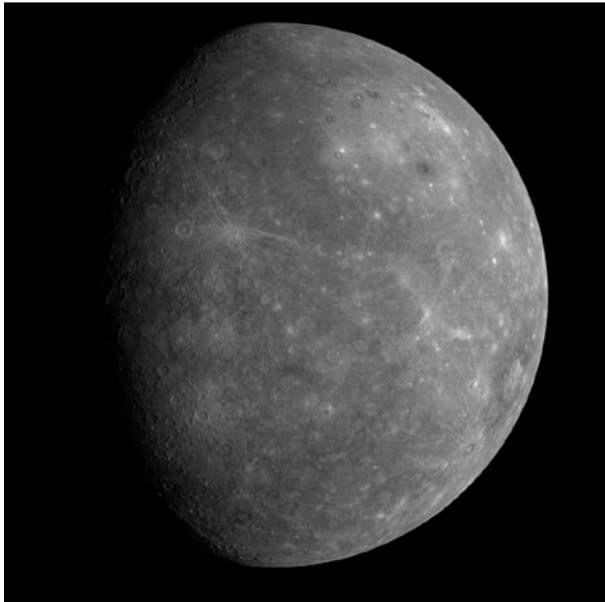


## Fernerkundung und Kartografie im Sonnensystem

In Bezug zu einer Nachricht in »Sterne und Weltraum« 3/2011, S. 12 („Raumsonde Messenger erreicht Merkur“)  
Carolin Liefke

Der sonnennächste Planet Merkur ist nach wie vor nur wenig erforscht. Die US-amerikanische Mission Messenger soll als erste Raumsonde in eine Umlaufbahn um den Planeten einschwenken und im Anschluss seine Oberfläche vollständig kartieren, sein Magnetfeld und seine Elementzusammensetzung vermessen und seine Atmosphäre untersuchen. Für das Jahr 2014 ist zusätzlich der Start der europäischen Merkur-Mission BepiColombo vorgesehen, die sich ebenfalls an der Erkundung des Merkur beteiligen soll.



**Abbildung: Gesamtansicht des Merkur, aufgenommen von Messenger beim ersten Flyby im Januar 2008. (Quelle: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Carnegie Institution of Washington)**

Von der Erde aus gesehen ist der Merkur aufgrund seiner Nähe zur Sonne nur schwer zu beobachten. Auch mit größeren Teleskopen lassen sich anstelle von Oberflächenstrukturen nur einfache Schattierungen erkennen. Erst die Vorbeiflüge der Raumsonde Mariner 10 in den Jahren 1974 und 1975 konnten zeigen, dass der Merkur ähnlich wie der Mond von Kratern übersät ist, und dass er wie erwartet nur eine sehr dünne Atmosphäre ausweist. Eine Überraschung war dagegen die Entdeckung eines schwachen Magnetfelds. Mariner 10 konnte allerdings nur knapp 45 % der Merkuroberfläche abbilden. Über 30 Jahre lang war daher nach wie vor das Aussehen von über der Hälfte der Merkuroberfläche unbekannt. Nach den drei Vorbeiflügen von Messenger an Merkur ist die Abdeckung inzwischen auf 95 % gestiegen. Die Hauptmission der Sonde, zu der dann auch die detaillierte Kartierung der Oberfläche gehört, beginnt allerdings erst mit dem Einschwenken der Sonde in die Umlaufbahn.

In einem [Gruppenversuch](#) sollen Schüler anhand des Beispiels ‚Messenger und Merkur‘ nachvollziehen, wie eine Raumsonde einen Himmelskörper systematisch kartiert und Überlegungen zur Orientierung der Sonde und ihrer Umlaufbahn anstellen. Dabei lernen sie außerdem, Eigenschaften von fotografischen Abbildungen qualitativ zu beschreiben.

Anhand eines Puzzles aus einem vollständigen Satz von Bildern der Mondoberfläche lernen die Schüler die Problematik der Erstellung von zweidimensionalen Karten kugelförmiger Körper kennen und werden so an das Konzept von [Kartenprojektionen](#) herangeführt.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Planeten, Raumfahrt	Merkur, Planetenoberflächen, Planetenbewegung, Raumsonden
Physik	Optik	<a href="#">Gesichtsfeld</a> , <a href="#">Auflösungsvermögen</a> , <a href="#">Verzeichnung</a> , <a href="#">Perspektive</a> , <a href="#">Schärfentiefe</a> , <a href="#">Beleuchtungsverhältnisse</a>
Fächer- verknüpfung	Astro-Geo	Planetenerkundung, <a href="#">Kartenerstellung</a> , <a href="#">Kartenprojektion</a>
Lehre allgemein	Kompetenzen (Erkenntnis, Bewertung, Kommunikation), Unter- richtsmittel	<a href="#">Gruppenarbeit</a> , <a href="#">Partnerarbeit</a> , <a href="#">Experiment</a> , <a href="#">Dokumentation</a> , <a href="#">Auswertung</a> , <a href="#">Arbeitsblatt</a> , <a href="#">Berechnungen</a> , Puzzle, Modellversuch

## Versuchsanleitung: Planetenerkundung

Wir wollen mit einem Modellversuch nachstellen, wie die Raumsonde Messenger bei der Kartierung des Planeten Merkur arbeitet.

