



Milchstraße: Uwe Reichert; Sonde: Jaxa; Asteroid Ryugu: JAXA / Akihiro Ikeshita; Composing: SuW-Grafik

Ein Wanderfalken im

In diesen Tagen erreicht die Raumsonde Hayabusa-2 den kleinen Asteroiden Ryugu und wird ihn detailliert erforschen. Der Höhepunkt der japanischen Mission mit deutscher Beteiligung: die Rückführung von Gesteinsproben des Asteroiden zur Erde.

Von Thomas Müller

Der Fischer Urashima Tarō rettet einer Schildkröte das Leben. Zum Dank bringt sie ihn auf ihrem Rücken zum tief unter Wasser liegenden Drachenschloss Ryugu, das in der japanischen Mythologie als Kristallpalast mit fantastischen Gebilden aus roten und weißen Korallen beschrieben wird. Dort verbringt er drei sehr schöne Tage mit der Prinzessin Otohime und kehrt danach mit einer geheimnisvollen Schatulle zurück in sein Dorf. Zu

seinem Erstaunen sind im echten Leben inzwischen volle 300 Jahre vergangen, und der Fischer kommt in der Zukunft an. Trotz vieler eindringlicher Warnungen der Prinzessin öffnet er schließlich die Box und erlebt eine Überraschung ...

Auch die japanische Sonde Hayabusa-2, japanisch: Wanderfalken, soll von ihrer Mission zum Kleinplaneten Ryugu einige Souvenirs mitbringen, mit wissenschaftlichen Überraschungen und einer Kapsel, die mehrere Gesteinsproben der

Oberfläche enthält. Im Vergleich zum Unterwasserpalast Ryugu ist unser Bild vom Asteroiden (162173) Ryugu – früher als 1999 JU₃ bezeichnet – sehr bescheiden und unspektakulär. Das wird sich nun bald ändern (siehe Bild oben).

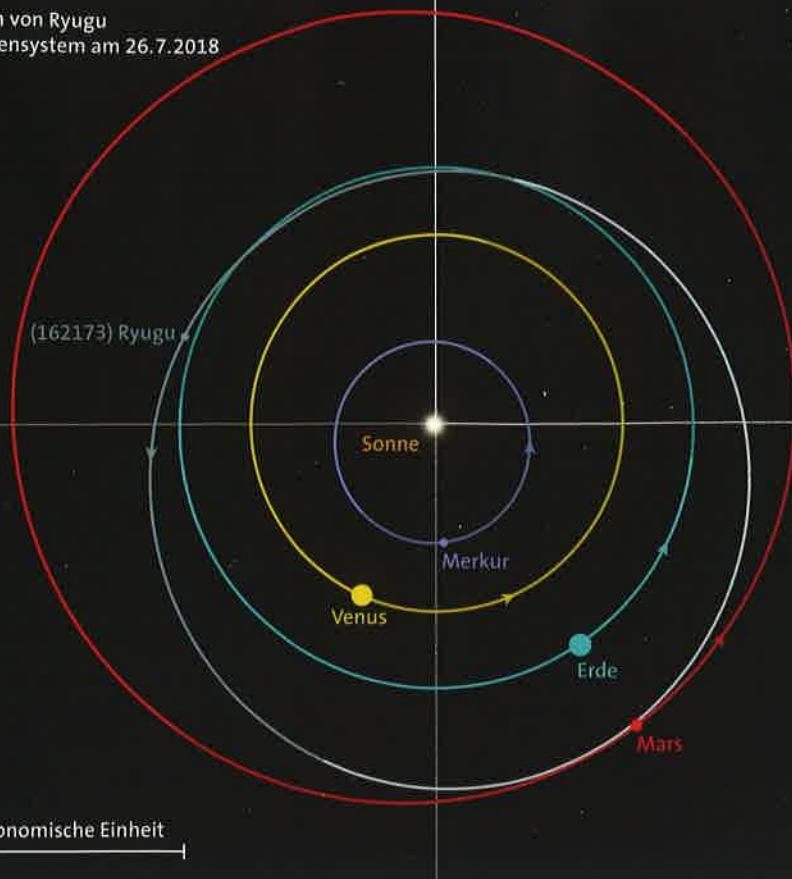
Die Herkunft von Ryugu

Vom menschlichen Auge unbeobachtet umrundet der Großteil der Kleinplaneten die Sonne im Asteroidengürtel zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter. Und

Mitte 2018 erreicht die japanische Raumsonde Hayabusa-2 ihr Zielobjekt, den rund 850 Meter großen Asteroiden Ryugu (künstlerische Darstellung).

