

Erdbeben und Beben auf anderen Himmelskörpern Ursachen und Forschungsmöglichkeiten

In Bezug zum SuW-Beitrag „Marsbeben durch Meteoriten Einschlag registriert“ (Brennpunkt 2225) in SuW 05/2023, S. 15, Rubrik „Blick in die Forschung: Nachrichten“, Zielgruppe: Mittel- bis Oberstufe, WIS-ID:1571214

Olaf Kretzer

Die jüngsten Erdbeben in der Türkei und Syrien haben uns gezeigt, dass unser Heimatplanet geologisch immer noch sehr aktiv ist. Ein weltumspannendes Netz von Messstationen detektiert so gut wie jedes Erdbeben und versucht mit den gewonnenen Daten die Erdbebenvorhersage stetig zu verbessern, aber auch Neues über das Innere der Erde zu erfahren.

Im WIS-Beitrag soll den folgenden Fragen nachgegangen werden: Warum werden aber Seismometer auf scheinbar geologisch „toten“ Himmelskörpern wie Mond und Mars aufgestellt? Welche Ergebnisse liefern diese Geräte? Was können wir von der Auswertung solcher Daten lernen?

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Planeten, Kleinkörper, Raumfahrt	<u>Erdbeben, Mondbeben, Marsbeben, Venusbeben, Merkurbeben, Asteroideneinschläge, Meteorideneinschlag, innerer Aufbau der Himmelskörper, Raumfahrtmissionen mit Seismometern im Sonnensystem</u>
Physik	Mechanik	<u>Wellen, Bebenwellen, Seismogramm</u>
Fächer- verknüpfung	Astronomie - Geografie Astronomie - Mathematik	<u>Aufbau der Erde, Plattentektonik, Erdbeben, Vulkanausbrüche Richter-Skala, Momenten-Magnituden-Skala Exponentialfunktion</u>
Lehre allgemein	Kompetenzen (Erkenntnis), Unterrichtsmittel	<u>Seismologie als Hilfsmittel zur Erforschung des inneren Aufbaus der Himmelskörper, Aufgaben</u>

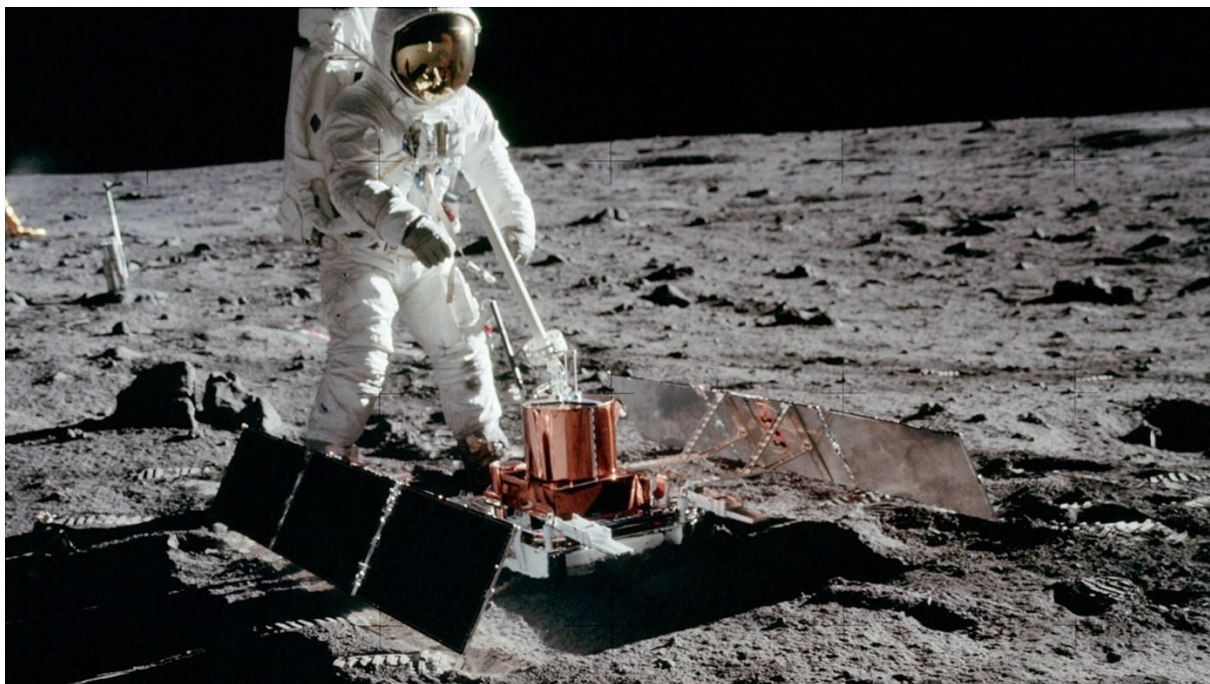


Abbildung 1: Mit Apollo 11 kam 1969 das erste Seismometer auf den Mond. Dieses Instrument arbeitete zwar nur drei Wochen, lieferte aber einen ersten nützlichen Blick in das Innere des Mondes.

©: NASA, <https://moon.nasa.gov/resources/13/apollo-11-seismic-experiment/>.

Erdbeben und Erdbebenwellen

[Zurück zum Anfang](#)

Erdbeben zählen mit zu den größten Naturkatastrophen. Im Laufe der Weltgeschichte starben unzählige Menschen in Folge dieser Ereignisse. Der Wissenschaft ermöglichen sie aber ungeahnte Einblicke in das uns ansonsten unzugängliche Innere der Erde und sind somit eine unschätzbare Informationsquelle über den inneren Aufbau und dessen Entwicklung.