Dazu benötigen wir

- einen Globus, der den Merkur darstellen soll
- eine helle Strahlerleuchte als Sonnenersatz
- Deine Handy- oder Digitalkamera, die wie die Kamera von Messenger arbeiten soll
- leere Toilettenpapierrollen, Papierstreifen, runde Stifte und Klebeband



Abbildung 1: Herstellung der Blende

Um Deine Kamera in eine Raumsondenkamera zu verwandeln, muss sie noch mit einer Schutzblende versehen werden. Für eine Handykamera nimmst Du dazu einen etwa 2 cm breiten und 10 cm langen Papierstreifen und wickelst ihn locker auf den Stift auf, so dass eine kleine Papierröhre mit etwa 1 cm Durchmesser entsteht. Klebe das Ende des Streifens fest, damit er sich nicht wieder abrollt.

Das Röhrchen befestigst Du dann mit Klebeband so über der Linse der Handykamera an, dass die Linse genau in der Mitte der Röhre sitzt. Bei einer Digitalkamera verwendest Du anstelle der Papierröhre eine leere Toilettenpapierrolle, die Du mit Klebeband vor dem Kameraobjektiv anbringst. Wähle im Menü der Kamera den Makro-Modus zur Fotografie von kleinen Gegenständen aus und stelle den Zoom hoch.



Abbildung 2: Fertig präparierte Kameras

Der Globus sollte etwas erhöht, aber von allen Seiten frei zugänglich in der Mitte des Raumes stehen, zum Beispiel auf einem Hocker oder einem kleinen Tisch. Die Sonne beleuchtet immer nur eine Hälfte des Merkur, so dass Messenger auf der dunklen Nachtseite des Planeten keine Bilder machen kann. Dazu verdunkeln wir den Raum und beleuchten aus mehreren Metern Abstand mit dem Strahler den Globus.



Abbildung 3: Beispiel für die Position der Raumsondenkamera

Richte die Kamera auf das Merkurmodell aus. Nimm mit der Kamera Bilder oder Videos auf, um Deine Beobachtungen zu dokumentieren.

- Was verändert sich an den Bildern, wenn sich die Raumsonde nahe am Planeten oder weiter weg befindet?
- Wie nah kann Deine „Raumsondenkamera“ heran, bis das Bild unscharf wird?
- Wie sehen die Bilder aus, wenn die Kamera statt auf die Mitte des Planeten auf seinen Rand gerichtet ist?

Bewege die Kamera so um den Globus herum ohne ihn aus dem Bildfeld der Kamera zu verlieren, so wie sich Messenger entlang seiner Umlaufbahn um den Merkur bewegt.

- Wie schnell darf sich die Raumsondenkamera bewegen, ohne dass Bilder und Videos unscharf werden?



Abbildung 4: Aufnahme der Kamera

Die Messenger-Kamera ist immer auf den Mittelpunkt des Planeten gerichtet. Überlege was mit der Umlaufbahn der Raumsonde passieren muss, damit Messenger die gesamte Oberfläche des Merkur kartieren kann.

Die Jahreszeiten auf der Erde entstehen durch die Neigung der Erdachse, die dafür sorgt, dass an gegenüberliegenden Stellen der Erdumlaufbahn mal die eine und mal die andere Halbkugel der Erde zur Sonne zeigt und stärker aufgewärmt wird. Die Rotationsachse des Merkur steht senkrecht auf seiner Umlaufbahn. Was ergibt sich daraus für die Kartografie von Erde und Merkur?

## Aufgaben

1. Der Merkur hat einen Durchmesser von 4880 km. Miss den Durchmesser des Globus und berechne wie die Umlaufbahn von Messenger in unserem Modellversuch aussehen würde. Vergleiche mit deinen Versuchsergebnissen. Die Raumsonde ist in Wirklichkeit etwa 3 m groß. Vergleiche mit deiner Kamera.
2. Die Erde dreht sich in 23 Stunden und 56 Minuten einmal um sich selbst (Sterntag,  $360^\circ$ ). Weil sie sich gleichzeitig aber auch noch innerhalb eines Jahres oder genauer gesagt in 365,25 Tagen um die Sonne dreht, dauert der Sonnentag 24 Stunden (rund  $361^\circ$ ). Auch auf dem Merkur gibt es Tag und Nacht, sie laufen allerdings ganz anders ab als auf der Erde. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt der Merkur 88 Erdentage. Gleichzeitig dreht er sich einmal in 59 Tagen um sich selbst. Das bedeutet also, dass der Merkur sich nach zwei Umläufen um die Sonne genau dreimal um sich selbst gedreht hat. Skizziere die Drehbewegungen der Planeten um sich selbst und um die Sonne für Erde und Merkur. Wie lange dauert es auf dem Merkur von Sonnenaufgang bis Sonnenaufgang? Was bedeutet das für die Messungen von Messenger?