Die Bahn von Ryugu im Sonnensystem am 26.7.2018

NASA / JPL-Caltech / suw-Grafik



Der Orbit des Kleinplaneten (162173) Ryugu (grau) schneidet die Erdbahn (blau) und reicht bis zur Umlaufbahn des Mars (rot) heran. Ryugu ist ein Asteroid des Apollo-Typs und könnte in ferner Zukunft die Erde treffen.

Königreich Ryugu

selbst mit den größten Teleskopen lässt sich bei den meisten nur ein leuchtstwarer Punkt erkennen. Die Details ihrer vielfältigen Formen, Farben, Zusammensetzungen, Oberflächenstrukturen oder eventueller Monde bleiben im Allgemeinen verborgen.

Auch der Ursprung des Kleinplaneten Ryugu befindet sich mit großer Sicherheit im Asteroidengürtel. Ein Szenario geht davon aus, dass durch eine große Kollision zweier Himmelskörper vor rund einer Milliarde Jahren viele kleinere Bruchstücke entstanden sind. Diese verändern ihre Bahn stetig, vor allem durch nichtgravitative Einflüsse wie den Jarkowski-Effekt. Hierbei sorgen ungleiche Absorption und Emission der einfallenden Sonnenstrahlung auf der Oberfläche dafür, dass über lange Zeit-

räume hinweg ein Impuls auf den Asteroiden übertragen wird, so dass sich dessen Bahn um die Sonne ändert. Schließlich erreichen die Himmelskörper kritische Resonanzonen, die vor allem durch die Schwerefelder von Jupiter und Saturn verursacht werden. Kommen sie dabei auf Bahnen, die sich in einer zeitlichen Resonanz – also einem ganzzahligen Verhältnis zu den Umlaufperioden von Jupiter oder Saturn – befinden, so werden sie auf extreme Bahnen katapultiert. Auch Ryugu könnte so ins Innere des Sonnensystems gelangt sein und ist jetzt für interplanetare Missionen wie Hayabusa-2 leicht erreichbar (siehe Grafik oben).

Der derzeitige Orbit von Ryugu liegt zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Erde, wobei es immer wieder zu engen Begegnungen mit unserem Heimat-

IN KÜRZE

- Nach ihrer Ankunft am kleinen Asteroiden (162173) Ryugu im Juni 2018 wird die japanische Raumsonde Hayabusa-2 den Himmelskörper eingehend erkunden.
- An der Mission sind auch deutsche Forschungseinrichtungen beteiligt, unter anderem mit dem Lander MASCOT.
- Der Höhepunkt des Flugs von Hayabusa-2 ist die Entnahme von Bodenproben des Asteroiden Ryugu und deren anschließender Transport zur Erde.

planeten kommt. So auch im Mai 1999, als der Kleinplanet von New Mexico aus zum ersten Mal gesichtet wurde. Das Perihel seiner Bahn, der geringste Abstand zur Sonne, liegt mit 0,96 Astronomischen Einheiten (AE) knapp innerhalb der Erdbahn; das Aphel, der sonnenfernste Punkt, beträgt 1,42 AE und kommt damit in die Nähe der Marsbahn. Die Bahnneigung erreicht etwa sechs Grad in Bezug auf die Erdbahnebene, die Ekliptik. Damit gehört Ryugu zu den Asteroiden des Apollo-Typs. Die nächsten nahen Erdbegegnungen ereignen sich im Dezember 2033 (0,047 AE, rund die 18-fache Entfernung Erde–Mond) und im Dezember 2076 (0,010 AE, rund die vierfache Mondentfernung).

