu spät ist.

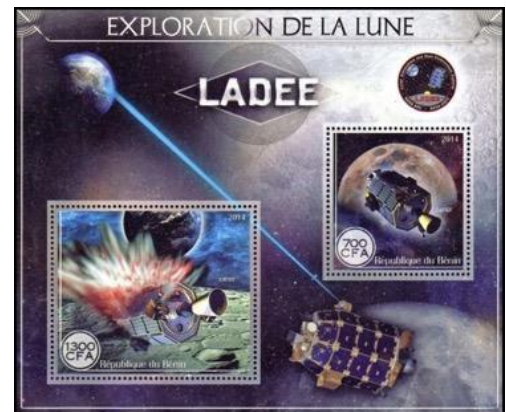


Abb. 20: Benin, 2014, illegale Ausgabe

Die oben genannten Briefmarken und viele weitere finden Sie auf der Website der Autoren (Unmanned Satellite Philately) auf <https://rammb.cira.colostate.edu/dev/hillger/satellites.htm>. Die Seite „Planetary Environments“ enthält alle bekannten relevanten Briefmarken und Philatelieartikel.



TIROS-1/8 type

**Un-manned  
Satellite  
(or Spacecraft)  
Philately**



GOES-8/12 type