## Hinweise für den Lehrer zum Versuch

Als Merkur-Modell bietet sich ein Mondglobus an, nicht nur wegen der Ähnlichkeit der Oberfläche, sondern auch wegen der vernachlässigbaren Achsneigung des Merkur, denn Mondgloben sind im Allgemeinen ebenfalls ohne Neigungswinkel ausgeführt. Es kann aber auch ein normaler Erdglobus verwendet werden. Je größer der Globus, desto besser die Ergebnisse.

Die verwendete Lichtquelle muss möglichst hell und gerichtet sein, nur so werden Tag und Nacht auf dem Globus gut sichtbar. Verwendet werden können beispielsweise Strahlerleuchten oder auch Overheadprojektoren.

Der Schärfebereich wird für die verschiedenen Kameras der Schüler stark unterschiedlich sein. Im Allgemeinen endet er bei Handykameras bei Abständen größer 30 cm. Mit Digitalkameras ist die Schärfe insgesamt wesentlich besser, im Makro-Modus wird man bis auf wenige Zentimeter an den Globus herangehen können. Dies verhindert allerdings die Toilettenpapierrolle. Beide Kameratypen sind mit Weitwinkelobjektiven ausgestattet, so dass man ihr Gesichtsfeld künstlich einschränken muss um die Verzeichnungen der Globusoberfläche in den Bildecken zu unterdrücken. Eine lichtdichte Abdeckung ist nicht notwendig.

Bei den Digitalkameras sollte der optische Zoom auf maximal eingestellt sein, der Digitalzoom allerdings deaktiviert werden.

Grundsätzlich könnten die Schüler den Versuch auch allein zuhause durchführen, die Durchführung in einer größeren Gruppe fördert jedoch wesentlich besser die Bewertungs- und Kommunikationskompetenzen. Stehen mehrere Globen zur Verfügung, sollten sich die Schüler auch in mehrere Gruppen aufteilen. Es können maximal zwei Schüler gleichzeitig mit ihren Kameras Umlaufbahnen darstellen. Dennoch sollte möglichst jeder Schüler mehrfach die Gelegenheit haben, Bilder oder Videos aufzunehmen. Die Schüler sollen sich während der ganzen Zeit untereinander austauschen und die verschiedenen Fragestellungen möglichst selbstständig gemeinsam ausarbeiten.

Die wichtigen Aspekte, die die Schüler erarbeiten sollen, sind die Beobachtungsgeometrie und Abbildungseigenschaften:

- Gesichtsfeld: Solange man sich mit der Kamera nicht zu weit weg von dem Globus befindet, skaliert die abgebildete Oberfläche in etwa linear mit dem Abstand.
- Auflösungsvermögen: Geht man näher an den Globus heran, lassen sich mehr Details erkennen, zum Beispiel Beschriftungen lesen.
- Verzeichnung: In den Randbereichen des Bildes wird trotz Einschränkung des Gesichtsfelds die Wölbung der Kugeloberfläche des Globus sichtbar. Die Verzeichnungen der Planetenoberfläche sind um so deutlicher zu erkennen, je größer der Aufnahmeabstand ist.
- Perspektive: Die Kugelform der Oberfläche wird bei Aufnahmen, die den Globusrand zeigen, deutlich sichtbar. Am Globusrand treten perspektivische Verzerrungen auf und die Erkennbarkeit von Details wird schlechter.
- Schärfentiefe: Die Randbereiche werden nicht mehr scharf abgebildet, wenn auf den inneren Bereich fokussiert ist und umgekehrt.

Das entscheidende Resultat hierbei ist, dass die Kamera die besten Ergebnisse erzielt, wenn sie auf den Mittelpunkt des Globus ausgerichtet ist, also senkrecht auf die Oberfläche schaut. Die Raumsonde sollte sich außerdem möglichst nah am Planeten befinden um mit ihren Aufnahmen die höchstmögliche Detailgenauigkeit zu erreichen und Verzerrungen des Bildfeldes zu vermeiden.

Je nach Kenntnisstand und Fähigkeiten der Schüler lassen sich dann die Bewegungsvorgänge von Raumsonde und Planet veranschaulichen:

- **Maximalgeschwindigkeit:** Je nach Lichtstärke der Kameras und den Beleuchtungsverhältnissen lässt sich eine „Umlaufdauer“ bestimmen, ab der die Schärfe nicht mehr gegeben ist. Zum Vergleich: Die Maximalgeschwindigkeit von Messenger relativ zum Merkur wird 3,8 km/s betragen. Dieser Wert lässt sich auf den Maßstab des Globusmodells umrechnen. Ein Umlauf der Raumsonde wird 12 Stunden dauern.
- **Änderung der Umlaufbahn:** Würden außer dem Umlauf der Sonde um den Planeten keine weiteren Bewegungsvorgänge auftreten, würde die Kamera der Sonde nach einem Umlauf wieder auf den Ausgangspunkt auf der Oberfläche treffen. Es gelänge also nur die Beobachtung entlang eines Großkreises. Damit dennoch die gesamte Oberfläche des Planeten kartiert werden kann, muss sich die Bahnebene relativ zur Oberfläche verschieben. Ändern könnte sich dabei entweder die Umlaufbahn selber oder die Orientierung des Planeten. (Achtung: Für die Schüler ist es nicht notwendigerweise selbstverständlich, dass der Mittelpunkt des Merkur immer in der Bahnebene der Raumsonde liegt, die Sonde den Planeten also nicht beispielsweise entlang von Breitengraden „scheibchenweise“ kartieren kann).
- **Eigenrotation des Merkur:** Während der Wechsel von Tag und Nacht verhindert, dass Messenger während seines gesamten Umlaufs Bilder machen kann (andere Instrumente an Bord der Sonde wie beispielsweise das Laser-Höhenmessgerät sind davon nicht beeinflusst), stellt die Eigenrotation des Merkur aber die Lösung für die notwendige Verschiebung der Umlaufbahn relativ zur Oberfläche dar.
- **Achsneigung:** Im Gegensatz zur Erde, wo durch die Neigung der Rotationsachse um 23,5 Jahreszeiten entstehen und Phänomene wie Mitternachtssonne und Polarnacht auftreten, bleiben Sonnenstand und Tageslänge auf dem Merkur immer gleich.

