

Aus der Geschichte der Sonnenfinsternisse

In Bezug zum Beitrag „Einsteins Aufstieg zum Superstar“ unter der Rubrik „Welt der Wissenschaft“ in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 5/2019, Zielgruppe: Oberstufe, WIS-ID: 1421024

Olaf Kretzer

Eine Sonnenfinsternis – insbesondere eine totale – gehört wohl zu den beeindruckendsten kosmischen Phänomenen und findet in der breiten Öffentlichkeit große Aufmerksamkeit. Besonders auffällig war dies in Deutschland bei der totalen Sonnenfinsternis am 11. 08. 1999.

Bei der totalen Sonnenfinsternis von 1919 stand nicht die eigentliche Verfinsterung im Mittelpunkt des Interesses, sondern die Messungen, welche eine erste Bestätigung für eine der bedeutendsten Theorien der Physik lieferte – der allgemeinen Relativitätstheorie. Die Bestätigung der Theorie eines Deutschen durch die Beobachtungen eines Briten war dabei von höchster politischer Bedeutung.

Die Beobachtung, aber auch die Interpretation von totalen Sonnenfinsternissen haben in der Geschichte wiederholt zu neuen wissenschaftlichen aber auch politischen Erkenntnissen und Entwicklungen geführt – sie bieten damit ein **Paradebeispiel für den fächerübergreifenden Unterricht**. Entsprechend soll in diesem Artikel der Geschichte der totalen Sonnenfinsternisse nachgegangen werden, wobei verschiedene Anknüpfungspunkte zum Einsatz des Themas in den Unterricht aufgezeigt werden.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Sonnensystem, Himmelsmechanik	Sonnenfinsternis, Finsternistypen, Okkultation, Mondbahn, Finsternisse außerirdisch betrachtet, Wechselwirkungen im System Erde-Mond
Physik	Mechanik	Drehimpulserhaltung
Fächerverknüpfung	Astro – Ma Astro – Geschichte Astro – Religion	Trigonometrie, geschichtliche Datierung auf Grundlage himmlischer Ereignisse, historisch bedeutsame Sonnenfinsternisse (wissenschaftsgeschichtlich wie bildungsgeschichtlich), Interpretation von Naturbeschreibungen in der Bibel
Lehre allgemein	Kompetenzen (Wissen, Wertung), Unterrichtsmittel	können die Bedeutung ausgewiesener Finsternisse bewerten Fragen für den Unterricht

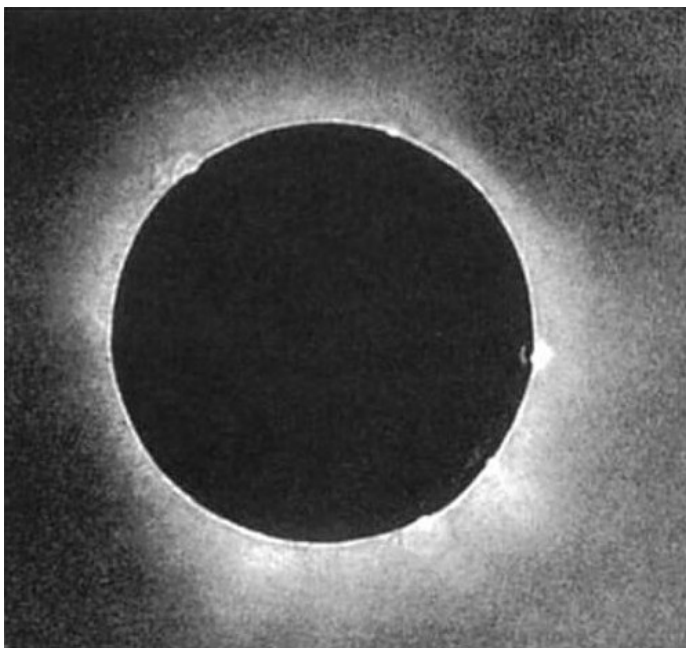


Abbildung 1:

Erste Aufnahme einer totalen Sonnenfinsternis (Königsberg, heute Kaliningrad, 28. 07. 1851), hergestellt von Johann Julius Friedrich Berkowski nach dem Verfahren der Daguerreotypie. Die Empfindlichkeit der Aufnahme reichte leider noch nicht aus, um die Sterne nahe dem Sonnenrand abzubilden. Dies ermöglichte dann die Fotografie der totalen Sonnenfinsternis vom 29. 05. 1919 (Vulkaninsel Príncipe, Expedition von Arthur Eddington). Damit erlangte diese Sonnenfinsternisaufnahme eine überragende Bedeutung, weil sie es ermöglichte, die Lichtablenkung im Gravitationsfeld der Sonne, welche durch die 1915 durch A. Einstein aufgestellte Allgemeine Relativitätstheorie vorhergesagt wird, zu überprüfen.

