

Betrachten einer Mondfinsternis

Wahrnehmungen und Gedanken

UDO BACKHAUS

Die bewusste Beobachtung einer Mondfinsternis ist immer wieder faszinierend und kann zu vielfältigen astronomischen und optischen Überlegungen anregen. In den Jahren 2018 und 2019 werden nach einer langen finsternisarmen Pause zwei Mondfinsternisse von Europa aus zu beobachten sein, bevor wieder eine längere Periode ohne Finsternisse beginnt. Dieser Aufsatz soll anregen, sich auf diese Finsternisse vorzubereiten, um an ihnen Beobachtungen, Messungen und Überlegungen über den Mond anzustellen.

1 Einleitung

Am 28. September 2015 wurde der Mond zum ersten Mal nach vier Jahren total verfinstert, und die folgende von Europa aus vollständig beobachtbare totale Mondfinsternis wird erst am 21. Januar 2019 stattfinden. Deshalb nahm ich mir vor, die Finsternis 2015 von einem optimal gelegenen Balkon von Nachbarn aus vollständig zu beobachten und zu fotografieren. Abbildung 1 vermittelt einen Eindruck davon, dass sich der Aufwand gelohnt hat, obwohl die Finsternis zu einer sehr unbequemen Nachtzeit, zwischen 3:00 MESZ und 6:30 MESZ, stattfand.

Meine Fotoausrüstung bestand aus einer Canon 60D, die über einen Fotoansatz mit einem Zeiss-Spektiv verbunden war, und einem Laptop, von dem aus ich die Bildschärfe kontrollieren und auch die Kamera auslösen konnte. Der Kopf meines Stativs ist um eine vertikale und eine horizontale Achse mit Feintrieb per Hand nachjustierbar (azimutale Montierung). Ich führte die Kamera so der Mondbewegung nach, dass die untere Kante immer parallel zum Horizont blieb.

2 Beobachtungen

Um später die Bilder so drehen zu können, dass die Richtung zum Himmelsnordpol immer senkrecht auf der unteren Bildkante steht, machte ich mit fixierter Kamera jeweils zwei Aufnahmen im Abstand von 150 s und überlagerte diese Bilder anschließend zu einer »doppelt belichteten« Aufnahme – ein Verfahren, das sich bei den vergangenen Transits von Venus und Merkur bewährt hat. Die so entstandenen Doppelbelichtungen (Abb. 2, links) zeigen, dass sich der Mond in der kurzen Zwischenzeit um mehr als seinen Durchmesser weiterbewegt. Diese Positionsveränderung setzt sich zusammen aus der Drehung des gesamten Himmels (aufgrund der Erddrehung) und der Bewegung des Mondes um die Erde.

Während einer mehrstündigen Beobachtung kann man schon mit bloßen Augen wahrnehmen, dass sich das »Gesicht« des Mondes im Uhrzeigersinn dreht. Abbildung 2 rechts veranschaulicht diese Drehung anhand der Überlagerung zweier im Abstand von 45 Minuten aufgenommenen Doppelbelichtungen. Es zeigt sich, dass sich die Bahn des Mondes während der Finsternis immer steiler zum Horizont neigt. Bei dieser sogenannten *Bildfelddrehung* dreht sich auch der gesamte, hier nicht sichtbare Sternenhintergrund.

Während der Mond immer tiefer in den Kernschatten der Erde eintauchte, nahm ich den noch nicht eingetauchten Teil des Mondes als etwa gleichbleibend hell wahr. Die mit einer konstanten Belichtungszeit von 1/200 s im zeitlichen Abstand von etwa vier Minuten aufgenommenen Fotos zeigen jedoch eine starke Helligkeitsabnahme (Abb. 3, siehe auch Abb. 4). Außerdem erschien mir der Rand des Kernschattens in der direkten Wahrnehmung schärfer, als er objektiv sein kann. Schließlich wäre für einen Astronauten auf der Mondoberfläche, der sich dem Rand des Kernschattens nähert, ein immer größerer Teil der Sonne durch die Erde verdeckt. Orte im Übergangsschatten, der leider fast immer als »Halbschatten« bezeichnet wird, werden also umso weniger beleuchtet, je näher sie sich am Rand des Kernschattens befinden. Diesen Effekt zeigen auch die Fotos.