Zur Kartografie wäre daher eine polare Umlaufbahn am günstigsten, also eine Umlaufbahn die entlang der Pole führt. Eine Umlaufbahn entlang des Äquators dagegen würde die Eigenrotation überhaupt nicht nutzen, um neue Regionen der Oberfläche in den Messbereich der Kamera zu bringen. Tatsächlich lässt sich eine perfekt polare Bahn für die Sonde allerdings nicht realisieren, die Bahn von Messenger wird um ca. 83° gegen die Umlaufbahn geneigt sein.

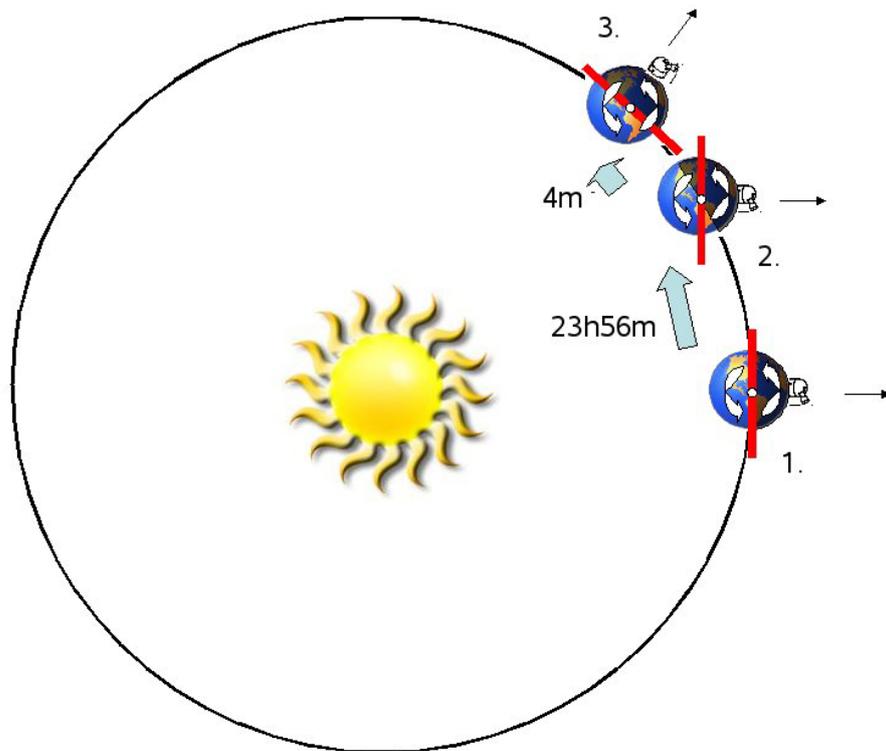
## Lösungshinweise zu den Aufgaben

- Die Schüler entnehmen dem SuW-Artikel die Zahlenwerte für die merkurnächsten und -fernsten Punkte der Umlaufbahn von Messenger von 200 km und 15200 km. Die maßstabsgetreuen Abstände lassen sich dann mithilfe einer Verhältnisgleichung ermitteln.

