

Die Erforschung des Asteroiden Ryugu

Die Beute des Wanderfalken

THOMAS MÜLLER

Im Juni 2018 erreichte die japanische Raumsonde Hayabusa 2 den Asteroiden Ryugu. Neben der detaillierten Charakterisierung des Kleinplaneten aus der Nähe wurden mehrere Landeeinheiten abgesetzt, Oberflächenmaterial entnommen und ein kleiner künstlicher Krater erzeugt. Die gesammelten Proben sollen im Dezember 2020 die Erde erreichen.

Von 2003 bis 2010 verlief die erste Hayabusa-Mission. Sie hatte den Asteroiden 25143 Itokawa zum Ziel. Wesentlich waren hier die Tests neuer Technologien, wie ein Ionentriebwerk oder die autonome Steuerung im Nahbereich. Die Mission litt unter technischen Problemen, dennoch gelang es, Proben von der Asteroidenoberfläche zu entnehmen und zur Erde zurückbringen. Eine ebenfalls mitgeführte Landeeinheit namens Minerva hatte die Asteroidenoberfläche jedoch damals verfehlt.

INTERNET

Hayabusa 2 bei JAXA
www.hayabusa2.jaxa.jp/en/
<http://jda.jaxa.jp/en>

MASCOT beim DLR
<https://t1p.de/tont>

Thomas Müller
www.mpe.mpg.de/~tmueller/

MISSIONSDATEN

03.12.2014: Start vom Weltraumbahnhof Tanegashima
 03.12.2015: Swing-by an der Erde
 27.06.2018: Ankunft am Asteroiden
 21.09.2018: Landung der beiden Sonden Minerva-II
 03.10.2018: Landung von MASCOT
 21.02.2019: erste Bodenprobenentnahme
 11.07.2019: zweite Bodenprobenentnahme
 05.04.2019: Abschuss des Projektils
 12. 2019: Rückstart zur Erde
 12. 2020: Ankunft auf der Erde



Abb. 1 Hayabusa 2 in der Montagehalle (Foto: JAXA).

Nach dieser technisch schwierigen Mission schickte die japanische Weltraumbehörde JAXA 2014 die Nachfolgerin Hayabusa 2 (japanisch für Wanderfalken) ins All. Dieses Mal war das Ziel ein knapp ein Kilometer großer Asteroid des Apollo-Typs namens (162173) Ryugu (Drachenpalast). Diese Körper umkreisen die Sonne auf Bahnen, die regelmäßig die der Erde kreuzen. Es ist nicht ausgeschlossen, dass Ryugu in ferner Zukunft die Erde trifft, in absehbarer Zeit ist das jedoch nicht der Fall.

Das neue Ziel ist gut gewählt, da alle bisher untersuchten erdnahen Körper gesteins- oder silikatreiche Oberflächen besitzen. Wegen ihrer Silikanreicherung zählen sie zum sogenannten S-Typ. Die Laboranalyse der damals eingesammelten Partikel von Itokawa ermöglichte die Rekonstruktion einer spannenden Geschichte. Demnach entstand der Körper vor 4,6 Milliarden Jahren, doch vor etwa 1,5 Milliarden Jahren wurde er bei einer Kollision zerstört und war hohen Temperaturen in Sonnennähe ausgesetzt.

Seit Längerem wird über die Theorie spekuliert, dass kleine Körper wie Kometenkerne und Asteroiden im jungen Sonnensystem Wasser auf die Erde brachten. Aufgrund ihrer Zusammensetzung spielten diese S-Typen jedoch kaum eine Rolle. Auch für die ebenfalls diskutierte Lieferung von kohlenstoffhaltigem Material, einschließlich komplexer organischer Verbindungen, auf die junge Erde kommen sie nicht in Frage.

Bei Ryugu ist das anders. Er gehört zum C-Typ, was für carbonaceous, kohlenstoffreich, steht. Hier gab es bereits vor der Mission Hinweise auf Kohlenstoffverbindungen und wasserhaltige Mineralien. Dies deutet auf eine Entste-

hung im äußeren, kalten Sonnensystem hin, weswegen Ryugu entsprechend weniger thermische Veränderungen erfahren haben sollte als Itokawa. Durch Begegnungen mit den Gasriesen Jupiter oder Saturn könnten früher solche Kleinkörper ins Innere des Sonnensystems befördert worden sein und bei Kollisionen wichtige Zutaten für die Urmaterie auf der Erde geliefert haben. Ryugu erfüllt diese Voraussetzungen für die Erforschung von Wasser und organischen Materialien und ist gleichzeitig missionstechnisch gut erreichbar.