Den Aufbau unserer Erde genau zu erforschen ist seit langem ein Hauptziel der Geologen. Allerdings sind die einzelnen Schichten nicht direkt zugänglich. Die bisher tiefste Bohrung, durchgeführt auf der russischen Halbinsel Kola (1970-1992), erreichte eine maximale Tiefe von 12,3 km. Die tiefste deutsche Bohrung fand in Windischeschenbach (Oberpfalz) in den Jahren 1987-1995 statt und erreichte eine Tiefe von 9,1 km. Bei einem Radius der Erde von 6371 km sind das nur „Kratzer“ an der Erdoberfläche. Tiefere Bohrungen sind auf Grund der physikalischen Bedingungen: 300 °C und ein Druck von ca. 400 MPa in 14 km Tiefe vorerst außerhalb des Bereiches des technisch Möglichen.

Bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts erkannten Seismologen wie Beno Gutenberg (1889-1960) und Andrija Mohorovicic (1857-1936), welche Möglichkeiten die genaue Detektion und Auswertung von Erdbebenwellen zur Erforschung des Erdinneren ermöglichen.

Etwas 90 % der Erdbebenwellen entstehen durch die relative Verschiebung von Teilen der Erdkruste zueinander, wodurch sich große mechanische Spannungen aufbauen können, welche sich schließlich plötzlich in Form von Erdbeben abbauen können. Daher treten Erdbeben bevorzugt an den Plattengrenzen der Erde auf. Diese **Plattentektonik** wird angetrieben von der Temperaturdifferenz zwischen dem Erdkern und der Erdkruste. Sie verursacht auch gleichzeitig die vulkanischen Aktivitäten. Wenn die Temperaturdifferenzen durch „Auskühlen“ des Planeten abnehmen, schwächen sich die geologischen Aktivitäten ab. Unter Berücksichtigung des Verlustes von atmosphärischen Gasen wie Kohlenstoffdioxid aber auch Wasserstoff - die Erdatmosphäre verliert pro Sekunde ca. 3 kg Wasserstoff und 50 g Helium - ist die große Bedeutung der Gasnachlieferung durch die Vulkane kaum zu unterschätzen. Die (nahezu) zum Erliegen kommende geologische Aktivität des Planeten Mars ist neben der geringeren Schwerkraft des roten Planeten und dem fehlenden Magnetfeld mit verantwortlich für den Verlust der ehemals dichteren Atmosphäre.

Weitere Quellen für Erdbebenwellen können **Vulkanausbrüche** oder auch der Einsturz großer Höhlen etc. sein. Hinzu kommen künstliche Ursachen wie unterirdische Atombombenexplosionen. Diese Explosionen, deren Daten nach Ende des kalten Krieges zum großen Teil der Wissenschaft zugänglich gemacht wurden, waren ein besonderer Schatz. Bei dieser Art von Erdbeben waren die Ausgangspunkte, die sogenannten Epizentren (siehe Abb. 2), sowie die jeweils freigesetzte Energie bekannt. Dies ermöglichte eine bessere Charakterisierung der Ausbreitung der Erdbebenwellen. Als besonders aussagekräftig erwies sich der Fakt, dass sich ein Teil der Wellen nur in Festkörpern ausbreiten konnte, ein anderer Teil aber auch in flüssigen und gasförmigen Stoffen (siehe Abb. 2). Die Wellen können gebrochen, reflektiert und gebeugt werden. Die dadurch abgelenkten Wellen können durch ein weltumspannendes Netz an Seismographen (auch Seismometer) detektiert werden. Durch Nutzung der Laufzeitunterschiede und der Zusammenarbeit mit anderen Messstationen können Tiefe und Ort sowie Energie des detektierten Bebens gut bestimmt werden.

Auch wenn seit über 100 Jahren Erdbeben zur Aufklärung der inneren Struktur der Erde genutzt werden, können immer noch neue, unerwartete Entdeckungen gemacht werden. So wurde berichtet¹, dass es eindeutige Hinweise auf einen sogenannten innersten Kern der Erde gibt. Dazu wurden 200 Erdbeben der Stärke >6 untersucht. Dabei stellte es sich heraus, dass der innerste Teil des inneren Erdkerns die Geschwindigkeiten der seismischen Wellen anders verändert als der darüber liegende Teil des Kerns. Dieser innerste Erdkern hat einen Durchmesser von 650 km.

¹ [Thanh-Son Pham, Hrvoje Tkalčić](#). Up-to-fivefold reverberating waves through the Earth's center and distinctly anisotropic innermost inner core. Nature Communications 14. Article number 754 (2023)

[Zurück zum Anfang](#)

Eine weitere, nahezu gleichzeitige Entdeckung untersuchte die Bewegung des Erdkerns und stellte dabei äußerst Interessantes fest.² Der innere Erdkern wird vom Erdmantel getrennt durch den flüssigen Kern getrennt – und kann sich daher getrennt von ihm bewegen. Langjährige Forschungen deuten nun auf ein Schwingen der Bewegungsrichtung des inneren Erdkerns hin – die Richtung ändert sich ständig. Die Daten legen eine Änderung der Bewegungsrichtung alle 30 Jahre nahe. Die Autoren gehen daher davon aus, dass der Erdkern aktuell ruht und dann wieder in die andere Richtung rotieren wird. Diese Ergebnisse würden auch Hinweise auf die Ursachen für gemessene Bewegungsänderungen der Erde geben.