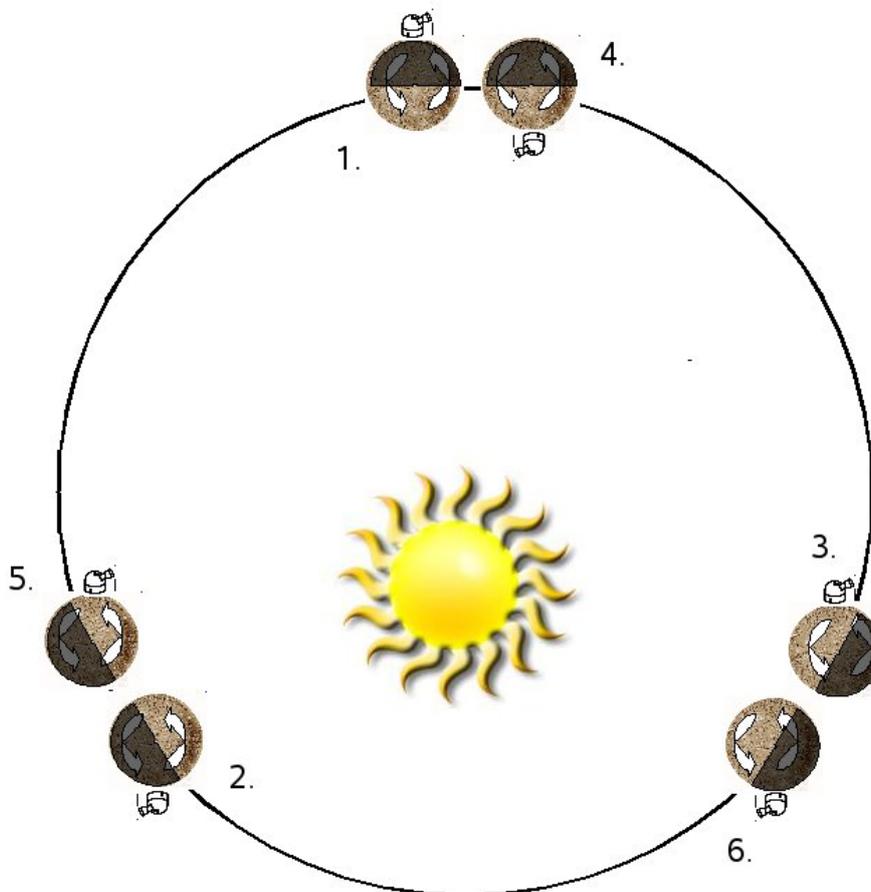
Für einen typischen Globusdurchmesser von 30 cm ergäben sich beispielsweise 1,2 cm und 93 cm. Die Umlaufbahn von Messenger lässt sich also in dem Versuch prinzipiell recht gut maßstabsgetreu nachstellen. Allein der merkurnächste Punkt der Umlaufbahn läge so nah an der Oberfläche des Globus, dass man die Kamera vermutlich nicht mehr scharf gestellt bekäme.

Mit derselben Verhältnisgleichung ergibt sich für Messenger eine Modellgröße von etwa  $1/5 \mu\text{m}$ , also etwa die Größe eines Viruspartikels. Bei einer typischen Größe von 10 cm sind die verwendeten Kameras also etwa um einen Faktor 2.000.000 zu groß.

- Die Veranschaulichung von Sterntag und Jahreslauf lässt sich am besten mithilfe eines Beobachters auf der Erde (hier die kleine Sternwarte) verdeutlichen, der sich von Punkt 1 ausgehend nach einer Umdrehung der Erde zwar wieder an dieselbe Stelle am Himmel schaut (Punkt 2), für den aber noch nicht wie am Tag zuvor Mitternacht ist, wie man an der Lage der Tag-und-Nacht-Grenze ablesen kann. Um diese Stellung zu erreichen, muss sich die Erde noch ein Stück weiterdrehen (Punkt 3). Der Tag verlängert sich damit um den Unterschied von vier Minuten.



Da die Rotationsdauer der Erde wesentlich kleiner ist als die Zeit für einen Umlauf um die Sonne, fällt dieser Effekt kaum auf. Beim Merkur dagegen haben Sterntag und Umlaufdauer dieselbe Größenordnung, die Verzögerung fällt also deutlich größer aus. Eine hypothetische Sternwarte auf dem Merkur beginnt wieder am Punkt 1, hat nach einer halben Umdrehung  $\frac{1}{3}$  der Umlaufbahn hinter sich gelassen (Punkt 2), aber erst nach  $\frac{2}{3}$  des Umlaufs um die Sonne (Punkt 3) ist  $\frac{1}{3}$  des Merkur-Tages bzw. der Merkur-Nacht abgelaufen. Die Nacht schreitet zwar voran, der Richtungswinkel zur Sonne aber auch. Erst nach zwei vollständigen Umläufen um die Sonne und drei Umdrehungen um die eigene Achse ist der Merkurtag abgelaufen. Er dauert also 176 Erdentage. Wir vernachlässigen durchgehend die deutlich ellipsenförmige Umlaufbahn des Merkur.



Die folgenden Animationen lassen sich zusätzlich zur Verdeutlichung heranziehen:

[http://www.messenger-education.org/Interactives/ANIMATIONS/Orbit\\_Rotation/orbit\\_rotation\\_full.htm](http://www.messenger-education.org/Interactives/ANIMATIONS/Orbit_Rotation/orbit_rotation_full.htm)

[http://www.messenger-education.org/Interactives/ANIMATIONS/Day\\_On\\_Mercury/day\\_on\\_mercury\\_full.htm](http://www.messenger-education.org/Interactives/ANIMATIONS/Day_On_Mercury/day_on_mercury_full.htm)

## Kartenprojektionen

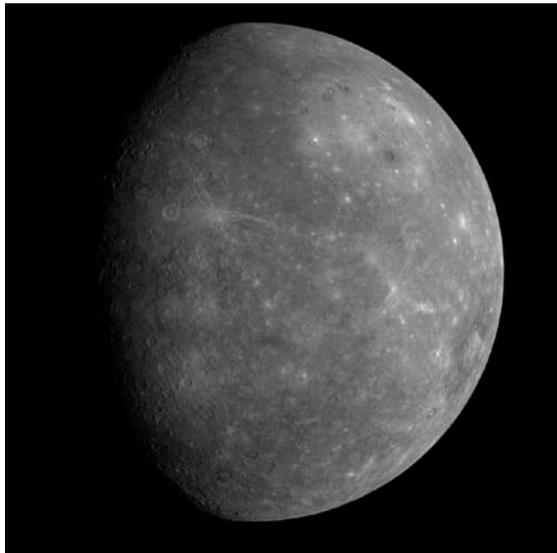


Abbildung 1: Merkur aufgenommen von Messenger beim Vorbeiflug im Januar 2008.