Abb. 1. Der partiell verfinsterte Mond um 3:47 Uhr MESZ (links) und kurz nach Beginn der Totalität um 4:16 Uhr MESZ (rechts) am 28.9.2015



Abb. 2. Im Abstand von 150 Sekunden doppelt belichtetes Mondfoto von 2:59 Uhr (links) und seine Überlagerung mit dem Bild von 3:44 Uhr (links)



Abb. 3. Die Helligkeit des noch nicht in den Kernschatten eingetretenen Teils des Mondes nimmt stark ab.

ne-Erde-Mond hineinzusetzen, und ich konnte beobachten, was man sonst nur aus Büchern oder von Weltraumfotos weiß: Die Erde ist nicht nur »oben« gerundet wie ein Zaunpfahl, der fest auf sicherem Grund steht, sondern schwebt als Kugel frei im Raum – ein Umstand, in den man sich auch heute noch nur schwer hineinendenken kann. In den Worten WAGENSCHAINS: »Das eigentlich Schreckliche (an der Rundung der Erde, U. B.) ist ja, daß diese »Wurzel« fehlt, daß es rundum geht, auch unten herum.« (WAGENSCHAIN, 1988)

Die während der Totalität durch die Dispersion bei der Brechung des Sonnenlichts in der Erdatmosphäre hervorgerufene Rotfärbung des »Blutmondes« (Abb. 1, rechts) konnte ich leider nur kurz bewundern, weil Nebel aufkam, der den zweiten Teil der Finsternis vor mir verbarg.

Kurz vor Beginn der Totalität war auf dem Mond der untere Teil des Erdschattens zu sehen (Abb. 1 links, der Horizont ist parallel zur unteren Bildkante), d. h. der Schatten des Teils der Erde, auf dem unsere »Antipoden« leben, die Australier zum Beispiel. Dadurch gelang es mir, mich in die Konstellation Son-

ne-Erde-Mond hineinzusetzen, und ich konnte beobachten, was man sonst nur aus Büchern oder von Weltraumfotos weiß: Die Erde ist nicht nur »oben« gerundet wie ein Zaunpfahl, der fest auf sicherem Grund steht, sondern schwebt als Kugel frei im Raum – ein Umstand, in den man sich auch heute noch nur schwer hineinendenken kann. In den Worten WAGENSCHAINS: »Das eigentlich Schreckliche (an der Rundung der Erde, U. B.) ist ja, daß diese »Wurzel« fehlt, daß es rundum geht, auch unten herum.« (WAGENSCHAIN, 1988)

Ich habe die jeweils zuerst aufgenommenen Mondbilder der Doppelbelichtungen genau übereinander gelegt, nachdem ich



Abb. 4. Der Mond um 19:26 deutlich vor der Finsternis (links) und kurz nach Beginn der partiellen Phase um 2:59 (Mitte). Das Differenzbild (rechts) zeigt die Größenänderung.

ihre Mittelpunkte bestimmt hatte, und die Überlagerung als animiertes gif-Bild abgespeichert. In der Animation macht sich deutlich die Drehung des Bildfeldes während der 80-minütigen Aufnahmezeit bemerkbar. Mit Hilfe der Doppelaufnahmen kann diese Drehung beseitigt werden, indem die Bilder so gedreht werden, dass die Verbindungslinie der beiden Mittelpunkte parallel zur unteren Bildkante verläuft¹.

Die Positionen der Mittelpunkte und die Drehwinkel können mit vielen Bildbearbeitungsprogrammen gemessen werden. Ich verwendete dazu ein kleines selbst geschriebenes Programm *evaltransitpicts.exe*, das für die Ausmessung von Transitfotos geschrieben wurde (Download unter <http://www.venus2012.de/stuff/evaltransitpicts.zip> [25.9.2017]).