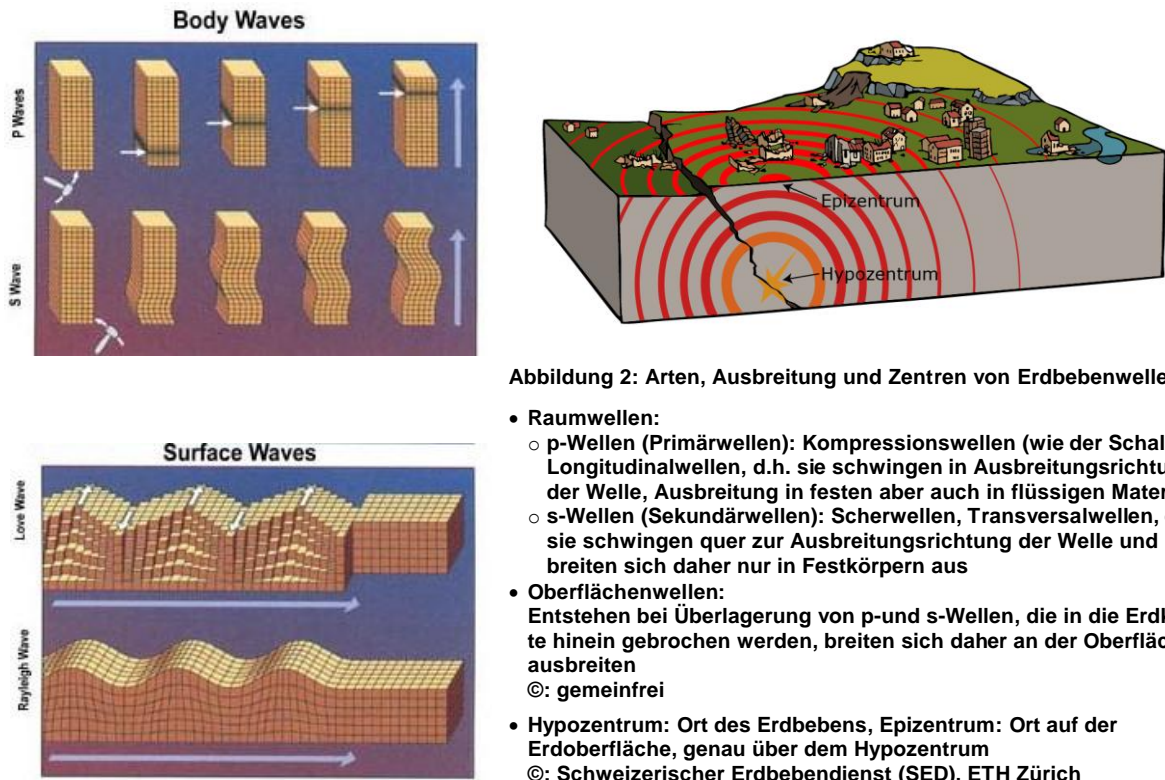


Abbildung 2: Arten, Ausbreitung und Zentren von Erdbebenwellen:

- **Raumwellen:**
 - **p-Wellen (Primärwellen):** Kompressionswellen (wie der Schall), Longitudinalwellen, d.h. sie schwingen in Ausbreitungsrichtung der Welle, Ausbreitung in festen aber auch in flüssigen Materialien
 - **s-Wellen (Sekundärwellen):** Scherwellen, Transversalwellen, d.h. sie schwingen quer zur Ausbreitungsrichtung der Welle und breiten sich daher nur in Festkörpern aus
- **Oberflächenwellen:** Entstehen bei Überlagerung von p- und s-Wellen, die in die Erdkruste hinein gebrochen werden, breiten sich daher an der Oberfläche ausbreiten
- ©: gemeinfrei
- **Hypozentrum:** Ort des Erdbebens, **Epizentrum:** Ort auf der Erdoberfläche, genau über dem Hypozentrum
- ©: Schweizerischer Erdbebendienst (SED), ETH Zürich

Eine weitere neue Möglichkeit das Innere von Himmelskörpern zu untersuchen, ist die Detektion und Auswertung von Wellen, die durch starke Wetteränderungen hervorgerufen werden. So konnten japanische Wissenschaftler p- und s-Wellen messen, deren Auswertung zeigte, dass die Ursache dieser Wellen ein schwerer Sturm zwischen Grönland und Island war. Dies ermöglicht die Untersuchung von Strukturen im Erdinneren auch in Regionen, die normalerweise tektonisch nicht aktiv sind, d. h., man ist nicht auf die Existenz von Erdbeben angewiesen, um die Erde zu „durchleuchten“.

Eine astronomische Besonderheit, die inzwischen auch auf dem Mond und dem Mars nachgewiesen wurde, sind Beben, hervorgerufen durch **Einschläge von Meteoroiden**. Ein Beispiel war der Meteoroid von Tscheljabinsk am 15.02.2013. Die Auswirkungen dieses Falles wurden sowohl von verschiedenen Erdbeben- wie auch von Infraschallnetzwerken detektiert und ausgewertet. Damit stellt die Auswertung seismischer Daten auch eine Quelle für astronomisch relevante Ereignisse dar.

Das bisher stärkste detektierte Erdbeben hatte im Jahre 1960 eine Stärke von 9,5. Es ereignete sich in der Nähe von Valdivia (Chile). Das wohl größte Ereignis stellte der **Asteroideneinschlag** auf der Halbinsel Yucatan vor 66 Millionen Jahren dar. Man schätzt die Magnitude des damaligen Einschlags auf 11 bis 12.