Wie kommt man von den Bildern einer Raumsonde, so wie Messenger sie vom Merkur erstellen soll, zu einer Kartenansicht des Planeten? Diese Fragestellung wollen wir im Folgenden untersuchen.

Zunächst einmal müssen die Einzelbilder zusammengesetzt werden. Da vom Merkur noch keine vollständigen Daten der Oberfläche vorhanden sind, verwenden wir stattdessen eine Bilderserie des Mondes, die aus Daten der US-amerikanischen Raumsonde Clementine erstellt wurde.

Schneide die 30 Einzelbilder aus und füge das „Mondpuzzle“ zusammen. Welche Schwierigkeiten treten dabei auf?

In der Kartografie steht man vor dem Problem, die Oberfläche eines Planeten oder auch des Mondes möglichst exakt abzubilden. Die beste Übereinstimmung erreicht man mit einem **Globus**. Dabei handelt es sich um eine maßstabsgetreue, verkleinerte Darstellung in Form einer Kugel. Bei der Erde weicht die exakte Form des Planeten, die Abplattung und Höhenunterschiede durch Gebirge beinhaltet, um mehr als 20 km von der Kugel-form ab.

Meist überträgt man die dreidimensionale gekrümmte Oberfläche auf eine Karte, also eine ebene, zweidimensionale Fläche. Die Abbildung muss dabei allerdings immer verzerrt sein. Um dies zu erreichen, verwendet man **Projektionen**. Jede Karte sollte das Original möglichst genau wiedergeben. Mithilfe ihres Maßstabes sollten sich Abstände, Richtungen oder die Größe von Flächen bestimmen lassen. Eine perfekte Darstellung, die alle dies gleichzeitig erfüllt, ist allerdings unmöglich. Es gibt eine Vielzahl verschiedener Projektionsformen, die Abbildungen 2-4 zeigen drei Beispiele.

Je nachdem, welche Eigenschaften eine Karte haben soll und welchen Bereich des Koordinatennetzes man möglichst verzerrungsfrei darstellen möchte, verwendet man daher unterschiedliche Kartenprojektionen. Die Abbildungen 5 und 6 zeigen zwei Karten des Mondes, einmal der gesamten Mondoberfläche in Zylinderprojektion und einmal des Nordpols in stereografischer Projektion.

Am schwierigsten zu realisieren ist die **Längentreue**, also die maßstabsgetreue Abbildung von Abständen. Längentreue in alle Richtungen über eine Gesamtkarte ist grundsätzlich nicht möglich. **Flächentreue** Karten sind an den Rändern stark in der Form verzerrt. **Winkeltreue** Karten benötigt man zur Richtungsbestimmung bei der Navigation