3 Nachträgliche Überlegungen

Die scheinbar gleich bleibende Helligkeit des noch nicht in den Kernschatten eingetauchten Teils des Mondes ist das Ergebnis zweier wahrnehmungsphysiologischer Effekte: der zunehmenden Dunkeladaptation der Augen und der durch die sogenannte *laterale Hemmung* bewirkten Kontrastverstärkung auf der Netzhaut. Letztere hat zur Folge, dass an einer Hell-Dunkelkante der dunkle Rand dunkler und der helle Rand heller wirken². Dieser Effekt ist dafür verantwortlich, dass der Rand des Kernschattens auf dem Mond schärfer gesehen wird, als er objektiv ist – auch auf Fotos.

Die Bildfelddrehung ist eine Folge der Montierung (BACKHAUS & SCHLICHTING, 2017): Die Kamera wird durch Drehung um eine vertikale und um eine horizontale Achse dem Mond nachgeführt. Bei professionellen Teleskopen mit azimuthaler Montierung ist zusätzlich ein *Derotator* eingebaut, der die Kamera automatisch so dreht, dass die Drehung des Bildfeldes kompensiert wird. Bei Teleskopen mit parallaktischer Montierung tritt der Effekt nicht auf. Bei ihnen geschieht die Nachführung durch Rotation um nur eine Achse; sie ist parallel zur Erdachse orientiert.

Erst bei der nachträglichen Auswertung bemerkte ich, dass der Mond auf dem Testbild, das ich mehr als sechs Stunden vor den anderen Bildern aufgenommen hatte, etwas kleiner als auf den späteren Aufnahmen abgebildet ist (Abb. 4). Der Unterschied ist zwar klein, aber mit 5 Pixeln doch deutlich. Um 19:26 Uhr war der Mond erst kurz vorher aufgegangen. Während der ersten Phase der Verfinsternung stand er dagegen hoch am Himmel. Die *Mondillusion* (FEITZINGER, 1996, ROSS & PLUG, 2002), die uns den aufgehenden Mond größer erscheinen lässt als den hochstehenden Mond, wird durch die Fotos nicht nur widerlegt. Sie wird sogar in ihr Gegenteil verkehrt!

In der Zwischenzeit hatte sich die Erde mehr als 90° gedreht. Wie man sich anhand einer Zeichnung leicht klar machen kann, hatte sich mein Wohnort Hannover dadurch seit dem Mondaufgang auf den Mond zubewegt. Der Abstand zwischen der Kamera und dem Mond hatte sich dabei verringert.

4 Quantitative Auswertung

Ich hatte keine Messungen während der Finsternis geplant. Erst nachträglich entstand die Idee, durch Ausmessen der Fotos die Entfernung des Mondes auf zwei unterschiedliche Arten näherungsweise zu bestimmen.

Eine der ältesten Methoden zur Messung der Mondentfernung geht auf Hipparch zurück (WOLF, 1973). Sie beruht auf dem Vergleich zwischen den Größen des Mondes und des Kernschattens der Erde. Das Verfahren wird in einer Aufgabe des »Astronomischen Schlechtwetter-Praktikums« (BACKHAUS, o. J.) auf ein gekauftes Foto des partiell verfinsterten Mondes angewendet. Die Aufnahmen des etwa halb in den Kernschatten der Erde eingetauchten Mondes liefern nun eigenes Material zur Anwendung dieser Methode, die hier am Beispiel des um 3:40 Uhr aufgenommenen Bildes demonstriert werden soll.

Ausgangspunkt ist die sogenannte Finsternisgleichung (Kasten 1), die durch zwei Näherungen weiter vereinfacht werden kann: Aus der Beobachtung von Sonnenfinsternissen ist bekannt, dass die Winkelradien von Sonne und Mond r_s und r_m am Himmel ungefähr gleich groß sind ($r_s \approx r_m$). Berücksichtigt man außerdem, dass die Sonne viel weiter von der Erde entfernt ist als der Mond, die Parallaxe π_s der Sonne also viel kleiner als die des Mondes π_m ist ($\pi_s \ll \pi_m$), dann vereinfacht sich die Finsternisgleichung zu

$$\pi_m = r_m + r_{KS} = r_m \left(1 + \frac{r_{KS}}{r_m} \right) \tag{1}$$

Um die Mondparallaxe bestimmen zu können, muss also das Verhältnis der Radien von Kernschatten und Mond gemessen werden. Aus π_m ergibt sich aber sofort die Mondentfernung D_m als Vielfaches des Erdradius R_E :

$$D_m = \frac{1}{\pi_m} R_E \tag{2}$$

Dabei ist die Mondparallaxe im Bogenmaß einzusetzen.