Hayabusa 2

Die mit einem Ionentriebwerk ausgerüstete, gut 600 kg schwere Sonde (Abbildung 1) erreichte im Juni 2018 den Asteroiden und startete erste Erkundungen aus einer Parkposition 20 km über der Oberfläche (siehe „Missionsdaten“ auf S. 228). Hayabusa 2 verfügt über mehrere Instrumente: eine optische und eine Infrarotkamera, ein Nahinfrarot-Spektrometer für mineralogische Studien, ein LIDAR-System zur Vermessung der Oberfläche und eine Vorrichtung zur Probenentnahme. Ergänzt wird die Mission durch die 10 kg schwere Landeeinheit MASCOT. Diese steuert das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR und die französische Raumfahrtbehörde CNES bei. MASCOT verfügt über ein Infrarotspektrometer, ein Magnetometer, ein Radiometer und eine Kamera namens Mascam. Zwei jeweils nur etwa ein Kilogramm schwere Mini-Rover wurden in Landeeinheiten Minerva-II-1 und -II-2 auf der Oberfläche abgesetzt (Abbildung 2).

Die Landung des schuhkartongroßen MASCOT am 3. Oktober 2018 verlief weitgehend wie geplant. Nach sechs Minuten freiem Fall aus 51 m Höhe (Abbildung 3) purzelte die Sonde auf die Oberfläche. Bei ihrem ersten Bodenkontakt prallte sie zunächst ab und berührte dann noch acht Mal den Boden, bevor sie zur Ruhe kam. Anfänglich lag MASCOT auf der falschen Seite, doch mit einem inneren Schwungarm konnte sich die Sonde umdrehen und sich sogar einige Meter weit über die Oberfläche bewegen.

Die DLR-Kamera Mascam schoss während des Abstiegs 20 Aufnahmen und lieferte weitere 120 Bilder von der Oberfläche: eine Welt voller scharfkantiger Blöcke, kaum feinkörniges Material und weit und breit keine ebene Fläche. Das französische Infrarot-Spektralmikroskop MicrOmega sollte die mineralogische Zusammensetzung des Asteroidenstaubs ermitteln, war aber durch ungünstige Blickwinkel sehr stark eingeschränkt. Das an der TU Braunschweig entwickelte Magnetometer MasMag sammelte Daten über ein mögliches Magnetfeld von Ryugu, das der kleine Körper in den Anfangszeiten des Sonnensystems aufgeprägt bekommen haben könnte. Erste Ergebnisse sind allerdings negativ. Und das DLR-Radiometer Mara schließlich erfasste die Temperatur und thermischen Eigenschaften der Geröllbrocken in der Nähe. Für die gemessene, unglaublich niedrige thermische Wärmeleitfähigkeit gibt es bisher kein vergleichbares Meteoritenmaterial in existierenden Sammlungen. Das deutet auf eine sehr hohe Porosität dieser



Abb. 2 Aufnahme eines der beiden Mini-Rover nach der Landung auf der Oberfläche (Foto: JAXA).

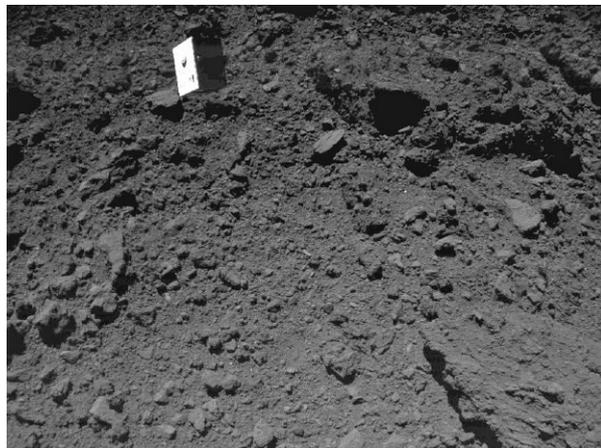


Abb. 3 MASCOT auf dem Weg zur Oberfläche (Foto: JAXA/Univ.Tokyo).

Oberflächenbruchstücke hin. Eine erste Serie von Publikationen zu MASCOT wird demnächst erscheinen.