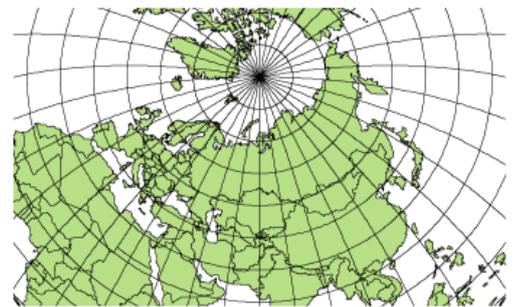


Abbildung 2: Längentreue Azimutalprojektion

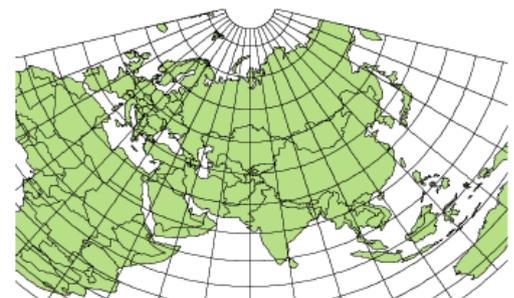


Abbildung 3: Flächentreue Kegelprojektion

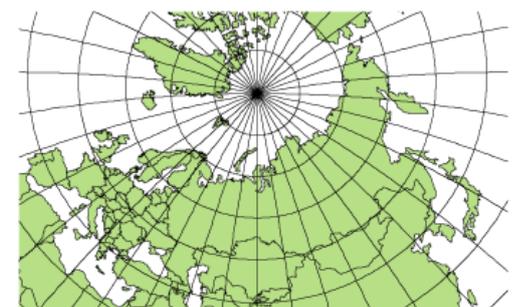


Abbildung 4: Stereografische (winkeltreue) Projektion

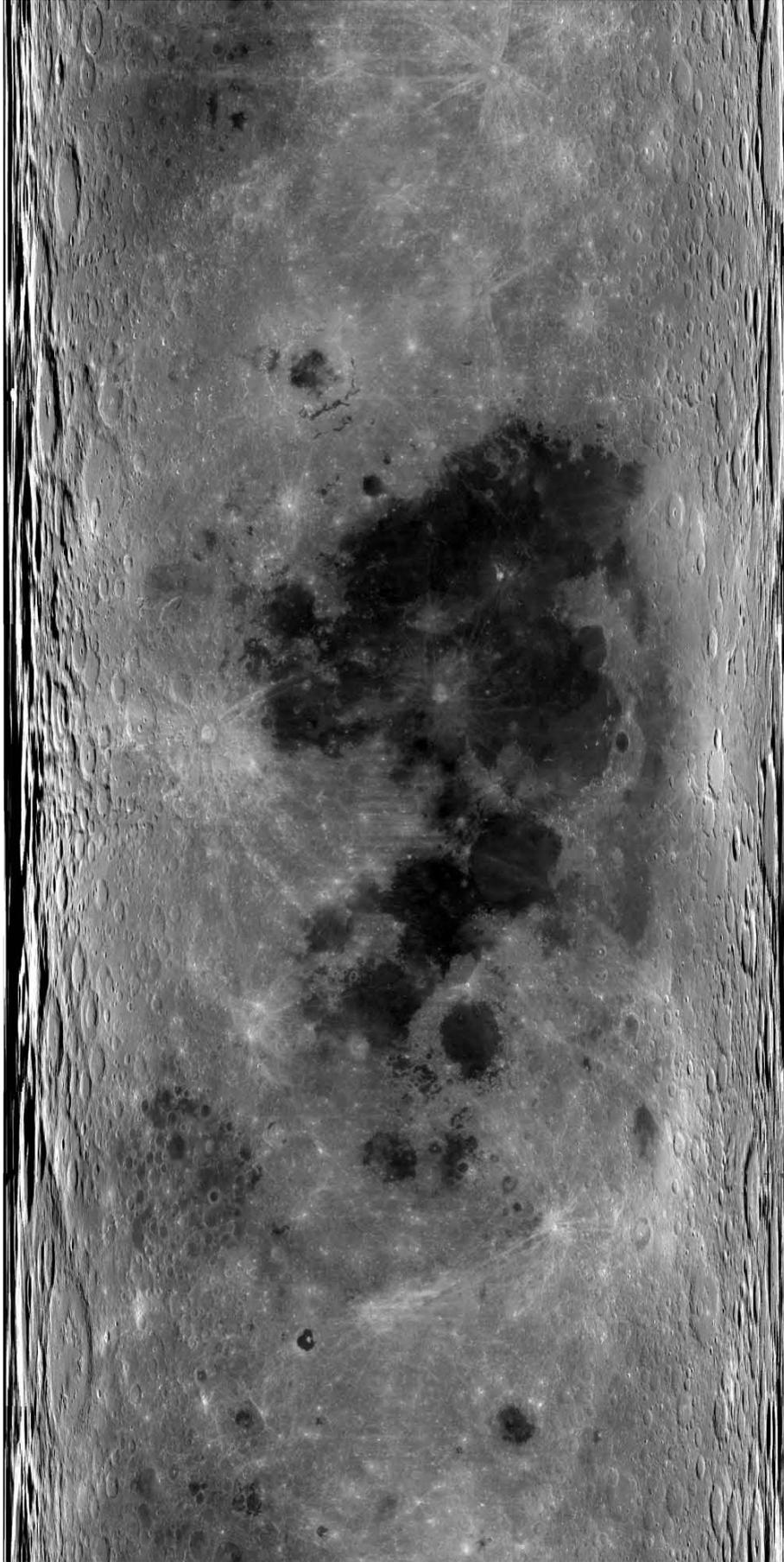


Abbildung 5: Karte des Mondes in Zylinderprojektion (im Querformat!). Die Darstellung ist in den Äquatorregionen am wenigsten verzerrt.