Im Vergleich zum Alter des Sonnensystems von 4,6 Milliarden Jahren sind Objekte, welche die Erd- oder Marsbahn kreuzen, sehr kurzlebig. Über Millionen von Jahren hinweg könnte Ryugu – so wie viele andere als potenziell gefährlich eingestufte Asteroiden – auf der Erde oder dem Mars einschlagen. Auch ein Entweichen in die äußeren Bereiche des Sonnensystems ist denkbar.

Woraus besteht Hayabusas Ziel?

Aus der spektroskopischen Analyse des von Ryugu reflektierten Sonnenlichts wurde der Asteroid als C-Typ charakterisiert, das heißt, in seiner Oberfläche befinden sich größere Mengen an kohlenstoffhaltigen Mineralen und anderen Stoffen. Die spektroskopische Klassifizierung ist nicht eindeutig, aber der Vergleich mit Meteoriten deutet auf eine Verwandtschaft mit den kohligten Chondriten hin.

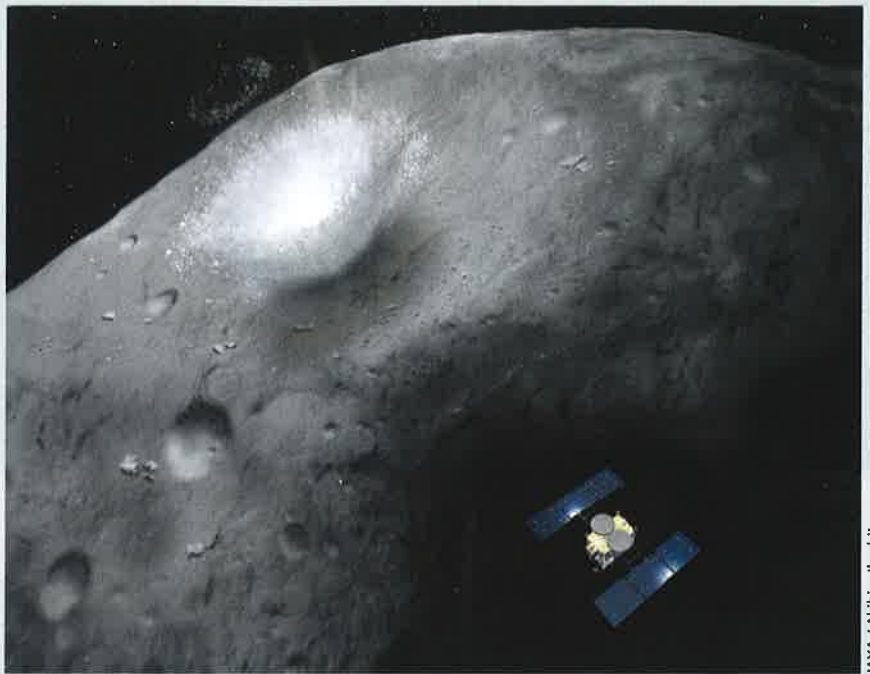
Diese sind eine besonders urtümliche Variante von Steinmeteoriten mit hohem Kohlenstoffanteil. Ihre Zusammensetzung ähnelt derjenigen der Sonne und des solaren Urnebels, allerdings ohne die leichtflüchtigen Elemente wie Wasserstoff und Helium. Bisher beobachtete nur die Sonde NEAR-Shoemaker im Jahr 1997 für wenige Stunden ein C-Typ-Objekt aus der Nähe, als sie auf dem Weg zu ihrem endgültigen Ziel den Asteroiden (253) Mathilde in geringem Abstand passierte.

Aber schon damals äußerten die Planetenforscher den Wunsch, dass den Objekten vom C-Typ mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Schließlich finden sich in den entsprechenden Meteoriten neben Graphit und Karbonaten auch organische Verbindungen, einschließlich

Die Mission Hayabusa-2 der japanischen Weltraumbehörde JAXA

Die Vorgängerin von Hayabusa-2, die Raumsonde Hayabusa zum Kleinplaneten (25143) Itokawa, erprobte vor allem neue Technologien. Sie brachte im Jahr 2010 nach einem siebenjährigen Flug trotz erheblicher technischer Probleme kleinste Mengen von Gesteinsproben von der Asteroidenoberfläche zur Erde zurück (siehe SuW 12/2006, S. 26, und SuW 1/2013, S. 44).

