

BEITRAG AUS DER REIHE:

Karl-Heinz Lotze, Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik Band 5 Naturphänomene und Astronomie

ISBN 3 - 7896 - 0666 - 9

Verlag Palm & Enke, Erlangen und Jena 2002

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Karl Luchner†

Zur Periode der Mondfinsternisse - Saros-Zyklus, Beobachtungen und Abschätzungen

1 Einleitung

Die Erklärung einer totalen oder partiellen Mondfinsternis („der Vollmond taucht ganz oder teilweise in den Erdschatten ein“) führt zu weiteren Fragen und Feststellungen:

- Warum ist nicht jedes Mal bei Vollmond auch Mondfinsternis?

Die Mondbahnebene ist gegenüber der Erdbahnebene geneigt (5,13 Grad); es ergibt sich damit die Möglichkeit, dass der Mond (als nahezu „Vollmond“) außerhalb der Erdbahnebene am Schattenkegel vorbeiläuft.

- Manchmal folgen einige Mondfinsternisse aufeinander im Abstand von etwa einem halben Jahr, manchmal aber findet innerhalb einiger Halbjahre überhaupt keine Finsternis statt. Gibt es einen Zyklus, in dem sich die Aufeinanderfolge der Finsternisse typisch wiederholt, sodass man einfache Vorhersagen machen kann? Man findet empirisch einen solchen Zyklus der Periode 18,03 Jahre („Saros-Zyklus“).

- Der Saros-Zyklus entsteht durch die Präzession des Drehimpulsvektors, der die Bewegung des Mondes um die Erde beschreibt; ein Umlauf dauert 18,6 Jahre.

2 Die Neigung der Mondbahnebene gegen die Erdbahnebene

Die Orientierung der Mondbahnebene ist der entscheidende Aspekt für alle folgenden Ausführungen: Würde die Mondbahnebene genau mit der Erdbahnebene zusammenfallen, dann wäre jedes Mal bei Vollmond auch totale Mondfinsternis, und jedes Mal bei Neumond Sonnenfinsternis (in einem begrenzten Bereich der Erdoberfläche). Abb. 1 zeigt in perspektivischer Ansicht die Ebene der Erdbahn (auch Ekliptik genannt) und die Ebene der Mondbahn. Der Winkel α beschreibt die Neigung der Mondbahnebene gegen die Erdbahnebene (die Flächennormale der Erdbahnebene und die Flächennormale der Mondbahnebene bilden den Winkel α); in Abb. 1 ist α der Deutlichkeit halber viel zu groß gezeichnet: Richtig ist $\alpha \approx 5,13^\circ$ ¹⁾. Zunächst sei vereinfachend angenommen, dass die

¹⁾ Streng genommen kann der Mond auf seiner Bahn die Opposition zur Sonne also nicht genau erreichen, wenn die Erde auf ihrer Jahresbahn sich in Position B oder D befindet. Von der Erde aus blickt man dann auf die beleuchtete Halbkugel nicht genau in der Einfallrichtung der Sonnenbestrahlung, sondern um maximal $5,1^\circ$ dagegen versetzt. Dem freien Auge erscheint dabei der Mond immer noch als Kreisscheibe (dabei wirkt sich aus, dass die Sonne aufgrund ihrer Winkelgröße etwas mehr als eine Halbkugel beleuchtet). Einen Tag vor oder nach Vollmond beträgt der Blickwinkel aber bereits etwa 13° gegenüber der Einfallrichtung der Sonnenbestrahlung, und damit ist die Abweichung von der ganz ausgeleuchteten Kreisscheibe bereits leicht erkennbar.