Am 21. Februar 2019 ging die Muttersonde dann auf die Oberfläche nieder, entnahm einige Proben, verstaute sie hermetisch in einer Kapsel und entfernte sich dann wieder (Abbildung 4). Anfang April 2019 fand die nächste spektakuläre Aktion statt: Ein Projektil wurde mit Hilfe einer Sprengladung mit großer Geschwindigkeit in die Oberfläche gejagt (Abbildung 5). Eine frei fliegende Kamera dokumentierte den Einschlag, während sich Hayabusa 2 auf der Rückseite von Ryugu in Sicherheit befand. Der einige Meter große Krater wird gezielt aus verschiedenen Entfernungen untersucht. Zusätzlich näherte sich die Sonde am 11. Juli dieser Stelle, setzte in Kraternähe auf und entnahm Bodenproben (Abbildung 7). Ziel war es, frisches Auswurfmaterial zu sammeln. Ende Juli sollte zudem ein weiterer Rover auf der Oberfläche landen.

Ryugu

Die ersten Ergebnisse der Untersuchungen wurden kürzlich bekanntgegeben [1–3]. Sie eröffnen einen spannenden Blick auf eine neue Welt. Bisher war unser Bild von Asteroiden stark von früheren Missionen und Radarecho-Messungen geprägt. Sie offenbaren ungewöhnliche, oft stark zer-

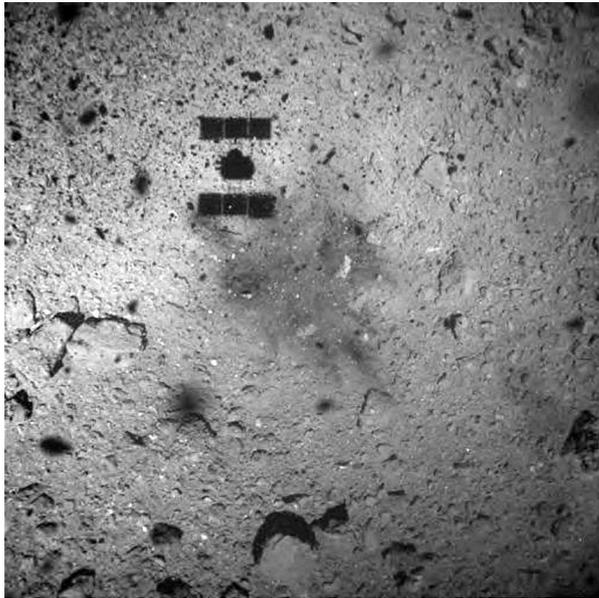


Abb. 4 Aufnahme unmittelbar nach dem Touchdown am 22.2.2019 aus 25 m Höhe (Foto: JAXA, Univ. Tokyo, Kochi Univ., Rikkyo Univ., Nagoya Univ., Chiba Institute of Technology, Meiji Univ., Univ. of Aizu, AIST).

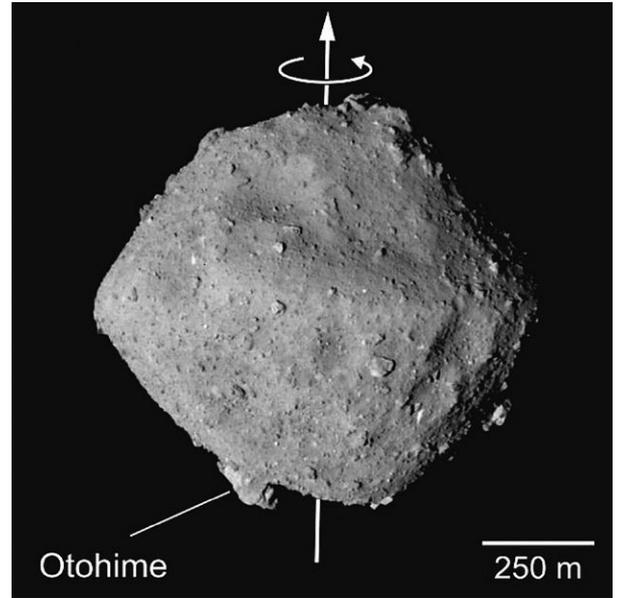


Abb. 6 Ryugu aus der Sicht der optischen Kamera an Bord von Hayabusa 2. Die Aufnahme erfolgte am 10. Juli 2018 aus 20 km Entfernung. Der weiße Pfeil markiert die Rotationsachse (Foto: JAXA, Univ. Tokyo, Kochi Univ., Rikkyo Univ., Nagoya Univ., Chiba Institute of Technology, Meiji Univ., Univ. of Aizu and AIST aus [1]).

klüftete Regionen, kraterübersäte Oberflächen, auch längliche oder Doppelobjekte kamen zum Vorschein. Itokawa ist hierfür ein Beispiel.