Der wissenschaftliche Schwerpunkt der Nachfolgemission Hayabusa-2 ist die möglichst detaillierte Erforschung des Kleinplaneten (162173) Ryugu. Dazu setzt die gegenüber ihrer Vorgängerin technisch erheblich verbesserte Sonde eine optische und eine infrarote Kamera ein. Zusätzlich ist sie mit einem Nahinfrarotspektrometer für mineralogische Studien, einem LIDAR-System zur dreidimensionalen Vermessung des Himmelskörpers und einer Vorrichtung zur Probenentnahme ausgerüstet, mit der



JAXA / Akihiro Ikeshita

Mittels einer zuvor abgesetzten Sprengladung wird ein zwei Kilogramm schweres Kupferprojektil mit großer Wucht in den Asteroiden Ryugu gefeuert, um frisches Material für die Entnahme von Bodenproben freizulegen. Die Sonde verbirgt sich hinter Ryugu zum Schutz vor umherfliegenden Splintern (künstlerische Darstellung).

Aminosäuren. Zudem enthalten sie Wasser und durch Wasser veränderte Minerale. Somit stehen diese Himmelskörper zumindest aus chemischer Sicht in engem Zusammenhang mit dem Entstehen der ersten primitiven Lebensformen und der Herkunft des Wassers auf der Erde.

Analog zu den kohligten Chondriten könnte Ryugus Oberfläche auch Kalzium-Aluminium-reiche Einschlüsse (CAIs) enthalten. Damit hätte man Zugriff auf unveränderte Kondensate aus dem frühen solaren Urnebel.

Es dürfte also spannend werden, wenn Hayabusa-2 Mitte des Jahres bei Ryugu ankommt und dann einige Wochen später

verschiedene Landeeinheiten Messungen direkt auf der Oberfläche durchführen (siehe Kasten oben). Laut dem Missionsplan sollen an ausgewählten Stellen Gesteinsproben entnommen werden, zudem wird mit Sprengstoff ein künstlicher Krater auf Ryugu erzeugt. Danach fliegt die Sonde nochmals bis auf wenige Zentimeter an den Asteroiden heran und sammelt von den frisch freigelegten Gesteinen eine weitere Bodenprobe ein. Die Mission soll vor allem wichtige wissenschaftliche Fragestellungen beantworten. Aber auch die geplanten komplexen technischen Flugmanöver sind faszinierend und werden neue Maßstäbe setzen.

mindestens 100 Milligramm des Asteroidenmaterials für den Transport zur Erde gewonnen werden sollen.

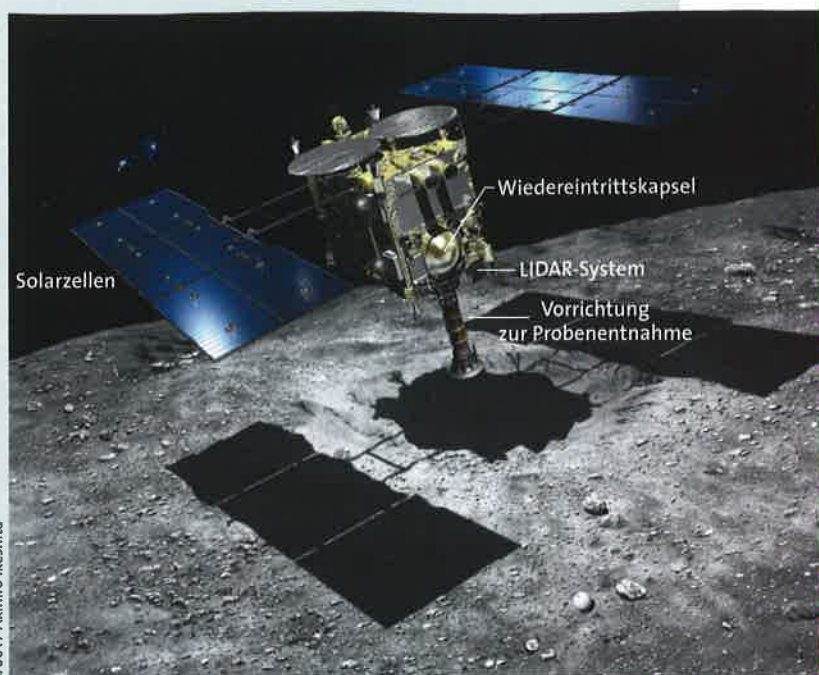
Ergänzt wird Hayabusa-2 durch die Landeeinheiten MASCOT und MINERVA-II. Der Lander MASCOT, der »Mobile Asteroid Surface Scout«, hat eine Masse von zehn Kilogramm und ist mit einem Infrarotspektrometer, einem Magnetometer, einem Radiometer und einer Kamera ausgestattet. Durch einen speziellen Mechanismus kann MASCOT mehrmals Sprünge auf der Oberfläche von Ryugu ausführen und somit verschiedene Orte erkunden, bis nach maximal einem Tag die Batterien erschöpft sind. Die Sonde wurde gemeinsam vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR und der französischen Raumfahrtbehörde CNES entwickelt und gebaut.