Auf dem Foto (Abb. 6) misst man (z. B. mit *evaltransitpicts*) die folgenden Werte für die Radien:

$$r_m = 920 \text{ Px}, r_{KS} = 2100 \text{ Px} \Rightarrow \frac{r_{KS}}{r_m} = 2,61.$$

Damit ergibt sich aus (2) für die Entfernung des Mondes

$$D_m = \frac{1}{3,61} R_E.$$

¹ Beide Bildserien können unter <http://www.astronomie-und-internet.de/images/origEinzelbilderk.gif> und <http://www.astronomie-und-internet.de/images/gedrEinzelbilderk.gif> heruntergeladen werden [25.9.2017].

² siehe z. B. https://en.wikipedia.org/wiki/Lateral_inhibition [25.9.2017], wo auch auf die bekannte optische Illusion der »Mach'schen Streifen« hingewiesen wird.

Das Diagramm (Abb. 5) zeigt die Sonnenstrahlen, die die Grenzen von Kern- und Übergangsschatten bei einer Mondfinsternis bilden. Eingezeichnet sind vier Winkel, die die folgenden Bedeutungen haben:

- 1 = r_{KS} Winkelradius des Kernschattens, von der Erde aus gesehen
- 2 = r_s Winkelradius der Sonne, von der Erde aus gesehen,
- 3 = π_M Winkel, unter dem vom Mond aus gesehen der Erdradius erscheint (**Mondparallaxe**), und
- 4 = π_s Winkel, unter dem von der Sonne aus gesehen der Erdradius erscheint (**Sonnenparallaxe**).

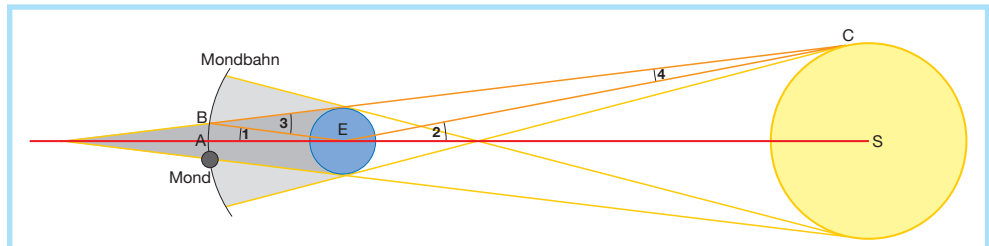


Abb. 5. Zur Ableitung der Finsternisgleichung

Betrachtet man das Dreieck *BEC*, dann erkennt man die folgende Beziehung zwischen diesen Winkeln:

$$\pi_M + \pi_s = r_s + r_{KS} \text{ (Finsternisgleichung)}$$

(Die Winkelsummen auf beiden Seiten der Gleichung ergänzen den stumpfen Winkel des Dreiecks zu 180° .)

Kasten 1. Die Finsternisgleichung

Um die Entfernung des Mondes als Vielfaches des Erdradius angeben zu können, muss noch der Winkelradius r_M des Mondes bestimmt werden. Dazu braucht man den Abbildungsmaßstab der Kamera. Man kann ihn am leichtesten bestimmen, indem man ein Sternfeld fotografiert, das Sterne enthält, deren Koordinaten bekannt sind, sodass ihr Winkelabstand berechnet werden kann.

Man kann den Abbildungsmaßstab auch aus dem Abstand der beiden Mondbilder einer Doppelbelichtung berechnen, wenn man die Zeitdifferenz und die Eigenbewegung des Mondes berücksichtigt. Auf diese Weise habe ich den Abbildungsmaßstab meines optischen Systems beim Merkurtransit desselben Jahres bestimmt. Aus den während des Transits aufgenommenen Doppelbildern der Sonne (deren Eigenbewegung (ca. 1° /Tag) gegenüber der Rotation des Himmels (ca. 15° /Stunde) vernachlässigt werden kann) ergab sich der Abbildungsmaßstab zu $M = 1,10''/\text{Px}$.