Ryugu ist eine neue Welt. Aufgrund der wenig variablen Helligkeit des Asteroiden ging man von einer annähernd runden Form aus. Die Rotation erfolgt retrograd, also entgegen dem Umlaufsinn um die Sonne, mit einer Periode von etwa 7,6 h. Die ersten Messungen bestätigten die abgeschätzte Größe von circa 900 m Durchmesser sowie die Drehachse und die Rotationsperiode. Die dunkle, kohlearartige Oberfläche besitzt eine Albedo von knapp unter 5%. Die Aufnahmen zeigen aber ein recht scharfkantiges, oktaederförmiges Gebilde (Abbildung 6). Die Oberfläche ist übersät mit Gesteinsbrocken, wobei ein etwa 150 m großer Block am Südpol besonders auffällig ist. Er wurde

inzwischen nach einer japanischen mythologischen Wasserprinzessin auf den Namen Otohime getauft.

Die rundlichen Einsenkungen mit Durchmessern von bis zu 200 m weisen auf Einschlagkrater hin. Aus der mit Hayabusa 2 vermessenen Gravitation und der Objektgröße ließ sich eine Dichte von $1,19 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ ableiten. Dieser extrem niedrige Wert deutet auf eine hoch poröse Struktur hin und lässt sich am besten durch eine lose Geröllansammlung erklären, die nur durch schwache Anziehungskräfte zusammengehalten wird – am Äquator beträgt die Schwerkraft nur 1/8000 g. Diese lockere innere Struktur könnte auch eine Erklärung für den äquatorialen Wulst sein. Eine deutlich schnellere Rotation in der Vergangenheit könnte dazu geführt haben, dass Gesteinsbrocken durch Fliehkräfte Richtung Äquator gerutscht sind. Durch diese Materieverteilung verlangsamte sich dann die Rotation bis auf den heutigen Wert. Ähnliche Prozesse haben wohl auch den erdnahen Asteroiden Bennu geformt, den derzeit die amerikanische Raumsonde OSIRIS-REx erkundet.

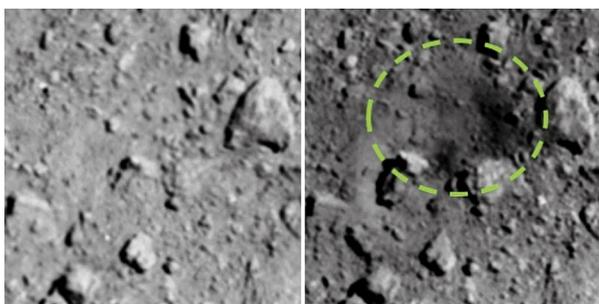


Abb. 5 Aufnahmen vom 22. März (links) und 25. April 2019. Der mehrere Meter große künstliche Krater ist durch die gestrichelte Linie markiert (Foto: JAXA, Univ. of Tokyo, Kochi Univ., Rikkyo Univ., Nagoya Univ., Chiba Institute of Technology, Meiji Univ., Univ. of Aizu).

Ryugu ist eine fragile Geröllhalde, durch einfache physikalische Prozesse in die seltsame Form gebracht und Zeuge aus der Frühzeit des Sonnensystems! Die sehr hohe Anzahl von Brocken auf der Oberfläche und das Fehlen von ebenen Regionen stellten allerdings große Herausforderungen für die Missionsplanung dar, sowohl für das Absetzen der Landeeinheiten, als auch für die Auswahl der Beprobungsstellen.

Die Untersuchung der dunklen Oberfläche mit dem Nahinfrarot-Spektrometer NIRS3 offenbarte eine praktisch homogene Zusammensetzung. Die Messungen lassen den Vergleich mit Meteoriten der Klasse der kohligten Chondrite



Abb. 7 Aufnahme während der zweiten Landung am 11. Juli. Rechts im Bild ist ein Teil des runden Sammelgerätes erkennbar (Foto: JAXA).

zu: Diese enthalten hohe Anteile an Kohlenstoff (mehrere Prozent) in Form von Graphit, Karbonaten und organischen Verbindungen, wie Aminosäuren. Zusätzlich weisen sie Wasser und Minerale auf, die durch Wassereinfluss verändert wurden. Die Spektren bestätigen überall auf Ryugus Oberfläche Hydroxylionen, also chemisch im Gestein gebundenes Wasser, allerdings in niedrigeren Konzentrationen als erwartet. Daraus lässt sich die Meteoritenanalogie noch verfeinern: Spezielle kohlige Chondrite, die durch Temperaturen bis etwa 600 °C oder Schockeinflüsse thermisch verändert wurden, gelten jetzt als bestes Analogon, zumindest bezüglich der extrem niedrigen Reflexivität und der schwachen Wassersignaturen in den Spektren. Diese Untersuchungen an Meteoriten sind enorm wichtig, um spätere Laboranalysen mit den Spektrometerdaten verknüpfen zu können und im entsprechenden geologischen Kontext einordnen zu können.