Die drei je nur rund ein Kilogramm schweren Landeeinheiten MINERVA-II stammen von der JAXA und sind mit miniaturisierten Kameras und Temperatursensoren ausgerüstet. Sie dienen der Erkundung der Oberfläche unmittelbar vor der Entnahme von Bodenproben.

Eine Subsonde, der Small Carry-on Impactor SCI mit 4,5 Kilogramm Sprengstoff, soll zudem einen künstlichen Krater erzeugen. Dafür schießt sie ein zwei Kilogramm schweres Projektil aus Kupfer mit einer Geschwindigkeit von zwei Kilometern pro Sekunde in die Oberfläche. Den Vorgang beobachtet eine vorher abgesetzte frei fliegende Kamera, während sich das Mutterschiff zum Schutz vor Splittern hinter dem Kleinplaneten verbirgt.

Die rund 600 Kilogramm schwere Sonde startete am 3. Dezember 2014 mit einer Trägerrakete vom Typ H-IIA vom japanischen Weltraumbahnhof Tanegashima. Hayabusa-2 ist quaderförmig mit den Dimensionen $2 \times 1,6 \times 1,25$ Meter und ist mit einem Ionenantrieb für Bahnänderungen ausgestattet. Die Raumsonde passierte genau ein Jahr nach dem Start Erde und Mond, wobei ihr eindrucksvolle Aufnahmen im sichtbaren und infraroten Licht von beiden Himmelskörpern gelangen (siehe SuW 2/2016, S. 17).

Am 26. Februar 2018 erfasste die optische Kamera der Sonde erstmals das Zielobjekt (siehe Bild S. 38 Mitte). Mitte 2018 soll Hayabusa-2 in eine Umlaufbahn um Ryugu einschwenken. Nach rund anderthalb Jahren im unmittelbaren Umfeld des



JAXA / Akihiro Ikeshita

Die Raumsonde Hayabusa-2 wird mit einem speziellen Ausleger (unten) Bodenproben vom Asteroiden Ryugu entnehmen. Dafür nähert sich die Raumsonde der Oberfläche des Himmelskörpers bis auf wenige Zentimeter an (künstlerische Darstellung).

Kleinplaneten beginnt die Sonde im Dezember 2019 mit dem Rückflug zur Erde. Genau ein Jahr später nähert sich Hayabusa-2 unserem Planeten dicht an und wirft die Probenkapsel ab. Diese tritt in die Erdatmosphäre ein und geht in Australien nieder. Die Kapsel wird daraufhin schnellstmöglich geborgen, während das Mutterschiff an der Erde vorbeifliegt und zu einem anderen Ziel im Sonnensystem aufbricht. Schon bald nach der Bergung der Gesteinsproben wird die JAXA kleine Mengen davon an geeignete Labore weltweit für detaillierte mineralogisch-chemische Untersuchungen verteilen.