² Yi Yang, Xiaodong Song. Multidecadal variation of the Earth's inner-core rotation. Nature Geoscience. 16. P. 182-187. 2023
<https://doi.org/10.1038/s41561-022-01112-z>

Mondbeben

[Zurück zum Anfang](#)

Als Ende der 60er-Jahre die ersten bemannten Flüge zum Mond geplant und dann auch durchgeführt wurden, waren die Kenntnisse über Aufbau und Entstehung des Mondes noch sehr lückenhaft. Daher wurde die verschiedensten Messgeräte von den Apollo Astronauten auf dem Mond aufgestellt – u.a. Seismometer (siehe Abb. 1).

Die Apollo Seismometer waren von 1969 bis 1977 in Betrieb und sendeten ihre Messergebnisse per Funk zur Erde. Insgesamt wurden 13000 Mondbeben detektiert, welche im Jahre 2011 noch einmal mit neuesten Methoden ausgewertet wurden. Zur Kalibrierung der Messgeräte wurden u.a. die Landefähren der Apollo Missionen genutzt. Nach Rückkehr zum den Mond umkreisenden Kommando-Modul der Mission stiegen die beiden Astronauten, welche auf dem Mond gelandet waren, aus der Mondfähre um. Danach wurde diese abgekoppelt und schlug mit bekannter Geschwindigkeit auf den Mond auf. Die Seismometer registrierten jeweils den Einschlag (siehe Abb. 3).

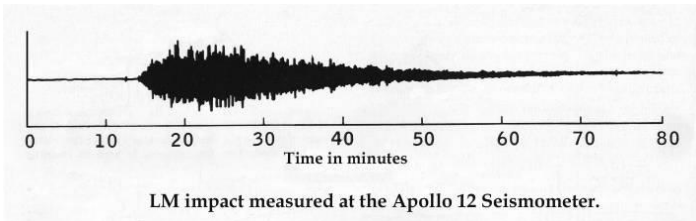


Abbildung 3: Seismogramm des Einschlags der Mondlandefähre von Apollo 12. ©: NASA.

Der Einschlag der Landefähre von Apollo 12 geschah mit einer Geschwindigkeit von 6,048 km/h, 72 km entfernt von der Position des Seismometers. Wie spätere Untersuchungen ergaben, entstand dabei ein Krater mit 9 m Durchmesser. Die Schwingungen des Mondes konnten vom Seismometer 55 min lang detektiert werden (siehe Abb. 3).

Durch das Zusammenspiel mehrerer Seismometer konnten so auch auf dem Mond relativ genaue Angaben über Ort, Art und Stärke des Mondbebens gemacht werden. In Auswertung dieser Messungen wurden vier Arten von Mondbeben gefunden:

- Tiefe Beben: ca. 700 km unterhalb der Oberfläche. Diese werden wahrscheinlich durch die Gezeitenkräfte der Erde verursacht. Sie stellen den Großteil der detektierten Mondbeben dar. Das Auskühlen des Mondes verursacht darüber hinaus auch ein Schrumpfen unseres Nachbarn im All. Dieses Schrumpfen wird ebenso begleitet von seismischen Aktivitäten.
- Meteoriteneinschläge: Einschläge von ca. 200 Meteoroiden und Asteroiden.
- Thermische Mondbeben: Reaktion der lunaren Kruste nach zwei Wochen lunarer Nacht
- Flache Mondbeben: Dutzende von Beben in einem Tiefenbereich 50-220 km unterhalb der Mondoberfläche. Diese Beben stellen die stärksten gemessenen Mondbeben dar.

Die Ursachen der flachen Mondbeben werden in der Forschung noch stark diskutiert. Es überwiegt die Meinung, dass diese Beben vergleichbar sind mit den klassischen Erdbeben. Allerdings herrscht noch Unklarheit über die genaue Ursache, da Plattentektonik auf dem Mond eigentlich nicht auftreten sollte. Die Untersuchungen ermöglichten erste Erkenntnisse über den grundlegenden Aufbau des Mondes.

Besonders interessant ist der Fakt, dass er anscheinend noch einen teilweise flüssigen Kern besitzt. Das Vermögen eines Himmelskörpers, Energie zu speichern, ist proportional zur dritten Potenz des Radius des Körpers. Da im Weltall die Abgabe von Energie durch Wärmeleitung und Konvektion auf Grund des umgebenden Vakuums nicht möglich ist, kann der Körper nur durch Wärmestrahlung Energie abgeben. Diese wiederum ist abhängig von der Oberfläche des abstrahlenden Körpers – also proportional zum Quadrat des Radius. Kleinere Himmelskörper kühlen daher schneller aus als Größere.

Zur genaueren Charakterisierung des Mondes, seiner Entstehung und seines Aufbaus werden für die zukünftigen Mondmissionen umfangreiche Forschungspläne aufgestellt. Es gibt aktuell 20 Projekte von bemannten und unbemannten Missionen in den nächsten drei Jahren.

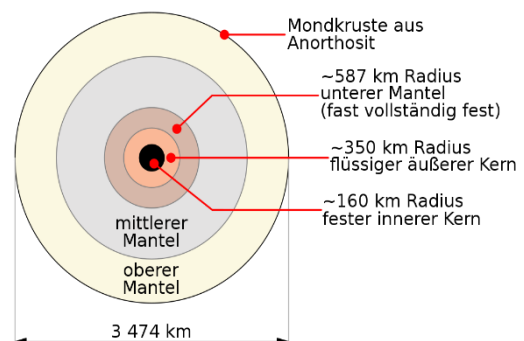


Abbildung 4: Schematischer Aufbau des Mondes basierend auf dem gegenwärtigen Forschungsstand.

©: Mrmw - Eigenes Werk, basierend auf: Moon Schematic Cross Section.svg, CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=84078682>.

