

Planetenumwelt - Teil 3: Merkur

von Garry Toth und Don Hillger (Unmanned Satellite Philately)
Übersetzung durch Frank Kunze

Dies ist der dritte Artikel in der Astrofax-Reihe über Planetenumgebungen. Die ersten beiden Abhandlungen erschienen in den Ausgaben Sommer (Einführung) und Herbst 2023 (Der Mond). Der zweite Aufsatz stellte wichtige Konzepte, wie Temperaturmessung, Lang- und Kurzwellenstrahlung, Wärmeübertragung, Exosphären, flüchtige Verbindungen sowie Elemente des Weltraumwetters wie die Magnetosphäre und des Sonnenwind vor. Es wird in diesem und gegebenenfalls weiteren Artikeln dieser Reihe darauf hingewiesen, dass der Leser mit diesen Konzepten vertraut ist.

Merkur war durch visuelle Beobachtungen bei alten Völkern wie den Babyloniern, Chinesen, Griechen und Römern bekannt. Weil er sich so schnell über den Himmel bewegt, benannten die Römer ihn nach ihrem Gott Merkur, der ihrer Vorstellung nach schnell Botschaften zwischen den Göttern und Sterblichen transportierte.

Merkur ist schwer zu beobachten, da er nahe an der Sonne liegt (durchschnittliche Entfernung 0,39 Astronomische Einheiten (AU); die Entfernung der Erde zur Sonne liegt bei 1 AU). Von der Erde aus ist er nur niedrig am Himmel während der Morgen- oder Abenddämmerung oder in seinen seltenen Passagen („Transits“) vor der Sonne sichtbar. Die detailliertesten nicht-teleskopischen Beobachtungen des Merkur (und vieler anderer astronomischer Objekte) wurden vom dänischen Astronomen Tycho Brahe dokumentiert (1546-1601) (Abb. 1).



Abb. 1 Dänemark, Mi.-Nr. 294, 1946

Galileo Galilei hat möglicherweise versucht, Teleskopbeobachtungen des Planeten um 1610 oder später durchzuführen, aber Detailinformationen hierzu sind rar. Es gibt allerdings eindeutige Aufzeichnungen darüber, dass der französische Astronom Pierre Gassendi (1592-1655) (Abb. 2) den Merkur beobachtete, als dieser am 7. November 1631 die Sonne passierte; wobei er Keplers Rudolphinische Tafeln von 1627 (die auf Brahes Beobachtungen basierten) nutzte, um seine Position am Himmel zu finden. Am 3. Mai 1661 beobachtete der holländische Astronom Christiaan Huygens (1629-1695) (Abb. 3) ebenfalls den Merkur bei einem Sonnentransit.



Abb. 2: Frankreich, Mi.-Nr. 1721, 1970, FDC Gassendi



Abb. 3: Niederlande, Mi.-Nr. 221, 1928

Im Laufe der Zeit behinderten Beobachtungsschwierigkeiten die Suche nach zuverlässigeren Informationen zu Details wie Oberflächenmerkmalen und der Rotationsperiode des Merkurs. Mit verbesserten Teleskopen untersuchten Astronomen wie Giovanni Schiaparelli (1835 bis 1910, am bekanntesten für seine Marsbeobachtungen), E. E. Barnard (1857 bis 1923) und Percival Lowell (1855 bis 1916) den Merkur so gut wie möglich. Einige Beobachtungen deuteten darauf hin, dass Merkur „gezeitengebunden“ zur Sonne war, d. h. seine Rotation war so, dass eine Seite immer der Sonne zugewandt war, vergleichbar der Seite des Mondes, die immer der Erde zugewandt ist. Dies würde bedeuten, dass die der Sonne zugewandte Seite extrem heiß wäre, während die gegenüberliegende Seite aufgrund der Abkühlung durch den Abfluss langwelliger Strahlung vereist ist. Im Jahr 1934 veröffentlichte der Astronom Eugenius Antoniadi (1870 bis 1944) den ersten Versuch einer Karte der Oberflächenstruktur von Merkur. Dies führte zur Gezeitenlocking-Hypothese.