Der Radius des Mondes auf dem Bild von 920 Pixel entspricht deshalb einem Winkelradius von $r_M = 16,85'$.

In astronomischen Kalendern oder mit Planetariums- oder Astrometrieprogrammen (z. B. GUIDE 9) kann man den »korrekten« Wert finden: $r_M = 16,9'$.

Aus Gleichung (3) ergibt sich nun die Entfernung des Mondes, wenn man r_M im Bogenmaß einsetzt: $D_M = 57,0 R_E$. (Als »wahren« Wert findet man: $D_M = 55,4 R_E$.)

Die zunehmende (Winkel-) Größe des Mondes zwischen 19:26 und 2:59 MEZ beruht auf der Annäherung des Beobachters an den Mond. Im Prinzip muss es also möglich sein, aus der relativen Größenänderung auf die Abstandsänderung zu schließen und daraus die Entfernung des Mondes ein zweites Mal zu berechnen. Leider erwies sich jedoch die Größenänderung als zu klein, die Unsicherheit deshalb als zu groß, um ein sinnvolles quantitatives Ergebnis angeben zu können. Diese Messung, die

ja nicht auf das Auftreten einer Mondfinsternis angewiesen ist, kann aber jederzeit wiederholt werden. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass sich die Höhe des Mondes über dem Horizont zwischen den Aufnahmezeitpunkten möglichst stark ändert (BACKHAUS, 2017).

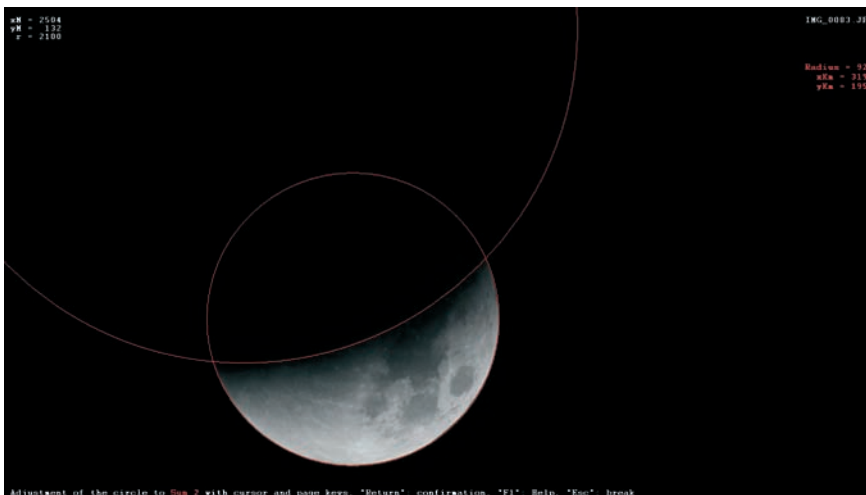


Abb. 6. Messung der Radien von Mond und Erdschatten mit evaltransitpicts.exe

5 Rückblick und Ausblick

Beim ruhigen Betrachten einer Mondfinsternis lassen sich viele Aspekte beobachten, für die man in der Regel nicht die Muße hat: das Aufsteigen des Mondes oder, wie 2015, sein Abstieg Richtung Horizont, seine Bewegung vor dem Hintergrund der Sterne, von denen während

der zunehmenden Verfinsterung des Mondes immer mehr sichtbar werden, Eintritt und Austritt des Mondes aus dem Kernschatten der Erde (der als Wanderung des Schattens über den Mond wahrgenommen wird), die Resthelligkeit des Mondes außerhalb des Kernschattens und evtl. seine Färbung während der Totalität. Der mehrere Stunden dauernde Vorgang lässt Zeit, die Gedanken wandern zu lassen und Verbindungen zu anderen Erfahrungen und Kenntnissen zu ziehen. Dazu soll dieser Aufsatz anregen.