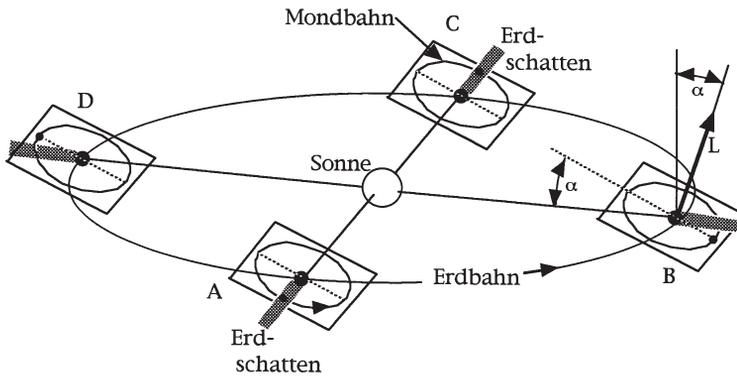


Abb. 1: Das System Sonne-Erde-Mond, wobei die Erde in vier Positionen A, B, C und D, die jeweils ein Vierteljahr auseinanderliegen, eingezeichnet ist. Man blickt hier schräg auf die Erdbahnebene. Der Winkel α ist übertrieben groß gezeichnet und die Distanzen sind nicht maßstabsgetreu dargestellt. Auch die jeweils eingezeichnete Stellung des Mondes ("Vollmond") entspricht nicht der Vierteljahreszeitspanne; hiermit soll nur gezeigt sein, dass der Vollmond manchmal genau durch den Erdschatten laufen kann (Position A, C), dass er den Erdschatten aufgrund der Neigung der Mondbahnebene aber manchmal auch nicht trifft (Position B, D).

Orientierung der Mondbahnebene während des ganzen Jahresumlaufs der Erde unverändert bleibt, wie in Abb. 1 gezeichnet (d.h. der den Umlauf des Mondes um die Erde beschreibende Drehimpulsvektor L soll zunächst dauernd in die gleiche Richtung zeigen).

Man sieht, dass der Vollmond überhaupt nur dann in den Erdschatten eintauchen kann, wenn die Erde auf ihrer Jahresbahn sich in einer Position befindet, bei der die Mondbahn und die Verbindungslinie Sonne-Erde sich (praktisch) genau kreuzen, was für Position A oder Position C (Abb. 1 und 2) zutrifft. Die beiden Kreuzungspunkte zwischen Mondbahn und Ekliptik heißen „Knoten“ (K in Abb. 2); sie kommen im Jahreslauf der Erde zweimal genau auf der Verbindungslinie Sonne-Erde zu liegen, sie können aber auch weitab davon liegen (z.B. in Position B oder D oder deren Umgebung). Eine Mondfinsternis tritt dann ein, wenn die Erde Position A oder C (oder zumindest deren nähere Umgebung) dann erreicht, wenn gerade Vollmond ist, also der Mond den äußeren Knoten durchläuft (Anblick von der Erde aus siehe Abb. 3). Würde der Mond auf seiner Bahn um die Erde in einem halben Jahr z.B. genau 180° durchlaufen, dann würden Mondfinsternisse im Halbjahresrhythmus aufeinander folgen, wenn nur ein erstes Mal Mondfinsternis bei Position A oder C „eingestellt“ werden würde.