Anfang der 1960er Jahre begannen sich die Dinge zu ändern. *„Im Juni 1962 waren sowjetische Wissenschaftler am Institut für Funktechnik und Elektronik (den Autoren ist kein Stempel bekannt) der Akademie der Wissenschaften der UdSSR unter der Leitung von Wladimir Kotelnikow die ersten, die ein Radarsignal vom Merkur reflektierten und empfingen, der Beginn der Radarbeobachtungen des Planeten. Drei Jahre später führten die Amerikaner Gordon H. Pettengill und Rolf B. Dyce Radarbeobachtungen mit dem 300-Meter-Radioteleskop des Arecibo-Observatoriums in Puerto Rico durch [Abb. 4] und zeigten dabei schlüssig, dass die Rotationsperiode des Planeten etwa 59 Tage betrug“* [COSMOSPNW unter der Adresse <https://cosmospnw.com/observation-of-mercury/>]. Dies bewies, dass es keine Gezeitenblockierung (Gezeitenlocking) gab: Merkur dreht sich tatsächlich 1,5 Mal pro Umlauf. Das bedeutet, dass von einem Planetenperihel zum nächsten die gegenüberliegenden Seiten des Merkurs der größten Sonnenerwärmung ausgesetzt sind, so dass es auf gegenüberliegenden Seiten des Planeten zwei abwechselnde äquatoriale „heiße Pole“ geben muss. Eine Schätzung aus dieser Zeit ergab, dass die maximale Temperatur der Oberfläche auf der Sonnenseite 347°C betrug. Die kältesten Teile des Planeten wären dann zwangsläufig die dauerhaft beschatteten Regionen in den Polargebieten des Merkurs. Im Jahr 1961 hatte der amerikanische Physiker Kenneth Watson die Hypothese aufgestellt, dass in solchen kalten Becken auf dem Erdmond flüchtige Stoffe wie Wassereis existieren könnten. Nach Kenntnis der Autoren gab es zu diesem Zeitpunkt keinerlei entsprechenden Spekulationen für Merkur.



Abb. 4 USA, Mi.-Nr. 3366, 2000

Eine 1969 und 1970 durchgeführte Teleskopstudie verwendete ein Infrarotspektrometer und ergab, dass die durchschnittliche Oberflächentemperatur der gesamten dunklen Seite von Merkur etwa -162 °C betrug [Ref. 1]. Offenbar ermöglichten die damaligen Instrumente keine bessere Auflösung. Diese Studie kam auch zu dem Schluss, dass Mond und Merkur wahrscheinlich ähnliche obere Oberflächenschichten haben.

Eine 1969 und 1970 durchgeführte Teleskopstudie verwendete ein Infrarotspektrometer und ergab, dass die durchschnittliche Oberflächentemperatur der gesamten dunklen Seite von Merkur etwa -162 °C betrug [Ref. 1]. Offenbar ermöglichten die damaligen Instrumente keine bessere Auflösung. Diese Studie kam auch zu dem Schluss, dass Mond und Merkur wahrscheinlich ähnliche obere Oberflächenschichten haben.

Das Weltraumzeitalter begann 1957, aber aufgrund der technischen Herausforderungen dauerte es lange, bis Planetensonden zum Merkur geschickt werden konnten. Nur drei Raumschiffe haben diese Reise geschafft. Die Planetary Society stellt eine Liste unter

<https://www.planetary.org/space-missions/every-mercury-mission>

zur Verfügung; Wikipedia hat eine andere Liste unter

https://en.wikipedia.org/wiki/Exploration_of_Mercury

veröffentlicht. Merkur ist der am wenigsten erforschte Planet der vier Gesteinsplaneten Merkur, Venus, Erde und Mars des inneren Sonnensystems.

Die NASA-Raumsonde Mariner-10 wurde im November 1973 gestartet. Sie lieferte die ersten Nahaufnahmen der Venus und nutzte die Schwerkraft-„Schleuder“ dieses Planeten, um in eine Sonnenumlaufbahn zu gelangen, von der aus sie drei Merkur -Vorbeiflüge nahe am Perihel des Planeten durchführte. Der letzte Vorbeiflug im Jahr 1975 war der nächstgelegene (nur 327 km von der Oberfläche entfernt). Der FDC in Abb. 5 zeigt Mariner-10 auf der Briefmarke und gibt eines seiner Fotos im Zudruck wieder. Der Planet ist voller Krater und sieht aus wie der Mond.