Der Gedanke an den Aufsatz von MARTIN WAGENSCHNEIDER (WAGENSCHNEIDER, 1988) und die Beobachtung des Schattens von Australien auf dem Mond riefen in mir die Erinnerung an eine Mondfinsternis wach, die ich vor vielen Jahren mit meiner Familie während einer Fahrt auf der Autobahn beobachtet hatte. Wir sahen vor uns am vollständig klaren Himmel mit perfekter Horizontsicht den Vollmond aufgehen. Er war partiell so verfinstert, dass seine untere Hälfte bereits in den Kernschatten eingetaucht war. Wir hielten sofort auf einem Parkplatz. Ich erklärte die Situation dadurch, dass ich meine Frau und meine Kinder zunächst in Richtung der gerade untergegangenen Sonne und dann zum Mond blicken und die Arme gleichzeitig in beide Richtungen ausstrecken ließ. Auf diese Weise in die Konstellation hineinversetzt wurde auf einmal klar: Es ist der Schatten unserer Erde, der den Mond verdunkelt – und zwar des Teils der Erde, auf dem wir gerade stehen! Wir sprangen hoch und winkten, aber unsere Schatten waren zu klein, als dass wir sie auf dem Mond hätten beobachten können. Selbst wenn wir an den »benachbarten« Eiffelturm gedacht hätten – ein nachträglicher Einfall meiner älteren Tochter –, hätten wir seinen Schatten wohl nicht entdeckt.

Leider habe ich damals nicht fotografiert, und ich kenne kein entsprechendes Foto mit Horizont und partiell verfinstertem Mond. Aber es war jetzt leicht, die entsprechende Mondfinsternis mit Hilfe von Planetariumssoftware zu finden (s. Kasten 2).

Wenn man sich die kommenden Mondfinsternisse vorausberechnen lässt, zeigt sich, dass in den nächsten Jahren von Deutschland aus sichtbare Mondfinsternisse leider selten sind (Tab. 1). Am 27. Juli 2018 geht der Mond erst bei Beginn der Totalität auf, und erst gegen Ende der Totalität ist es richtig dunkel. Erst am 21. Januar 2019 ist wieder eine ganze Finsternis gut zu beobachten – allerdings zu einer unbequemen Zeit.

Um von Deutschland aus wieder versuchen zu können, dem eigenen Schatten auf dem Mond zuzuwinken (30. Oktober 2050), oder die Erde ohne »Fuß« als freischwebend im Weltraum wahrnehmen zu können (13. März 2044), muss man sehr lange warten – oder weit reisen, am 21.1.2019 z. B. auf die Fidschi-Inseln.

Literatur

BACKHAUS, U. (o. J.). Astronomisches Schlechtwetter-Praktikum: Die Mondentfernung. <http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/AstroPraktikum/Mondentfernung/Mondentfernung.pdf> [3.2.2017].

BACKHAUS, U. & SCHLICHTING, H. J. (2017). Der Silberblick des Mondes und die Zentralperspektive. *MNU*, 70(4), 221–226.

Als wir versuchten, kurz nach Sonnenuntergang auf dem partiell verfinsterten Mond unsere Schatten zu entdecken, waren meine Töchter (geb. 1974 und 1976) nach meiner Erinnerung ungefähr zehn Jahre alt. Diese Information genügte, um mir mit einem Planetariumsprogramm (z. B. GUIDE 9) die Daten der in Frage kommenden Mondfinsternisse anzeigen zu lassen. Bereits die zweite Mondfinsternis, deren Verlauf ich mir mit demselben Programm anzeigen ließ, war der Volltreffer: Es muss der 4. Mai 1985 gewesen sein. An jenem Tag ging der Mond kurz vor 20 Uhr MEZ in Deutschland auf. Der Eintritt in den Kernschatten war ca. 40 Minuten früher erfolgt. Die Simulation (s. Abb. 7) zeigt, dass zu dieser Zeit der Mond für die Sonne bzw. die Sonne für den Mond teilweise verdeckt wird – und zwar durch Nordeuropa.