© Johann Julius Friedrich Berkowski

Grundlegendes zu Finsternissen

Okkultationen

Sonnenfinsternisse gehören wie Mondfinsternisse zur Übergruppe der Okkultationen. Darunter versteht man das Vorbeiziehen eines scheinbar größeren Himmelskörpers vor einem anderen, scheinbar kleineren Himmelskörper. Damit sind Okkultationen ein Spezialfall von Konjunktionen – der nähere Himmelskörper bedeckt den entfernten. Zu den Okkultationen gehören neben den Sonnen- und Mondfinsternissen u.a.

- Sternbedeckungen durch den Mond (ca. 10-mal pro Jahr – bei Sternen bis zur 6. Größenklasse),
- Sternbedeckungen durch Planeten (alle 10 Jahre),
- Sternbedeckungen durch Asteroiden (einmal pro Jahr),
- Planetendeckungen durch Planeten (09. 12. 1808: Merkur bedeckt Saturn, 03. 01. 1818: Venus bedeckt Jupiter, 22. 11. 2065: Venus bedeckt Jupiter, 15. 07. 2067: Merkur bedeckt Neptun),
- Bedeckungen der Planetenmonde durch ihre „Mutterplaneten“,
- Transits von Merkur und Venus vor der Sonne, wie z. B.:
 - Merkur: 08. 11. 2006, 09. 05. 2016, 11. 11. 2019, 13. 11. 2032,
 - Venus: 08. 06. 2004, 05./06. 06. 2012, 11. 12. 2117, 08. 12. 2125.

Mondbahn

Der Mond umkreist die Erde auf einer elliptischen Bahn. Dabei ist seine Bahn gegen die Erdbahnebene um $5,15^\circ$ geneigt. Die tatsächliche Bahn des Mondes ist von vielen Störparametern geprägt – aktuell kennt man ca. 1500. Damit ist die genaue Berechnung der Mondbewegung eines der größten Probleme der Himmelsmechanik.

Verursacht werden diese Störungsterme daher, dass hier kein Zwei-Körper-Problem mit eindeutiger Lösung der Bewegungsgleichung vorliegt, sondern ein N-Körper Problem, welches nur näherungsweise mit Hilfe der Störungstheorie lösbar ist. Bei genaueren Untersuchungen müssen u.a. die Störungen durch die Planeten berücksichtigt werden.

Typen von Sonnenfinsternissen

Bei Sonnenfinsternissen bewegt sich der Mond zwischen der Sichtbahn Sonne-Erde durch. Dadurch kann der Schatten des Mondes die Erde treffen. Man unterscheidet hierbei, je nach geometrischer Lage der Finsternis, mehrere Arten von Sonnenfinsternissen:

- Partielle Sonnenfinsternisse:
 - der Halbschatten des Mondes erreicht die Erde: in polaren Gebieten möglich,
 - Halbschatten außerhalb der Zone der totalen Sonnenfinsternis.
- Totale Sonnenfinsternis:
 - total: der Kernschatten des Mondes überstreicht die Erde (maximale Breite 273 km, momentan maximal bis zu 7:30 min lang),
 - ringförmig: Kernschatten des Mondes trifft die Erde, auf Grund der elliptischen Bahnen von Mond und Erde ist zu diesem Zeitpunkt der scheinbare Durchmesser der Sonne größer als der des Mondes,

- hybride (ringförmig-totale): Kernschatten reicht nicht bis zur Oberfläche → Kugelgestalt der Erde führt dazu, dass in bestimmten Bereichen (in der Mitte der Spur) die Erdoberfläche erreicht wird, Beginn und Ende der Finsternis sind als ringförmige Finsternisse zu beobachten, im Zentrum ist die Finsternis total.

Die totalen Sonnenfinsternisse sind auf Grund ihrer Seltenheit sowie ihrer außergewöhnlichen Effekte besonders beeindruckend.