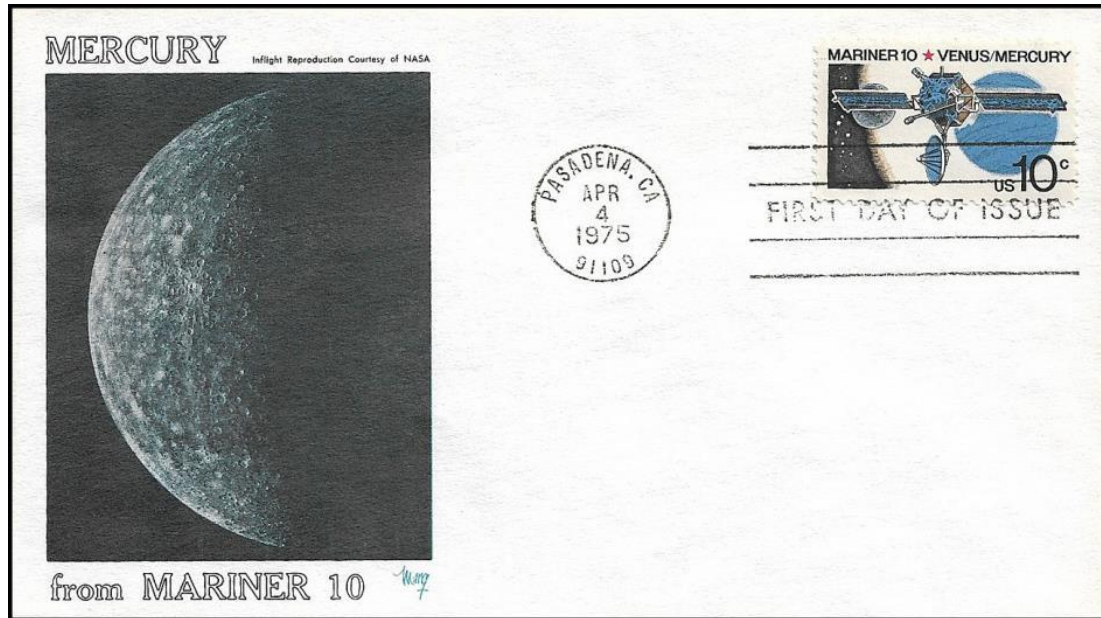


Abb. 5: USA, Mi.-Nr. 1170, 1975, FDC Mariner-10, Vorbeiflug am Merkur

Das UV-Strahlungsphotometer von Mariner-10 beobachtete atomaren Wasserstoff (H), Helium (He) und atomaren Sauerstoff (O) und bewies damit, dass der Planet eine Atmosphäre vom Typ nahezu Vakuum hat, die als oberflächenbasierte Exosphäre bekannt ist. Auch der Erdmond hat eine solche Atmosphäre. Spuren von atmosphärischem Natrium und Magnesium wurden später durch erdgestützte Beobachtungen entdeckt. Eine moderne Schätzung des winzigen Oberflächen-drucks auf Merkur liegt bei etwa 5×10^{-13} kPa (im Vergleich zu 100 kPa auf der Erde). Die Gesamtmasse der Atmosphäre beträgt möglicherweise nur etwa 10.000 kg (die entsprechende Schätzung für den Mond liegt bei etwa 25.000 kg).

Überraschenderweise fand Mariner-10 auch heraus, dass Merkur eine recht aktive Magnetosphäre besitzt, obwohl sie nur etwa 1 % so stark ist wie die der Erde. Diese Weltraumwetterforschung wird auf einem Mariner-10-FDC für seinen dritten (und letzten) Vorbeiflug zusammengefasst (Abb. 6): Ein „Hauptziel“ bestand darin, „das Magnetfeld des Merkurs zu untersuchen“. Dazu gehörte „die Untersuchung des Sonnenwinds und der Teilchen der kosmischen Strahlung“. Wie wir sehen werden, sind die Auswirkungen des Weltraumwetters und ihre Wechselwirkung mit der Magnetosphäre des Merkurs für den Planeten und seine Atmosphäre von großer Bedeutung.