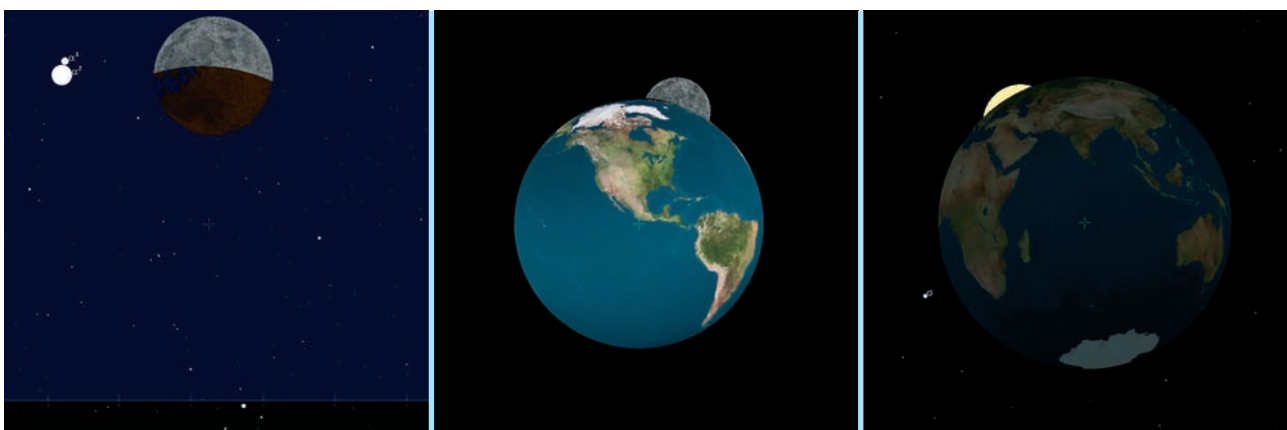


Abb. 7. Am 4. Mai 1985 ging der partiell verfinsterte Mond gegen 20 Uhr MEZ auf (links). Von der Sonne aus gesehen verdeckte die Erde zu diesem Zeitpunkt einen Teil des Mondes (Mitte), vom Mond aus gesehen einen Teil der Sonne (rechts). Die Bilder wurden mit GUIDE 9 erzeugt.

Kasten 2. Die Mondfinsternis am 4. Mai 1985

	Eintritt in den Kernschatten	Beginn der Totalität	Ende der Totalität	Austritt aus dem Kernschatten
27. Juli 2018	20:23 MESZ	21:29 MESZ	23:15 MESZ	0:20 MESZ
21. Januar 2019	4:33 MEZ	5:40 MEZ	6:45 MEZ	7:52 MEZ
16. Mai 2022	4:27 MESZ	5:28 MESZ	6:55 MESZ	7:56 MESZ

Tab. 1. Beginn und Ende der bevorstehenden totalen Mondfinsternisse

BACKHAUS, U. (angenommen). Wie weit ist der Mond entfernt? Die Mondentfernung, in 25 Stunden mit drei verschiedenen Verfahren selbst bestimmt. *Sterne und Weltraum*. <http://www.astronomie-und-internet.de/lunarparallax/Mondparallaxe.pdf> [25.9.2017].

FEITZINGER, J. V. (1996). Die Mondillusion und der gestauchte Himmel. *Sterne und Weltraum*, 35(11), 835.

GUIDE9 (o. J.). Planetariums- und Astrometrieprogramm, zu beziehen z. B. unter <http://www.astroshop.de/software/software-guide-9-0-dvd-rom-mit-deutschsprachigem-handbuch/p,24903> [25.9.2017].

ROSS, H. & PLUG, C. (2002). *The Mystery of the Moon Illusion*. Oxford: University Press.

WAGENSCHNEIDER, M. (1988). Die Erfahrung des Erdballs. In: M. WAGENSCHNEIDER: *Naturphänomene sehen und verstehen – Genetische Lehrgänge*. Stuttgart: Klett. Im Internet unter <http://martinwagenschein.de/2/W-010.pdf> [25.9.2017].

WOLF, R. (1973). *Handbuch der Astronomie, ihrer Geschichte und Literatur*. Hildesheim: Olms.

Prof. Dr. UDO BACKHAUS lehrte bis zu seiner Pensionierung Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Die Didaktik der Astronomie war und ist eins seiner Hauptarbeitsgebiete. Homepage: <http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/>; Email: udo.backhaus@uni-due.de. ■