Typen von Mondfinsternissen

Bei einer Mondfinsternis durchläuft der Mond den Schatten der Erde. Auch hier unterteilt man die Mondfinsternisse in verschiedene Arten:

- totale Kernschattenfinsternis: vollständiges Eintauchen des Mondes in den Kernschatten der Erde, verbunden mit der Rotfärbung des Mondes hervorgerufen durch den langwelligen Anteil des Sonnenlichtes, welcher in der Erdatmosphäre nur wenig abgelenkt wird und dadurch auf den Mond fällt, es können bei entsprechendem Zustand der Erdatmosphäre auch andere Farbschattierung als Rot vorkommen, beispielsweise nach großen Vulkanausbrüchen,
- partielle Kernschattenfinsternis: teilweises Eintreten in den Kernschatten der Erde,
- totale Halbschattenfinsternis: vollständiges Eintauchen des Mondes in den Halbschatten der Erde,
- partielle Halbschattenfinsternisse: teilweises Eintauchen in den Halbschatten der Erde.

Finsternishäufigkeit

Im 21. Jahrhundert können wir insgesamt 85 totale und 57 partielle Kernschattenfinsternisse betrachten. Dabei ist zu beachten, dass für alle Beobachter, für die sich der Mond am Himmel befindet, die Finsternisse prinzipiell beobachtbar sind. Bei Sonnenfinsternissen ist dies auf Grund des geometrisch bedingten kleineren Bereiches, wo diese Finsternisse sichtbar sind, anders. Geht man von einem bestimmten Ort aus, so muss man im Schnitt ca. 375 Jahre auf eine totale Sonnenfinsternis warten - zählt man die ringförmigen hinzu reduziert sich die Wartezeit auf rund 140 Jahre. Für die partiellen Finsternisse beträgt die Wartezeit im Schnitt nur ca. 5 Jahre.

Historisch bedeutsame Finsternisse

Eine herausragende Rolle in der Geschichte spielte unzweifelhaft die totale Sonnenfinsternis vom **29. 05. 1919!** Mit der experimentellen Bestätigung der Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein beschäftigt sich der Hauptartikel in „Sterne und Weltraum“ 5/2019.

Aber es finden sich weitere bedeutende (vor allem) totale Sonnenfinsternisse in der Geschichte. Für den **28. 05. 585 v. C.** wurde angeblich von Thales von Milet eine totale Sonnenfinsternis vorhergesagt. Allerdings wird dies durch verschiedene Astronomiehistoriker angezweifelt, da sie der Meinung sind, dass weder die alten Babylonier noch die alten Griechen die dazu erforderlichen mathematischen Mittel gehabt hätten. Die Überlieferung dieser Vorhersage stammte vom Geschichtsschreiber Herodot. Er beschrieb gleichzeitig, dass durch die Vorhersage und das Eintreten der totalen Sonnenfinsternis ein schon 5 Jahre andauernder Krieg zwischen dem Volk der Lydier und den Medern beendet wurde.

Noch ältere Beschreibungen finden sich in der Bibel und auf Schrifttafeln der alten Babylonier. Die Beschreibung einer ringförmigen Sonnenfinsternis am 30. 10. 1207 v. C. könnte sich in der Bibel (Joshua 10:13) finden lassen. Auf einer ägyptischen Stele (Abb. 2) findet sich der Eintrag über einen Feldzug in Kanaan. U. a. wird dort von einem Volk Israel gesprochen – dann müsste es sich um Ereignisse aus der Zeit um 1200 v. C. handeln. In der Bibel findet sich eine Beschreibung, welche mit einer Sonnenfinsternis erklärbar wäre. Die Einzige zu dieser Zeit dort stattfindende war eben am **30. 10. 1207 v. C.** Damit wäre dies eine der ältesten Beschreibungen einer Sonnenfinsternis – und gleichzeitig für die Historiker eine äußerst wertvolle Information zur „Kalibrierung“ der ägyptischen Pharaonenlisten.

Eine in China vor kurzem bei Auswertung von Orakelschriften gefundene astronomische Beschreibung zählt neben einer Sonnen- und einer Mondfinsternis auch noch einen neuen Stern am Himmel auf. Diese Liste wird auf das **15. Jahrhundert vor Christus** datiert und wäre somit die älteste bekannte Beschreibung von Finsternissen.



Abbildung 2: Die Hieroglyphen auf der Merenptah-Stele berichten von einem Sieg Ägyptens in Kanaan – über ein Volk namens Israel. © Von Webscribe - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8206743>

Bereits im **Altertum** diente die Erklärung der Entstehung einer Mondfinsternis als Argument der Kugelgestalt der Erde: nur eine Kugel zeigt bei jedem beliebigen Einfallswinkel des Sonnenlichtes stets eine Kreisform auf dem Mond! Damit war damals schon klar, dass die Erde keine Scheibe ist.