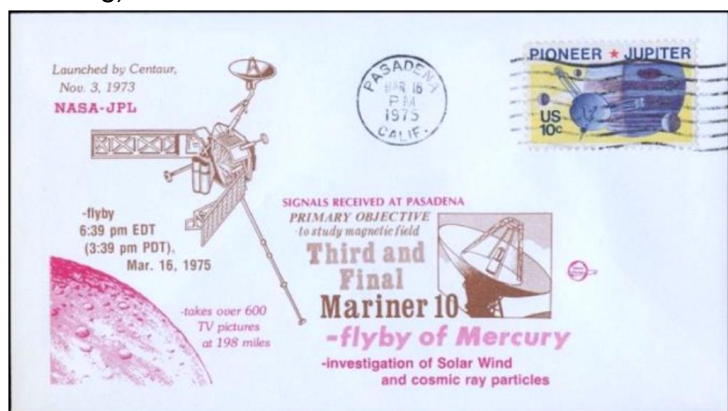


Abb. 6: USA, Mi.-Nr. 1164, 1975

Im Jahr 1991 führten Radioastronomen am JPL und CalTech eine aktualisierte Radarkartierung des Merkurs durch (Ref. 2). Energieimpulse wurden von der Goldstone-Antenne in Kalifornien gesendet (dargestellt im Zudruck des Mariner-10-Ersttasbriefes in Abb. 7, obwohl es sich bei dem abgebildeten Raumschiff um den Typ Mariner-3/4 handelt), während das Rücksignal von der Antenne des Very Large Array (VLA) (Abb. 8) in New Mexico empfangen wurde.



Abb. 7: USA, 1973, FDC Goldstone-Antenne als Zudruck



Abb. 8: USA, Mi.-Nr. 3362, 2000

Die Hard- und Software war so weit verbessert, dass die Astronomen eine Auflösung von etwa 15 km erreichen konnten. Sie waren verblüfft, als sie in den Polarregionen des Merkurs Regionen mit hohem Reflexionsvermögen fanden, die als Gebiete mit Wassereis interpretiert werden konnten. Darüber hinaus entsprachen diese Regionen beobachteten großen, tiefen Kratern in der Nähe der beiden Pole. Andere Erklärungen wären möglich, aber Eis war eine verlockende Hypothese. Das Arecibo-Radioteleskop wurde Mitte der 1990er Jahre erheblich modernisiert, um seine Empfindlichkeit zu verbessern. *„Eine der ersten Errungenschaften des verbesserten Radars war die überarbeitete Darstellung des Nordpols von Merkur mit einer viel feineren Auflösung (1,5 – 3 km). Diese 1998–1999 getätigten Beobachtungen enthüllten viele zusätzliche nordpolare „Eis“-Merkmale, darunter einige in relativ niedrigen Breiten, und lieferten ein detaillierteres Bild der Eisverteilung innerhalb einzelner Krater“* [von Harmon et al. (2011)]. Weitere Beobachtungen wurden im Jahr 2005 gemacht. Dies war immer noch kein absoluter Beweis für das Vorhandensein von Wassereis auf Merkur, aber die Hinweise wurden immer stärker.



Abb. 9: USA, Mi.-Nr. 4702, 2011

Die NASA-Raumsonde MESSENGER (MErcury Surface, Space ENvironment, GEochemistry, and Ranging) (Abb. 9) wurde 2004 gestartet, um mehrere wissenschaftliche Studien zum Planeten durchzuführen. Nach zwei nahen Vorbeiflügen im Jahr 2008 ging es 2011 in die Umlaufbahn um Merkur. Während der Vorbeiflüge bestätigte MESSENGER überraschenderweise das Vorhandensein von Natrium- (Na), Kalzi-

um- (Ca) und Kaliumionen (K) in der Atmosphäre sowie Magnesium und große Mengen Wasserdampf. Es untersuchte auch den langen atmosphärischen „Schweif“ von Merkur, der sich aufgrund des Drucks des Sonnenwinds (auf Merkur viel stärker als auf der Erde) und seiner Wechselwirkungen mit der Magnetosphäre des Planeten in den Weltraum ausdehnt. Im Schweif wurden Natrium und Kalzium gefunden, deren Zusammensetzung saisonal mit der Entfernung Merkurs von der Sonne variiert (der Planet befindet sich auf einer stark elliptischen Umlaufbahn). Ein Teil der Merkuratmosphäre geht in diesem Schweif verloren. Der Erdmond weist keine entsprechenden Merkmale auf (er hat kein nennenswertes Magnetfeld und erfährt einen schwächeren Sonnenwind). Ein Teil der Merkuratmosphäre kann auch durch lokale beschleunigte Bewegungen atmosphärischer Komponenten in den Weltraum entweichen, die aus Energieübertragungen aufgrund von Kollisionen mit dem Son-



nenwind resultieren und durch die relativ schwache Schwerkraft und schwache Magnetosphäre des Planeten erleichtert werden. Wenn die atmosphärische Masse insgesamt stabil ist, müssen diese Senken durch Quellen wie den Sonnenwind selbst, Meteoritenverdampfung und Sputtern ausgeglichen werden.