Marsbeben

[Zurück zum Anfang](#)

Nahezu gleichzeitig mit der Untersuchung der seismischen Aktivitäten auf dem Mond wurden erste Forschungsvorhaben auf dem Mars umgesetzt. Zur Ausstattung der Marssonden Viking 1 und 2, welche 1976 auf dem Mars landeten, gehörten Seismometer. Die Seismometer waren an der Spitze der Lander installiert. Während das Seismometer von Viking 1 nicht aktiviert werden konnte, lieferte das Seismometer von Viking 2 für 500 Sol Daten. Allerdings zeigte die Datenauswertung, dass diese nicht nutzbar waren, da sich der Marswind als zu stark erwies, d. h., er „übertönte“ sämtliche eventuellen Signale von Marsbeben.

Am 26. 11. 2018 landete der Lander der Mission Mars InSight und aktivierte am 19. 12. 2018 sein Seismometer. Für seine Kalibrierung wurde u. a. die Landung des Mars Rovers Perseverance in 3452 km Entfernung genutzt.³

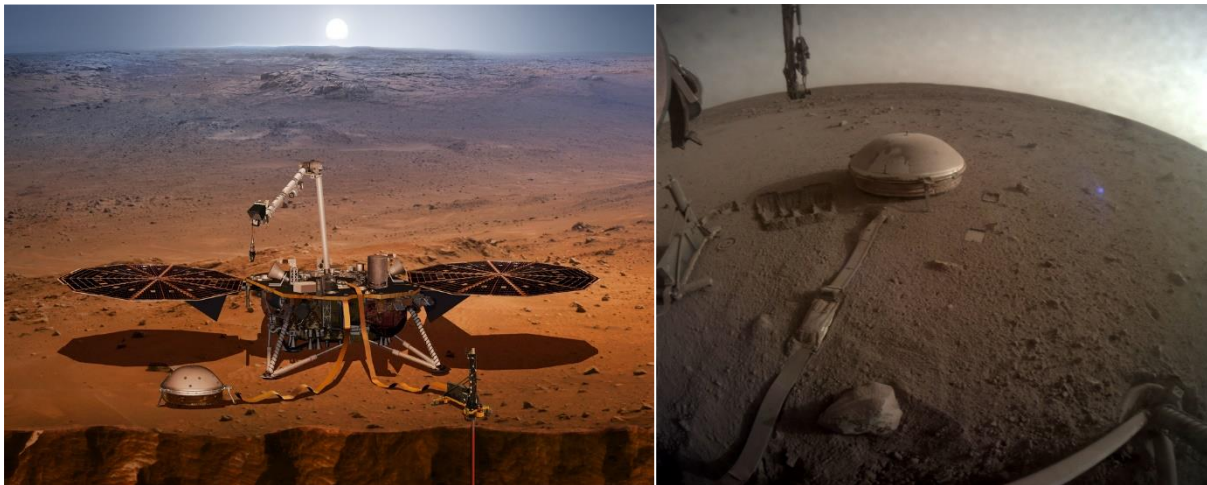


Abbildung 5: Künstliche Darstellung des Mars Landers Mars InSight (links) und von dem zugehörigen Seismometer (rechts). ©: NASA.

Die Landesonde von InSight detektierte das erste Beben auf einem anderen Planeten. Bis zu ihrer Außerdienststellung am 15. 12. 2022 wurden 1319 seismische Aktivitäten detektiert (Abb. 5). Bei 50 von ihnen konnte eine Zuordnung zu einer Region auf dem Planeten hergestellt werden. Besonders das Marsbeben vom 4. 5. 2022 überraschte viele Wissenschaftler. Mit einer Stärke von 5 übertraf es alle anderen Marsbeben deutlich. Obwohl das Hypozentrum mehr als 2000 km weit entfernt war, konnten u. a. auch Oberflächenwellen detektiert werden. Das bis dahin stärkste Beben wurde am Heiligabend 2021 mit einer Magnitude 4 gemessen. Dieses Beben wiederum war auch außergewöhnlich, da es einem Meteoroiden-Impakt zugeordnet werden konnte.

Die Auswertung der gesammelten Daten lieferte deutliche Hinweise auf geologische und vulkanische Aktivitäten in den letzten zwei Millionen Jahren. Der Planet Mars scheint geologisch (noch?) nicht tot zu sein. Die Interpretation der Daten weist u. a. auf einen deutlich größeren Kern hin als bisher angenommen. Mit einem Radius von 1800 km ist der geschmolzene Kern des Planeten sehr groß. Seine Temperatur wird auf ca. 2000 K geschätzt. Nähere Untersuchungen ergaben, dass ein relativ hoher Anteil von leichteren Elementen sich im Eisenkern befinden – die wahrscheinlich die Schmelztemperatur des Kerns absenken und ihn daher flüssig halten. Der sich nach außen anschließende Marsmantel (800 km) und schließlich die Lithosphäre (600 km) ähneln vom Aufbau her der Erde – allerdings wurden ihre Ausmaße durch InSight neu bestimmt.

³ B. Fernando Et Al. Listening for the Landing: Seismic Detections of Perseverance's Arrival at Mars With InSight. Earth and Space Science Volume 8, Issue 4 Apr 2021

[Zurück zum Anfang](#)

Die Auswertung der Daten von Insight läuft noch. Die Wissenschaftler versprechen sich noch viele Informationen über den inneren Aufbau zu erhalten - aus der Auswertung der seismischen Messungen. Für die nächsten 10 Jahre werden keine neuen Daten vom Mars hinzukommen. Wahrscheinlich werden erst die für ca. 2035 geplanten bemannten Raumflüge zum Mars dann neue Daten liefern.