Die erste von Edmund Halley genau berechnete und vorhergesagte totale Sonnenfinsternis fand **03. 05. 1715** statt. Die zeitliche Abweichung betrug nur 4 Minuten!

Kurz vorher, **1706**, wurde in Frankreich erstmalig eine totale Sonnenfinsternis mit dem Fernrohr beobachtet.

1842 wurde schließlich erstmalig die Korona als Teil der Sonne identifiziert.

Am **28. 07. 1851** gelang die erste Aufnahme einer totalen Sonnenfinsternis durch den Preußen Berkowski (siehe Abb. 3).

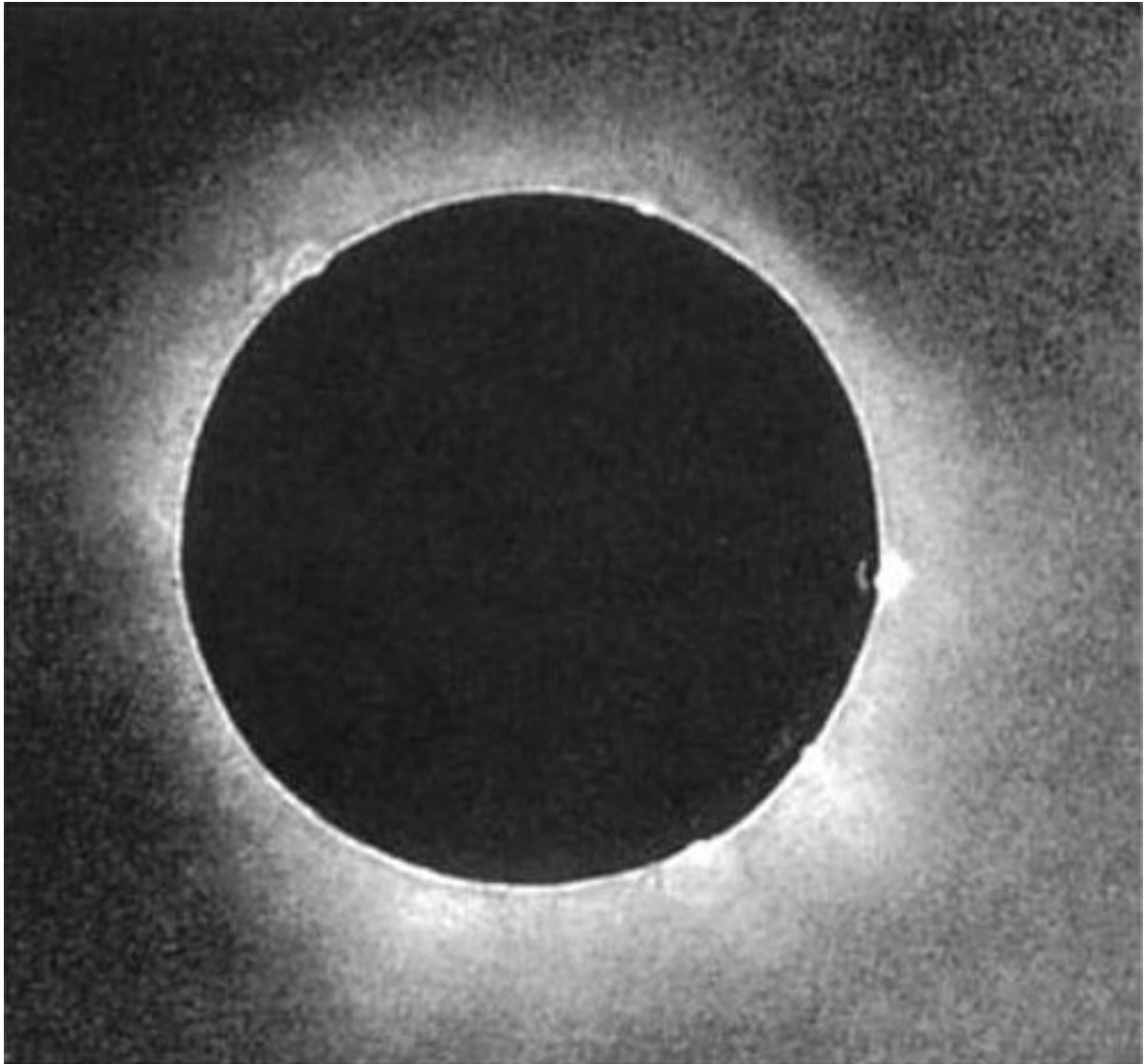


Abbildung 3: Älteste Fotografie einer Sonnenfinsternis: 28. 07. 1851: Kgl. Sternwarte Königsberg Preußen durch Johann Julius Friedrich Berkowski