MESSENGER bestätigte, dass die Atmosphäre von Merkur räumlich und zeitlich stark variabel ist. Warum variiert diese so stark und so schnell? Ein Grund könnte die Stärke des Sonnenwinds sein, der auf den Planeten trifft. Der Sonnenwind reißt einen Teil des solaren Magnetfelds mit sich und kann das viel schwächere Magnetfeld des Merkurs verzerren und sogar überdecken. Die beiden Effekte können sich verbinden und verstärken, was im Weltraumwetterjargon als „Magnetflussübertragungsereignis“ bezeichnet wird und als „magnetischer Zyklon“ oder „magnetischer Tornado“ betrachtet werden kann. Ein Ereignis wie dieses bringt die gesamte Merkur-Atmosphäre durcheinander, denn wenn es passiert, sinkt der Sonnenwind bis zur Oberfläche, wo Atome und Moleküle genug Energie erhalten können, um in den Himmel geschleudert zu werden, wodurch die atmosphärische Dichte zunimmt und ihre Zusammensetzung verändert, wohin auch immer sie gehen. Einige entkommen in den Weltraum, aber die meisten werden schließlich durch die Schwerkraft an andere Orte zurückgeworfen und verändern so die Atmosphäre, in der sie landen. Solche „magnetischen Wirbelstürme/Tornados“ können groß oder klein und langlebig oder kurzlebig sein. Sie sind wahrscheinlich zumindest ein Teil der Erklärung für die extreme Variabilität der oberflächennahen Exosphäre des Merkurs.

MESSENGER lieferte auch mehrere Beobachtungen für das Vorhandensein von Wasserstoff (einem Teil des Wassereises) in Regionen mit permanentem Schatten in den Polarregionen des Merkurs, was mit den früheren radioastronomischen Beobachtungen übereinstimmte und diese bestätigte. Die Raumsonde maß in der extremsten dieser „Kältefallen“ Oberflächentemperaturen von bis zu -223 °C (50 K) und $+277\text{ °C}$ (550 K) oder mehr in offenen, der Sonne ausgesetzten Gebieten in den mittleren Breiten der nördlichen Hemisphäre des Merkur (**siehe JHU/APLs MESSENGER-Website unter „Nr. 2: Polare Ablagerungen“**). Die heißesten Bedingungen herrschen auf der Sonnenseite des Äquators am Perihel des Merkurs, wo die Oberflächentemperatur bis zu 430 °C betragen kann. Solche höllischen Temperaturen sind jedoch nicht die heißesten im Sonnensystem. Wie wir in Teil 4 dieser Serie sehen werden, gebührt Venus diese zweifelhafte Ehre. Merkur hält tatsächlich den Rekord für den Planeten mit der größten Schwankung der Oberflächentemperaturen: Eine Schätzung aus den oben genannten Zahlen liegt bei 653 °C ($+430\text{ °C}$ bis -223 °C)! Dies ist eine Folge der Nähe des Planeten zur Sonne (für eine starke Erwärmung durch kurzwellige Sonnenstrahlung) in Kombination mit dem nahezu Fehlen einer Atmosphäre (für eine starke Abkühlung durch langwellige Strahlung aus ständig beschatteten dunklen Bereichen). Die durchschnittliche Oberflächentemperatur des Merkur über seine gesamte Oberfläche wurde mit $+167\text{ °C}$ berechnet. MESSENGER sammelte Daten bis zum 30. April 2015, als sich die Umlaufbahn der Raumsonde aufgrund von Treibstoffmangel soweit verschlechterte, dass sie auf die Merkur Oberfläche stürzte. Ein Teil des wissenschaftlichen Nachlasses von MESSENGER besteht darin, dass entdeckt wurde, dass der Kern von Merkur 85 % des Volumens des Planeten ausfüllt (viel mehr als der Wert von 15 % für die Erde).