Was wissen wir derzeit über Ryugu?

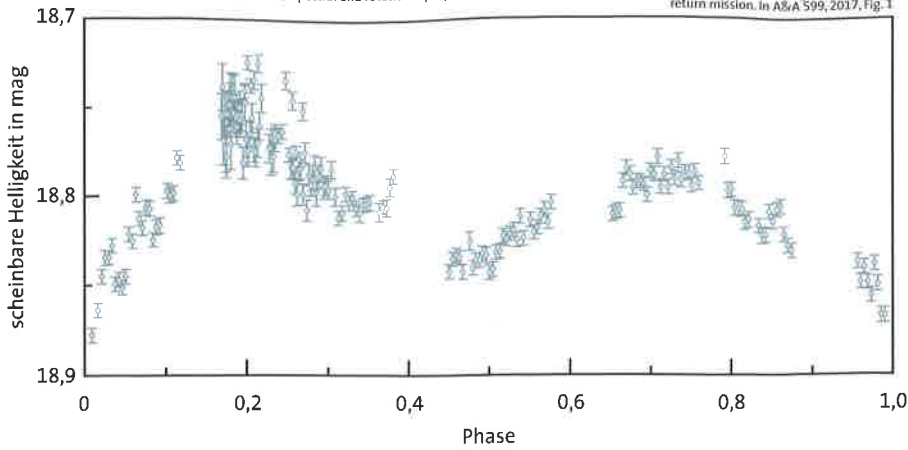
Aus den in den letzten zwei Jahrzehnten wiederholt gemessenen Lichtkurven leiten die Forscher eine Rotationsperiode des Himmelskörpers von 7,63 Stunden ab, dabei deutet sich eine retrograde Rotation an (siehe Grafik S. 38 oben). Im Lauf der Jahre wurde der Kleinplanet aus unterschiedlichen Blickwinkeln beobachtet. Meist reicht das aus, um grob die Gestalt des Objekts und die Lage der Rotationsachse bestimmen zu können. Doch im Fall von Ryugu sind die Ergebnisse dieser Standardverfahren nicht eindeutig. Auf Grund der geringen Helligkeitsschwan-

kungen gehen die Forscher bei ihm von einer annähernd runden Form aus. Über die Lage der Rotationsachse gibt es derzeit nur Spekulationen, die hauptsächlich auf Interpretationen von Messungen im thermischen Infrarotbereich basieren. Alle verfügbaren fotometrischen Messungen im sichtbaren Licht und im Infraroten führen zu einem Objekt mit einem Durchmesser zwischen 850 und 880 Meter, das nur etwa fünf Prozent des auftreffenden Sonnenlichts reflektiert. Es ist damit sehr dunkel, etwa vergleichbar mit Steinkohle.

Die Infrarotmessungen spielen bei der Interpretation eine sehr große Rolle, da sie mit den Temperaturen auf der Oberfläche

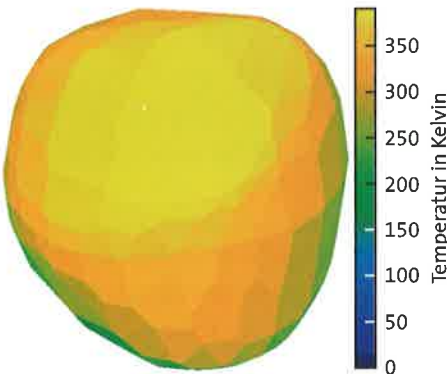
von Ryugu verknüpft sind (siehe Bild S. 38 Mitte). Aus den Daten lassen sich Rückschlüsse auf die thermische Leitfähigkeit, die Wärmekapazität, die Dichte und die Korngrößen des Oberflächenmaterials ziehen. Diese Kenngrößen können nun in wenigen Wochen direkt vor Ort bestimmt werden. Die derzeitigen thermischen Modelle deuten darauf hin, dass die Oberfläche von Ryugu sehr glatt sein könnte. Dies ist schwer vorstellbar, sieht man sich die Bilder von anderen vergleichbaren Kleinplaneten an, die meist sehr unregelmäßig geformt sind.