© http://xjubier.free.fr/site_stickers/solar_corona_shape/1851_07_28_Berkowski.jpg, Public Domain,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8534863>

Bei der Sonnenfinsternis vom **18. 08. 1868** wurden erstmals spektroskopische Beobachtungen durchgeführt was zur Aufklärung der chemischen Zusammensetzung der Sonne beitrug. Höhepunkt dieser Beobachtungen war dabei die Entdeckung des zweit leichtesten Elements – Helium, benannt nach dem griechischen Wort für Sonne, Helios - durch den Franzosen Jules Janssen.

Veränderungen im System Sonne-Erde-Mond und ihre Auswirkungen

Die Auswertung der zahlreichen Beschreibungen von totalen Sonnenfinsternissen, welche sich in den Chroniken, Annalen etc. der Babylonier, Griechen, Chinesen, Ägypter etc. finden lassen, wurden durch Astronomen und Historiker genau untersucht und überprüft. Dabei stellte es sich heraus, dass viele der beschriebenen totalen Finsternisse gar nicht in dem Bereich hätten stattfinden dürfen, wo sie beschrieben wurden! Verursacht wurden dies Abweichungen – so ergaben es genauere Untersuchungen – durch eine langfristige Verlangsamung der Erdrotation.

Durch die Auswertung der alten Beschreibungen der Gebiete, in denen eine Sonnenfinsternis ihren totalitären Bereich hatte, konnten ganz konkrete Berechnungen über die Größe der Abbremsungsrate der Erdrotation erhalten werden. Die Auswertung von Finsternissen der letzten 2700 Jahre ergab, dass die Rotationsdauer der Erde – und damit die Tageslänge – im Mittel um 17 Mikrosekunden pro Jahr abnimmt.

Wo liegt nun die Ursache für die Abbremsung der Erde? Die Erdrotation wird durch viele Faktoren beeinflusst. Da sind geologische (Umverteilungen von Materie innerhalb des Erdmantels und des Erdkerns, Erdbeben, Seebeben etc.), geographische (Verteilung der Landflächen) aber hauptsächlich astronomische. Der wichtigste Einflussfaktor ist der Himmelskörper, welcher für die Sonnenfinsternis sorgt – der Mond.

Im System Erde-Mond gilt der **Drehimpulserhaltungssatz** - insofern man das System als abgeschlossen ansieht. Die einzelnen Anteile können Tab. 1 entnommen werden.

	Größe	Anteil
Gesamt	$3,49 \cdot 10^{34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$	100 %
Mond-Eigendrehimpuls	$2,33 \cdot 10^{29} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$	-
Mond Bahndrehimpuls	$2,87 \cdot 10^{34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$	82,2 %
Erde-Eigendrehimpuls	$5,85 \cdot 10^{33} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$	16,8 %
Erde-Eigendrehimpuls	$3,53 \cdot 10^{32} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$	1,0%

Tabelle 1: Drehimpulsanteile im Erde-Mond-System.

Die Gezeitenreibung beeinflusst den Betrag des Drehimpulses. Der Mond bremst die Erde ab und verringert dadurch den Eigendrehimpuls der Erde – sie wird langsamer. Da die Erde mit ihrer 81-mal größeren Masse einen wesentlichen stärkeren Einfluss auf den Mond ausgeübt hat, erleben wie aktuell eine gebundene Rotation des Mondes – wir sehen nahezu nur eine Seite des Mondes. Wenn der Mond sich einmal um sich selbst dreht, dreht er sich auch einmal um die Erde. Durch leichte Schwankungen (Libration in Länge und Breite) der Mondbewegung sind wir in der Lage ca. 59 % der Mondoberfläche zu sehen. Der Blick auf die Rückseite bleibt uns dagegen von der Erde aus verschlossen. Erst im Jahre 1959 wurden von der sowjetischen Raumsonde Lunik 3 die ersten Bilder von der Mondrückseite zur Erde übertragen (siehe Abb. 4).

Viel später - 60 Jahre danach - am 03. 01. 2019 gelang es einer chinesischen Raumsonde als erste überhaupt eine erfolgreiche weiche Landung auf der Mondrückseite zu realisieren.