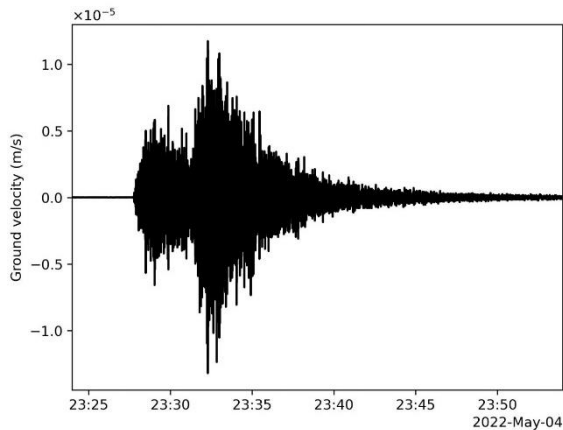


Abbildung 6: Seismogramm eines Marsbebens vom 4. 5. 2022. ©: NASA/JPL-Caltech, <https://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA25180.jpg>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=117864013>

Venusbeben

[Zurück zum Anfang](#)

Obwohl unser Nachbarplanet Venus von den Größenverhältnissen der Erde am nächsten kommt, sind doch ihre Umweltbedingungen so ungünstig, dass eine Untersuchung der Oberfläche des Planeten bisher nur ansatzweise möglich war. Es existieren daher auch keine seismischen Daten von der Oberfläche des Planeten. Die bisherigen Untersuchungen durch verschiedenen Raumsonden wie Magellan oder Venus Express lieferten Informationen über einen noch aktiven Vulkanismus und einen indirekten Beweis für seismische Aktivitäten in Form eines Bergrutsches - der sich auf zwei Aufnahmen von Magellan aus den Jahren 1990 und 1991 zeigte (siehe Abb. 7). In der Mitte der Aufnahme zeigte sich 1991 eine neue, bis dahin nicht vorhandene Struktur. Auf Grund der Abwesenheit von Wasser und unter Berücksichtigung der sonstigen atmosphärischen Bedingungen des Planeten, interpretieren Wissenschaftler diese Landschaftsveränderung als Folge seismischer Aktivitäten.

Da auch die zukünftig geplanten Lander auf der Venus, wie Davinci 2028, keine Seismometer an Bord haben werden, wurde nach neuen Möglichkeiten gesucht. Eine aktuell diskutierte Variante geht von der

Messung von durch Beben hervorgerufenen Luftdruckschwankungen aus. Am 22. 7. 2019 konnten zwei Testballons beispielsweise ein Erdbeben in Kalifornien auf diese Weise detektieren und die Magnitude bestimmen. Da für die Erforschung der Venus Ballons auf Grund der extrem dichten Atmosphäre seit längerem schon diskutiert werden, könnten so vielleicht auch die ersten Venusbeben detektiert werden.

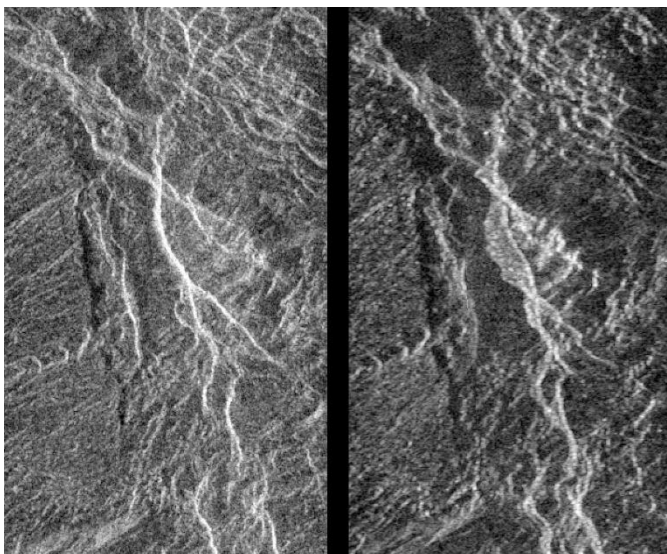


Abbildung 7: Aufnahmen der Magellan-Sonde vom November 1990 (links) und März 1991 (rechts). ©: NASA/JPL/Magellan – <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00248>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=298864>.

Merkurbeben

[Zurück zum Anfang](#)

Merkur ist der kleinste Planet des Sonnensystems. Bisher konnten nur durch zwei Raumsonden Informationen über ihn erhalten werden. Die Auswertung seiner Eigenschaften, u. a. seines Magnetfeldes, führten zu dem Ergebnis, dass er - ähnlich wie der Mond - im Innern zum Teil noch aus aufgeschmolzener Materie besteht. Aus der Auswertung der Aufnahmen des Planeten konnte aber auch auf ein Schrumpfen des schnellsten Planeten des Sonnensystems geschlossen werden. Das langsame Auskühlen des Planeten führt zu einem Schrumpfen des Planeten - von ca. 20 km im Radius seit seiner Entstehung. Dieses Schrumpfen sollte verbunden sein mit Merkurbeben, wie beispielsweise auch beim Mond, bis zur Stärke der Magnitude 5.

Landungen von Raumsonden bzw. deren Landern - hier sollen Landungen auf Kometen bzw. Asteroiden nicht berücksichtigt werden - gab es bisher auf dem Mond, dem Mars, der Venus wie auch auf dem größten Mond des Gasplaneten Saturn, dem Titan. 2004 untersuchte der Lander Huygens der erfolgreichen Saturnsonde Cassini die Oberfläche des Mondes. Leider befand sich kein Seismograph an Bord. Die NASA plant nun allerdings die Mission Dragonfly zum Saturn (siehe Abb. 8). Abweichend von allen bisherigen Missionslandern soll dieses mal ein Quadrocopter genutzt werden. Begünstigt durch die dort herrschenden Schwerkrafts- und Atmosphärendichtebedingungen sieht die NASA diese Variante als optimal für die Untersuchung des Mondes an. Mit an Bord wird ein Seismometer sein.