Auch wenn sich die genannten Werte eher unspektakulär anhören, so zeugen



Im Juli 2016 beobachtete das Very Large Telescope der ESO in Chile den Asteroiden Ryugu, wobei diese Lichtkurve entstand. Der Asteroid rotiert mit einer Periode von 7,63 Stunden.

SuW-Grafik, nach: Müller, T. et al.: Hayabusa-2 mission target spin-axis orientation. In: A&A 599, A103, 2017, Fig. 16



Aus den mit erdgebundenen Teleskopen gewonnenen Lichtkurven und thermischen Messungen wurde ein dreidimensionales Modell von Ryugu errechnet. Die Temperaturen in Kelvin wurden für die Ankunft von Hayabusa-2 im Juli 2018 ermittelt.

JAXA, University of Tokyo, Kochi University, Rikkyo University, Nagoya University, Chiba Institute of Technology, Meiji University, University of Aizu and AIST



Am 26. Februar 2018 fotografierte die japanische Raumsonde Hayabusa-2 erstmals ihr Zielobjekt, den Asteroiden (162173) Ryugu, aus einer Entfernung von rund 1,3 Millionen Kilometern im Sternbild Fische.



THOMAS MÜLLER promovierte an der Universität Heidelberg im Fach Astronomie und arbeitet seit 2002 beim Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Garching. Er ist Teil des

Hayabusa-2-Forschungsteams der japanischen Weltraumbehörde JAXA. Seit April 2016 koordiniert er ein EU-gefördertes Projekt zum Thema Kleinplaneten in unserem Sonnensystem.

sie von einem extrem spannenden Prozess in der astronomischen Forschung: Verschiedene Wissenschaftlergruppen untersuchten in den letzten zwanzig Jahren den Asteroiden zu günstigen Zeitpunkten. Anschließend erstellten sie aus den Messungen ein möglichst realistisches Modell von Ryugu, was sich in bisher mehr als 60 wissenschaftlichen Publikationen niederschlug. All diese aus der Ferne ermittelten Ergebnisse lassen sich nun schon in wenigen Wochen vor Ort mit der Wirklichkeit vergleichen: Wer lieferte die besten Vorhersagen? Wie gut beschreiben die aus den Messungen eines Lichtpunkts entwickelten Modelle die Realität? Warum schlagen manche Modellrechnungen fehl? Inwieweit lassen sich die Ergebnisse auf andere Objekte übertragen? Welche Überraschungen gibt es? Dieser Prozess ist

enorm wichtig, da man schließlich nicht alle potenziell gefährlichen oder wissenschaftlich spannenden Asteroiden durch Raumsonden erkunden kann.

Hayabusa-2 wird voraussichtlich im Dezember 2020 die Kapsel mit den Oberflächenproben von Ryugu zur Erde zurückbringen. In der japanischen Mythologie öffnet der Fischer Urashima Tarō verbotenerweise die Schatulle aus dem Reich Ryugu: Beim Blick ins Innere wird er augenblicklich zum Greis. Um unerfreuliche Überraschungen beim Öffnen der Probenkapsel zu vermeiden, werden höchste Vorkehrungen in Hinblick auf Sicherheit und potenzielle Kontaminationen getroffen, um jegliches Risiko auszuschließen. Schließlich sollen die Ergebnisse uns einen tiefen Einblick in das urzeitliche Sonnensystem gewähren.

Literaturhinweise

- Althaus, T.:** Raumsonde Hayabusa-2: Erdvorbeiflug gelungen! In: *Sterne und Weltraum* 2/2016, S. 17
- Krüger, H.:** Die Beute des Wanderfalcons – Staub vom Asteroiden Itokawa ist nun analysiert. In: *Sterne und Weltraum* 1/2013, S. 44–48
- Müller, T.:** Ein Kleinplanet unter der Lupe – Die japanische Raumsonde Hayabusa erkundet den Asteroiden Itokawa. In: *Sterne und Weltraum* 12/2006, S. 26–34

Dieser Artikel und Weblinks unter:
www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1564748

Didaktische Materialien:
www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1051547