Da der Mond seitdem einen vergleichsweise vernachlässigbaren Eigendrehimpuls besitzt, führt die Abbremsung der Erde zu einem anderen Effekt – der Mond entfernt sich von der Erde. Die Abstandsänderung beträgt 3,82 cm pro Jahr. Die hohe Genauigkeit dieses Wertes sind Laserentfernungsmessungen zu verdanken. Die Apollo-Missionen sowie verschiedene russische Missionen haben auf dem Mond Reflektoren aufgestellt, welche von der Erde mit Laserstrahlen angestrahlt werden. Von den zurück reflektierten Photonen wird die Laufzeit gemessen und auf diese Weise kann die Mondentfernung und somit auch die Rate ihrer Änderung bestimmt werden.

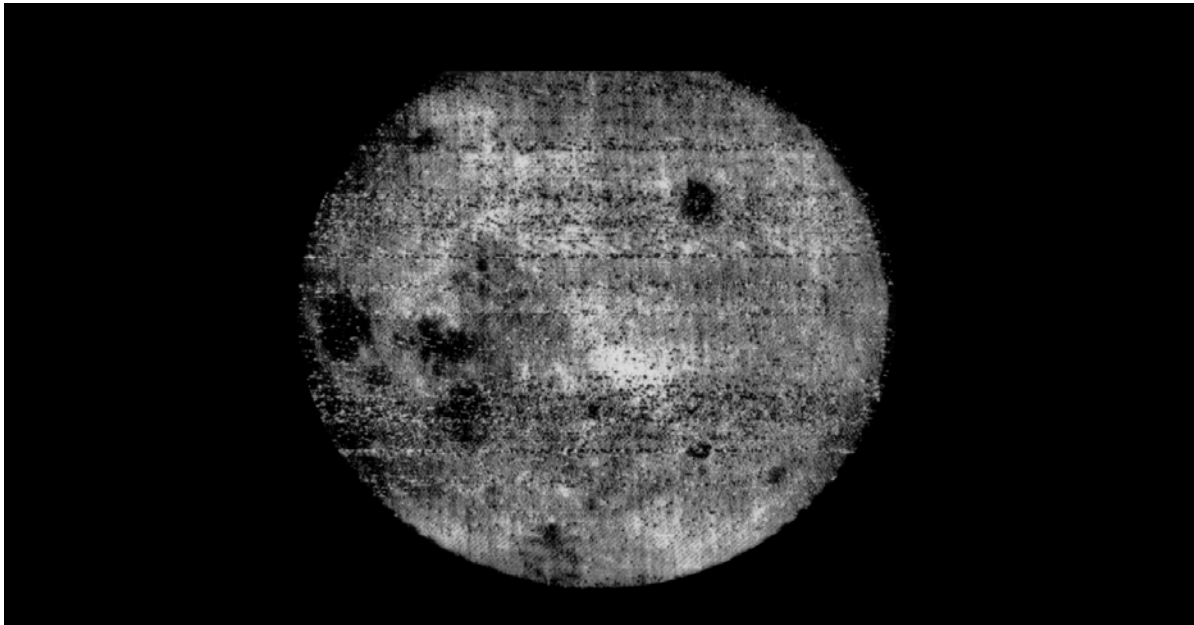


Abbildung 4: Erste Aufnahme der Mondrückseite von Lunik 3
 Von OKB-1 - http://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/html/mission_page/EM_Luna_3_page1.html,
 Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=42870638>

Eine Extrapolation und Rückrechnung sollte also zur Tageslänge im Anfangszeitalter der Erde führen – aber wie weit geht dies zurück? War der Mond schon immer da? Wann kommt es zur Umverteilung des Drehimpulses im System? Aus verschiedenen Untersuchungen und Messungen ergab sich das Alter des Mondes zu (4527 +/- 10) Millionen Jahren. Zur Entstehung des Mondes wurden viele verschiedene Theorien aufgestellt (https://de.wikipedia.org/wiki/Entstehung_des_Mondes) – die aktuell bevorzugte Theorie geht von einem Zusammenstoß der Ur-Erde mit einem Objekt von ca. 1/3 der Größe der Erde – Theia genannt – aus. Bei diesem Zusammenstoß wurde riesige Menge an Material von den Kollisionspartnern in eine Erdumlaufbahn geschleudert wo diese sich innerhalb kürzester Zeit $t < 1000$ a zum Ur-Mond verbanden. Dieser umlief die damals wesentlich schneller rotierende Erde in einer Umlaufbahn mit einem Abstand von 60.000 km. Durch die Nähe des Mondes war die Häufigkeit der Sonnenfinsternisse deutlich höher als heute – nahezu jede war total.