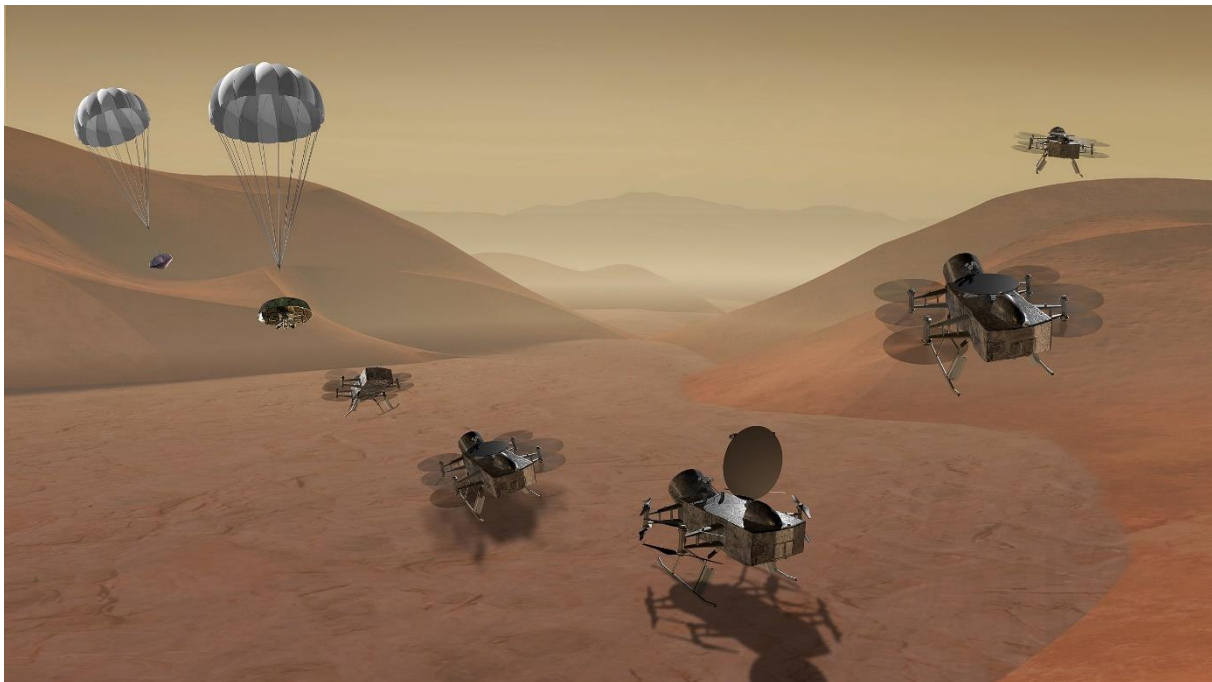


Abbildung 8: Die Mission Dragonfly der NASA zum Saturnmond Titan – geplant für das Jahr 2027.
 ©: NASA - NASA press release 17-101, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64983419>.

Fazit

[Zurück zum Anfang](#)

Die **Untersuchung des inneren Aufbaus der Himmelskörper** wird durch Auswertung seismischer Ergebnisse entscheidend vorangebracht. Daher wurden und werden verschiedene Methoden ausgearbeitet, die es ermöglichen, auf die extrem unterschiedlichen Umweltbedingungen vor Ort einzugehen. Es ist zu erwarten, dass die dadurch gewonnenen Ergebnisse unser Bild über die Entstehung und den Aufbau verschiedener Körper des Sonnensystems deutlich ausweiten.

[Zurück zum Anfang](#)

Abschließend soll darauf hingewiesen werden, dass diese Methoden und Techniken nicht nur bei festen Himmelskörpern angewandt werden können. Als Beispiel sei hier nur das große Gebiet der Helioseismologie genannt. Die Untersuchung der Schwingungen von Sternen liefert den Astronomen wertvolle und auf anderem Wege nicht gewinnbare Erkenntnisse über den inneren Aufbau der Sterne.

Die Stärke von Beben wird mit Seismographen (Seismometern) gemessen. Das wahrscheinlich älteste Gerät zur (einfachen) Detektion von Erdbeben stammt aus dem Kaiserreich China. Das Seismoskop wurde im Jahre 132 n. C. vom kaiserlichen Astronomen Zhang Heng erfunden.

Eine früher häufig zur Angabe der Stärke der Erdbeben verwendete Skala ist die **Richter-Skala**. Diese basiert auf in Seismogrammen angezeigten Amplitudenmessungen und gilt streng genommen nur in einer Entfernung von einigen hundert Kilometern vom Epizentrum. Die Skala ist auf einen Maximalwert von 6,5 begrenzt, da bei stärkeren Erdbeben Sättigungseffekte des Gesteins auftreten, so dass diese Skala ungeeignet für größere Beben ist. Größere Werte werden daher mit der **Momenten-Magnituden-Skala** bestimmt, die heute im Allgemeinen verwendet wird.