Die Altersbestimmung durch Anzahl, Formen und Ausdehnungen von Kratern führt zum Ergebnis, dass sich Ryugus Oberfläche stetig verändert. Eine komplette Umstrukturierung der obersten Schichten erfolgt in weniger als einer Million Jahren, hauptsächlich verursacht durch die steten Einschlagsereignisse im inneren Sonnensystem. Stetig kommt Material aus dem Inneren an die Oberfläche und verdeckt alte Kraternarben. Die Messergebnisse und geologischen Statistiken lassen weitere Schlüsse zu: So kann man davon ausgehen, dass Ryugu aus den Kollisionsbruchstücken eines mehrere zehn Kilometer großen Vorgängerasteroiden entstanden ist. Dieser muss in den kalten Regionen des Sonnensystems entstanden sein. Der Mutterkörper enthielt bereits Wasser und organische Verbindungen, die aber durch Hitzeeinwirkung teilweise verschwunden oder verändert worden sind. Als mögliche Wärmequelle kommen radioaktive Isotope wie ^{26}Al in Frage, die eine solch gleichmäßige Dehydratation bewirken können.

Viele dieser Hypothesen werden sich mit der Analyse der Bodenproben beantworten lassen: Der Wasseranteil, die Untersuchung der organischen Verbindungen oder die

Isotopenverhältnisse werden einen tieferen Einblick in Ort, Zeit und Umgebungsbedingungen der Entstehung gewährleisten. Am Ende geht es um die Frage nach dem Ursprung volatiler Elemente, wie organischer Materialien oder anderer Kohlenstoffverbindungen, und Wasser auf der Erde.

Im Dezember 2019 soll Hayabusa 2 den Rückflug zur Erde antreten und im Dezember 2020 die Kapsel mit den Proben über der Wüste von Australien abwerfen. Die Auswertung der Proben von verschiedenen Oberflächenregionen und dem Kraterinneren erfolgt im Anschluss in geeigneten Laboren weltweit. Spannend wird die Frage sein, ob die Proben Ähnlichkeiten mit Mineralien oder organischen Verbindungen auf der Erde zeigen. Das wären starke Indizien für eine enge Verknüpfung zwischen Asteroiden und dem Leben auf der Erde.

Zusammenfassung

Seit Juni 2018 untersucht die japanische Raumsonde Hayabusa 2 den Asteroiden Ryugu. Dieser nur 900 m große Körper besitzt eine scharfkantige, oktaederförmige Form. Die praktisch homogene Oberfläche mit einer Albedo von nicht einmal 5 % ist übersät mit Gesteinsbrocken. Spektren deuten auf Hydroxylionen, also chemisch im Gestein gebundenes Wasser, hin. Die sehr geringe Dichte spricht für eine hoch poröse Struktur und lässt sich am besten durch eine lose Geröllansammlung erklären. Es wurden zudem erfolgreich mehrere Landeeinheiten abgesetzt, unter anderem die kastenförmige Sonde MASCOT. Außerdem hat Hayabusa 2 Oberflächenmaterial entnommen, das im Dezember 2020 die Erde erreichen soll.

Stichwörter

Asteroiden, Hayabusa 2, MASCOT, Ryugu, Itokawa, Meteorite, kohlige Chondrite.

Literatur

- [1] S. Watanabe et al., *Science* **2019**, 364, 268.
- [2] S. Sugita, *Science* **2019**, 364, eaaw0422.
- [3] K. Kitazato et al., *Science* **2019**, 364, 272.

Der Autor



Thomas Müller studierte in Würzburg Physik und promovierte 1997 am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg. Daraufhin arbeitete in der ESA unter anderem an den europäischen Infrarot-Weltraumteleskopen ISO und Herschel. 2002 wechselte er an das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, wo er seit 2016 das EU-Projekt „Small Bodies Near and Far“ leitet.

Anschrift

Dr. Thomas Müller, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Gießenbachstraße 1, 85748 Garching. tmueller@mpe.mpg.de