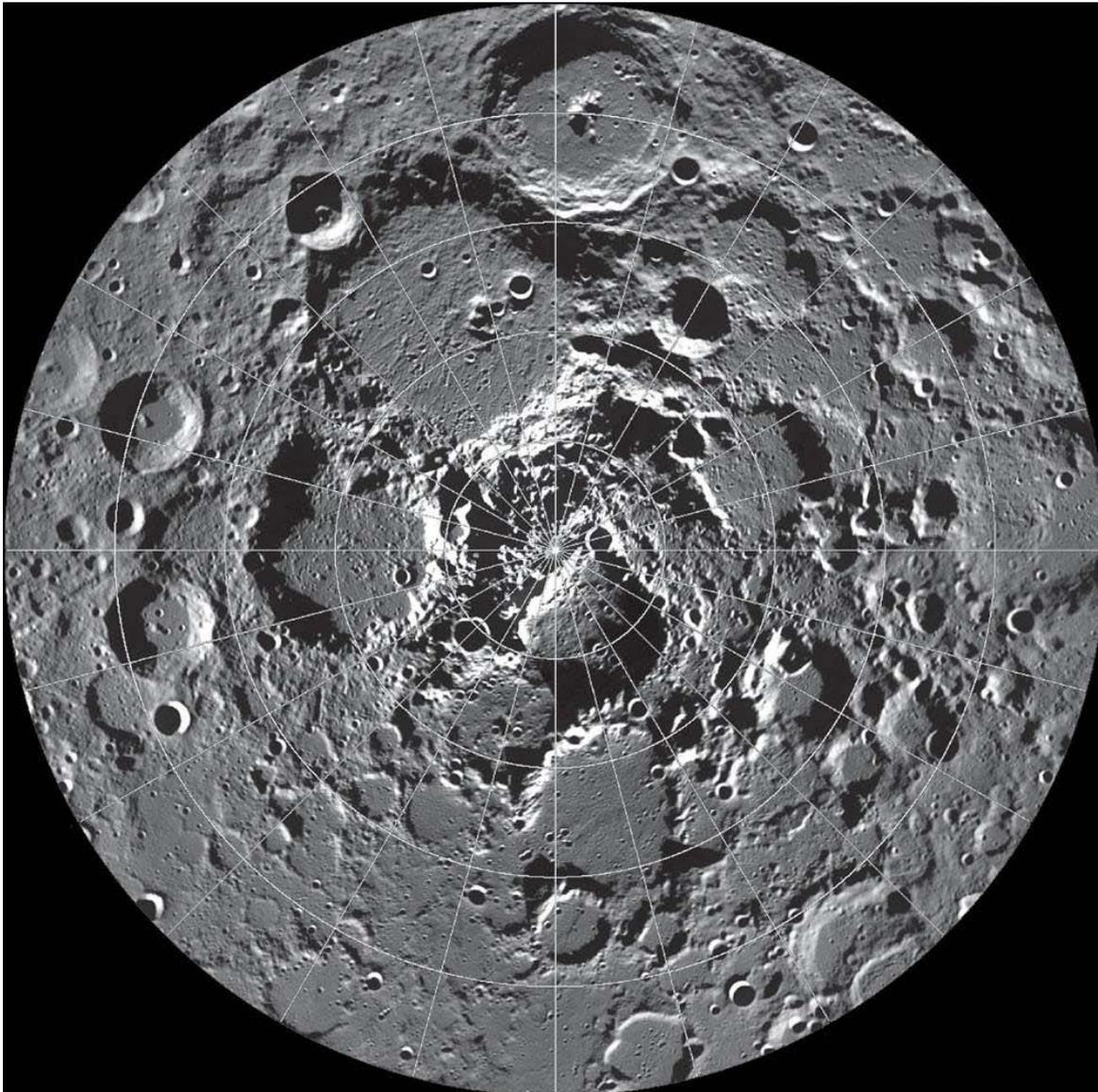


Abbildung 6: Der Nordpol des Mondes in stereografischer Projektion

## Hinweise für den Lehrer zum Mondpuzzle

Im Anschluss an die Fotografie der Planetenoberfläche im ersten Teil stellt sich natürlich die Frage, wie aus den einzelnen Bildern oder Videosequenzen, die die Schüler aufgenommen haben, eine Karte des Planeten werden könnte. Ein nahe liegender Ansatz ist es da, die einzelnen Aufnahmen zu einem Gesamtbild zusammenzufügen.

Die sich teilweise überlappenden Einzelbilder des Puzzles wurden über verschiedenen Positionen jeweils senkrecht zur Oberfläche des Mondes erstellt und sind somit Aufnahmen nachempfunden, wie sie die Schüler mit ihren Kameras hätten gewinnen können. Sie decken den Mond vollständig ab und wurden mithilfe der Software „Virtual Moon Atlas“ erstellt.

Die Schüler sollten das Puzzle in Zweier- oder Dreiergruppen zusammensetzen. Sie werden sich dabei hauptsächlich an auffälligen Formationen wie den dunklen Mondmeeren und bestimmten Krateranordnungen orientieren. Dennoch werden sie immer zu dem Ergebnis kommen, dass sich zwischen den Puzzlestücken Lücken bilden können und dass die einzelnen Teile an verschiedenen Stellen gleichzeitig angesetzt werden könnten. Das führt dazu, dass einige der auffälligen Formationen aufgrund der Überlappungen zwangsläufig mehrfach auftauchen. Je nachdem welches Detail jede Gruppe als Mitte auswählt, um die herum sie das Puzzle aufbaut, werden die fertigen „Gesamtbilder“ außerdem völlig anders aussehen.



**Abbildung:** Eine mögliche „Lösung“ des Puzzles: Deutlich zu erkennen das mehrfache Auftreten des großen Einschlagbeckens Mare Orientale oben links und des kleinen dunklen Kraters Ziolkowski unten rechts.

### **Literatur und Internetadressen**

- Tilmann Althaus: Messenger bei Merkur, die Dritte, Sterne und Weltraum 1/2010, Seite 22-24
- Messenger-Homepage (englisch): <http://messenger.jhuapl.edu/index.php>
- Virtual Moon Atlas (Freeware): <http://www.ap-i.net/avl/en/start>

### **Bildnachweis**

- Gesamtansicht des Merkur: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington
- Kartenprojektionen: Wikipedia, Maximilian Dörrbecker (CC BY-SA 3.0)
- Zylinderprojektion des Mondes und Mondnordpol: Clementine Team, JPL, NASA