Aufgaben

[Zurück zum Anfang](#)

- 1.) Warum können nicht alle Wellenarten die flüssigen Bereich des Innern von Himmelskörpern durchqueren?
- 2.) Die mechanisch umgesetzte Arbeit (engl.: work) bzw. Energie findet in der heute genutzten Momenten-Magnituden-Skala (M_w) ihren Ausdruck. Um die Energieinhalte E_1 und E_2 zweier Beben der Stärken M_1 und M_2 auf der Momenten-Magnituden-Skala miteinander zu vergleichen, muss man den folgenden **exponentiellen Zusammenhang** nutzen:

$$\frac{E_2}{E_1} = 10^{1,5(M_2 - M_1)}$$

Das große Erdbeben von San Francisco im Jahre 1906 wird mit einer Stärke von $M_w=7,8$ angegeben. Das Erdbeben von Fukushima dagegen hatte eine Stärke von $M_w=9,1$.

Wie unterscheiden sich die Energieinhalte der beiden Beben?

- 3.) Wie konnten die Wissenschaftler mit Hilfe der zum Absturz gebrachten Mondlandefähren ihre Seismometer kalibrieren? Wie könnte ein selbst ausgedachtes Experiment zur Kalibrierung eines solchen Messgerätes aussehen?
- 4.) Warum hat gerade der Saturnmond Titan günstige Eigenschaften für den Einsatz eines Quadcopters? Gab es bereits andere fliegende Forschungsgeräte auf anderen Himmelskörpern?
- 5.) Warum sind auch beim Planeten Merkur Einwirkungen durch Gezeiten zu erwarten? Er ist doch nicht - wie der Mond an die Erde - an einen Planeten gebunden.

Lösungen

[Zurück zum Anfang](#)

- 1.) Warum können nicht alle Wellenarten die flüssigen Bereich des Innern von Himmelskörpern durchqueren?

→ **Transversalwellen** (Ausbreitungsrichtung der Welle und Schwingungsrichtung der Teilchen stehen senkrecht aufeinander) sind nur möglich, wenn die Bindungskräfte zwischen den schwingenden Teilchen stark genug sind, was in der Regel nur für das feste Innere der Himmelskörper gilt. Bei Durchquerung von Flüssigkeiten und Gasen sind sie zu gering und es findet keine Ausbreitung dieser Wellen statt.

Bei **Longitudinalwellen** (Schwingungsrichtung der Teilchen in Ausbreitungsrichtung der Welle) sind die Wechselwirkungskräfte groß genug und die Wellen bewegen sich durch alle Medien.

- 2.) Die mechanisch umgesetzte Arbeit (engl.: work) bzw. Energie findet in der heute genutzten Momenten-Magnituden-Skala (M_w) ihren Ausdruck. Um die Energieinhalte E_1 und E_2 zweier Beben der Stärken M_1 und M_2 auf der Momenten-Magnituden-Skala miteinander zu vergleichen, muss man den folgenden exponentiellen Zusammenhang nutzen:

$$\frac{E_2}{E_1} = 10^{1,5(M_2 - M_1)}$$

Das große Erdbeben von San Francisco im Jahre 1906 wird mit einer Stärke von $M_w=7,8$ angegeben. Das Erdbeben von Fukushima dagegen hatte eine Stärke von $M_w=9,1$.

Wie unterscheiden sich die Energieinhalte der beiden Beben?

→ $\frac{E_2}{E_1} = 10^{1,5 \cdot (M_2 - M_1)} = 10^{1,5 \cdot (9,1 - 7,8)} = 10^{1,95} \approx 89$.

Der Energieinhalt des Erdbebens von Fukushima war ca. 89-mal größer als das des Erdbebens von San Francisco.

- 3.) Wie konnten die Wissenschaftler mit Hilfe der zum Absturz gebrachten Mondlandefähren ihre Seismometer kalibrieren? Wie könnte ein selbst ausgedachtes Experiment zur Kalibrierung eines solchen Messgerätes aussehen?

→ Da die Geschwindigkeit und die Masse sowie der Einschlagswinkel aber auch die Oberflächenbeschaffenheit am Einschlagort bekannt waren, konnte die umgewandelte Energie, die sich bei gegebenen Bedingungen aus der kinetischen Energie in die Energie der Erdbebenwelle wandelte, ermittelt werden. Bei bekanntem Abstand und gemessener Magnitude lassen sich so Eigenschaften des Mondbodens bestimmen.

Jede bekannte Masse, die man beispielsweise frei fallen lässt, ermöglicht eine ähnliche Kalibrierung – siehe die Landung des Marsrovers.

- 4.) Warum hat gerade der Saturnmond Titan günstige Eigenschaften für den Einsatz eines Quadcopters? Gab es bereits andere fliegende Forschungsgeräte auf anderen Himmelskörpern?

→ Titan hat eine deutlich geringere Fallbeschleunigung als die Erde. Dies bedeutet ein geringeres Gewicht für die dortigen Objekte. Der atmosphärische Druck ist um ca. 50 % größer als auf der Erde. Damit sind die Auftriebswerte, bei kleinerem Gewicht, deutlich besser als auf der Erde. Dies ermöglicht einen effektiven Einsatz von Drohnen oder eben eines Quadcopters. Mit Ingenuity wurde mit der Marsmission, die auch den Rover Perseverance zum Mars brachte, erstmals ein Mini-Helikopter zum Roten Planeten gebracht. Sein erster Flug fand am 19. 4. 2021 statt. Am 2. 4. 2023 absolvierte er seinen 49. Flug. Für Missionen zur Venus werden Ballonmissionen geplant.

- 5.) Warum sind auch beim Planeten Merkur Einwirkungen durch Gezeiten zu erwarten? Er ist doch nicht - wie der Mond an die Erde - an einen Planeten gebunden.

→ Die Gezeitenwirkung auf Merkur rührt von der Sonne her.