Durch die Gezeitenreibung wurde die Umdrehung des Mondes so lange gebremst, bis sich der energetisch beste Zustand der gebundenen Rotation einstellte. Gleichzeitig entfernte sich der Mond von der Erde und die Erde wurde ebenso gebremst. Bei einer Extrapolation in die Zukunft ergibt sich, dass in ca. 600 Millionen Jahren (space.com Richard Vondrak Goddard Space Flight Center) der Mond sich so weit von der Erde entfernt hat, dass er die Sonne nicht mehr vollständig bedecken kann. Die Gesetze der Erhaltung des Drehimpulses führen in knapp 4 Milliarden Jahren dazu, dass eine Drehung des Mondes um sich genauso lang sein wird wie eine Drehung der Erde um sich und eine Umrundung der Erde durch den Mond: 47,7 Tage! Wir sprechen dann von einer doppelt gebundenen Rotation – Mond und Erde stehen dann „face to face“.

Allerdings wird dies nicht lange andauern. Durch die Entwicklung der Sonne zum Roten Riesen wird das System Erde-Mond zwar wahrscheinlich nicht vollständig verglühen, aber die äußerste Atmosphäre des Riesensterns reicht bis um Erde-Mond System. Dann sorgen Reibungseffekte dafür, dass der Mond sich immer weiter der Erde nähert und schließlich bei einem Abstand von ca. 18000 km durch die Gezeitenkräfte zerrissen wird und die Trümmer zum Teil wieder auf die Erde fallen und zum Teil einen Ring um die Erde herum bilden. Damit kommt das Ende des Mondes in ca. 4,5 Milliarden Jahren. Seine gesamte Lebensdauer wird also rund 9 Milliarden Jahre betragen (space.com „Earth moon destined to Disintegration; 22. 01. 2007).

Finsternisse mal anders

Allerdings gibt es auch andere Blickwinkel auf eine Finsternis. Am **09. 02. 2009** wurde von der japanischen Raumsonde Kaguya eine partielle Mondfinsternis aufgenommen (Abb. 5). Die von der Erde aus definierte Mondfinsternis erscheint für einen Beobachter auf dem Mond als Sonnenfinsternis!

Solch ein seltenes Schauspiel wurde bereits am **24. 04. 1967** von der amerikanischen Raumsonde Surveyor 7 fotografiert (siehe Abb. 6).

Die Raumfahrer von Apollo 12 sahen den Diamantringeffekt live (**1969**).

Inzwischen gibt es aber auch Aufnahmen vom Marsrover Curiosity. Von der Oberfläche des Mars aus filmte er eine Sonnenfinsternis – hervorgerufen durch den Marsmond Phobos (siehe Abb. 7, **28. 08. 2013**).



Abbildung 5: Eine von der japanischen Raumsonde Kaguya vom Mond aus fotografierte Halbschatten-Mondfinsternis, die man auf der Erde stehend kaum wahrnehmen kann. Aus Sicht der Sonde (vom Mond aus gesehen) ist es einen Sonnenfinsternis. © JAXA/NHK.

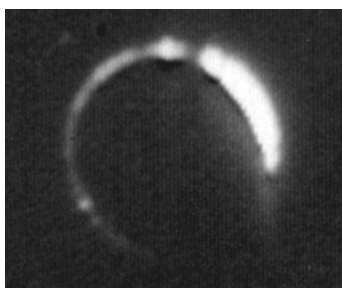


Abbildung 6: Die Sonde Surveyor 7 fotografierte schon 1967 eine (für den Erdbeobachter definierte Mondfinsternis) vom Mond aus (als Sonnenfinsternis). © NASA.

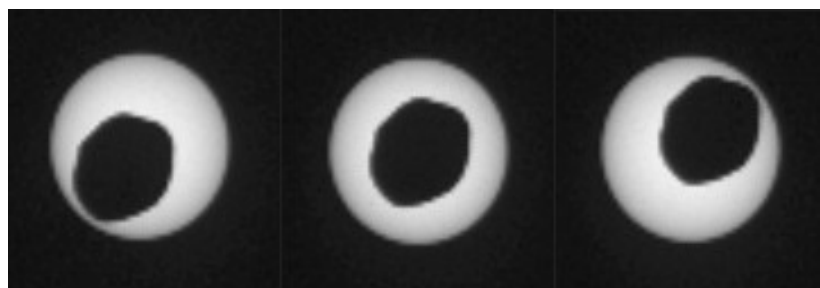


Abbildung 7: Sonnenfinsternis auf dem Mars, fotografiert durch den Marsrover Curiosity. Man sieht die Silhouette des Marsmonds Phobos.
© NASA/JPL-Caltech/Malin Space Science Systems/Texas A&M Univ. - Image PIA17356 at NASA/JPL, Public Domain,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27929519>