Warum ist der Kern so groß? Wie erzeugt es das Magnetfeld des Planeten? Die 2018 gestartete gemeinsame Raumsonde BepiColombo von ESA (Europäische Weltraumorganisation) und JAXA (Japan Aerospace eXploration Agency) wird versuchen, diese und andere wissenschaftliche Fragen zu beantworten. Es wurde nach dem italienischen Wissenschaftler Giuseppe „Bepi“ Colombo (1920–1984) benannt, der als Erster die Technik der interplanetaren Schwerkraftunterstützung („Schleuder“) vorschlug, die heute häufig von interplanetaren Raumfahrzeugen verwendet wird.

Nach einer komplizierten Reihe von Vorbeiflügen an Erde, Venus und Merkur wird BepiColombo voraussichtlich am 5. Dezember 2025 in die Umlaufbahn um den Merkur eintreten. Die Mission besteht tatsächlich aus drei verschiedenen Raumfahrzeugen:

- (1) Mercury Planetary Orbiter (MPO): Der von der ESA gebaute MPO wird die Zusammensetzung und Dynamik der oberflächennahen Exosphäre des Merkurs untersuchen, einschließlich der Mechanismen der Erzeugung und des Entweichens seiner Komponenten. Seine Gammastrahlen- und Neutronenspektrometer werden verwendet, um das Vorhandensein von Wassereis in dauerhaft beschatteten Polarkratern zu überprüfen. Andere Instrumente werden die Oberfläche, Zusammensetzung, innere Struktur und den Magnetismus von Merkur untersuchen.
- (2) Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO): Der von JAXA gebaute MMO wird das Magnetfeld/die Magnetosphäre des Merkur und seine Weltraumumgebung untersuchen.
- (3) Mercury Transfer Module (MTM): Dieses von der ESA gebaute Raumschiff transportiert die beiden anderen und wird sie zum Merkur bringen.

Die meisten philatelistischen Objekte zu BepiColombo zeigen das Ensemble: das MTM, das das MMO und das MPO in einer Art trägt, die man als „Kreuzfahrtskonfiguration“ der Mission bezeichnen könnte. Ein Beispiel findet sich auf dem Ersttagsumschlag in Abb. 10. Die Briefmarke in Abb. 11 zeigt MPO (gelbe Umlaufbahn) und MMO (rote Umlaufbahn) auf ihren späteren getrennten Umlaufbahnen um Merkur. Man hofft, dass sie wissenschaftlich genauso erfolgreich sein werden wie die beiden Raumschiffe, die den Planeten bereits besucht haben.



Abb. 10: Frankreich 2018, FDC BepiColombo, Lollini cachet



Abb. 11, Deutschland, Privatpost, 2018, Die Komponenten MPO und MMO des BepiColombo

Der interessierte Leser kann gern auf die umfangreichen Listen und Bilder der Autoren für Briefmarken und Umschläge für **Planetary Spacecraft** unter

<https://rammb.cira.colostate.edu/dev/hillger/satellites.htm#planetary>,

einschließlich des oben genannten Raumfahrzeugs, und/oder auf ihre Space Weather-Webseite für philatelistische Artikel zum Thema Weltraumwetter unter

<https://rammb.cira.colostate.edu/dev/hillger/space-wx.htm>

verweisen.

Referenzen

(Ref. 1) Murdock, T. L. und E. P. Ney, 1970: „Mercury: The Dark-Side Temperature“, Science, Neue Serie, Bd. 170 (3957) (30. Oktober 1970), S. 535-537.

(Ref. 2) Lewis, John L., 1996: „Rain of Iron and Ice“, Helix Books, Addison-Wesley Publishing Co., ISBN 0-201-48950-3, Kapitel 10, S. 133-135.

Über die Autoren

Garry Toth, M.Sc., jetzt im Ruhestand, arbeitete viele Jahre beim Meteorological Service of Canada. Korrespondenz an gmt.varia@gmail.com ist willkommen.

Don Hillger, Ph.D., jetzt im Ruhestand, war Forschungsmeteorologe bei der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) und hatte eine kooperative Position an der Colorado State University inne. Korrespondenz an don.hillger@colostate.edu ist willkommen.

Weitere Links sind über den englischsprachigen Originalbeitrag abrufbar, welcher nach Zustimmung der Autoren im geschützten Bereich unserer Homepage abgelegt werden wird.