Zusammenfassung

Sonnenfinsternisse waren/sind nicht nur immer die wohl spektakulärsten Erscheinungen am Himmel. Sie lieferten und liefern der Wissenschaft nach wie vor viele Entdeckungen die zur Verbreiterung unseres astronomischen aber auch weltanschaulichen Bildes beitragen.

Ein besonders schönes Beispiel für eine Bedeckung liefert die Raumsonde Cassini – der Saturn bedeckt die Sonne!

Fragen für den Unterricht

Frage 1

In 4 Milliarden Jahren beträgt die Erdentfernung des Mondes $r_{\text{Mond}} = 540000$ km. Wie groß ist dann sein scheinbarer Durchmesser α_{Mond} im Vergleich zu heute?

Antwort

Monddurchmesser: $d_{\text{Mond}} = 3476$ km

mittlerer scheinbarer Monddurchmesser α_{Mond} heute: ca. 32'

$$\alpha_{\text{Mond}} = 2 \cdot \arctan\left(\frac{d_{\text{Mond}}}{2 \cdot r_{\text{Mond}}}\right) = 2 \cdot \arctan\left(\frac{3476 \text{ km}}{2 \cdot 540000 \text{ km}}\right) \approx 0,369^\circ \approx 22'.$$

Das heißt, der scheinbare Durchmesser wird etwa 2/3 des heutigen Wertes besitzen.

Frage 2

Aristarch von Samos (310 - 250 v. C.) schlug eine geometrische Methode zur Bestimmung der Entfernung der Erde von der Sonne vor. Bei genauer Halbmondstellung sollte sich ein rechtwinkliges Dreieck zwischen Sonne, Erde und Mond ergeben. Damit lässt sich die Sonnenentfernung berechnen.

Antwort

Bei Messung der Visierlinien zwischen Erde- Sonne (ES) und Erde-Mond (EM) kann man den Winkel zwischen den beiden Linien messen.

$$\cos(\beta) = \frac{\overline{EM}}{\overline{ES}}$$

Aristarch bestimmte den Winkel zu $\beta = 87^\circ = 0,0523$. Mit diesen Werten erhielt er: $\overline{ES} = 19 \cdot \overline{EM}$.

Das Prinzip der Messung ist vollkommen richtig, aber die Winkelmessung ist äußerst schwer und mathematisch führen kleine Abweichungen zu großen Fehlern.

Mit modernen Methoden erhält man: $\beta = 89^\circ 51'$ (89 Grad und 51 Bogenminuten). Mit diesem Wert erhält man: $\beta = 89,51^\circ = 0,00261$ und damit $\overline{ES} = 381 \cdot \overline{EM}$.

Der scheinbar kleine Unterschied im Winkel führt zu einer großen Änderung im Abstand!

Ergänzungsaufgabe

Aristarch suchte die absoluten Entfernungen \overline{ES} und \overline{EM} . Dazu nutzte er folgende Erkenntnisse:

- Aristarch schlussfolgerte aus seinem Ergebnis $\overline{ES} = 19 \cdot \overline{EM}$ und der Tatsache, dass Sonne und Mond am Himmel etwa gleich groß erscheinen, dass sich ihre tatsächlichen Größen auch um den Faktor 19 voneinander unterscheiden müssen.
- Durch genaue Analyse mehrerer totaler Mondfinsternisse fand Aristarch heraus, dass der Mond (am Ort des Mondes) im Erdschatten „zweimal Platz hat“ im Schatten der Erde ist. Damit konnte er bestimmen, dass der Mondradius nur 0,35-mal so groß wie der der Erde war.
- Eratosthenes (276-195 v. C.) bestimmte schließlich den Erdumfang zu 39375 m. Mit diesen Größen war dann an Hand der geometrischen Überlegungen des Aristarch die Bestimmung der Mondentfernung möglich. Die alten Griechen erhielten eine Mondentfernung von 20 Erdradien!

Berechne die Abstände Erde-Mond und Erde-Sonne an Hand der Daten, die Aristarch zur Verfügung standen und vergleiche diese mit den aktuellen Werten! Diskutiere die Unterschiede!