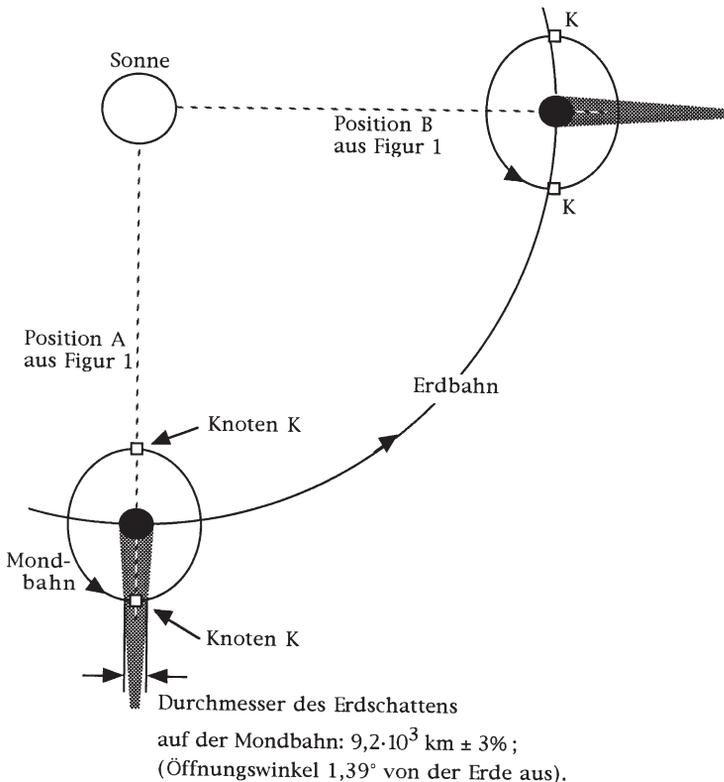


Abb. 2: Draufsicht senkrecht auf die Erdbahnebene. Die vereinfachend als Kreis angenommene Mondbahn erscheint wegen der Neigung der Bahnebene als Ellipse (nicht maßstabsgetreu).

Die idealisierenden Aussagen („Knoten muss genau im Erdschatten liegen“; „Orientierung der Mondbahnebene bleibt erhalten“) liegen in der Realität nur näherungsweise vor: Der Erdschatten hat eine Ausdehnung, d.h. der Knoten braucht nicht ganz genau auf der Verbindungslinie Sonne-Erde zu liegen, und dennoch kann der Mond den Erdschatten erreichen; Abb. 4 zeigt einen solchen Fall. Ferner bleibt die Orientierung der Mondbahn nicht unverändert (wie in Abb. 1 vereinfachend dargestellt), sondern sie verändert sich langsam; der Drehimpulsvektor vollführt eine Präzession. Diese beiden Aspekte werden im Folgenden näher diskutiert; immer noch vereinfachend wird dabei die Exzentrizität der Erdbahn und der Mondbahn ignoriert.

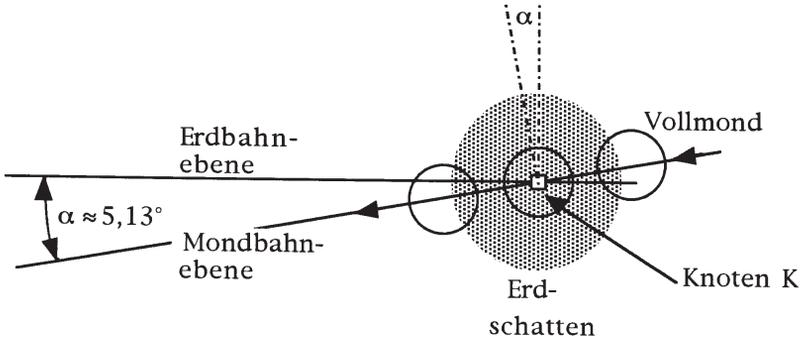


Abb. 3: Ansicht von der Erde aus, wenn die Erde auf ihrer Umlaufbahn in Position A ist (siehe Abb. 1 und 2), und zugleich der Mond den Erdschatten durchläuft (maßstabsgetreu; der Erdschatten ist natürlich nicht direkt sichtbar).

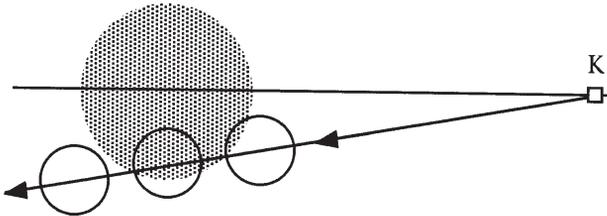


Abb. 4: Ansicht von der Erde aus, wenn sie auf ihrer Bahn von A aus weitergelaufen ist, beim auf A folgenden Vollmond (nicht maßstabsgetreu).

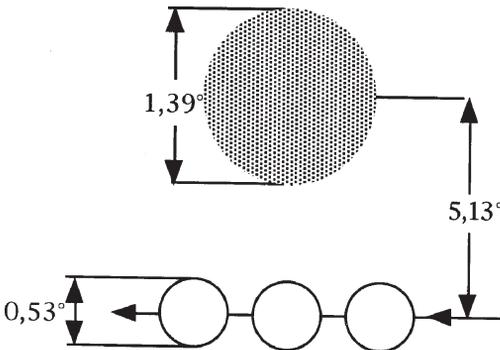


Abb. 5: Ansicht von der Erde aus, wenn in Position B Vollmond vorliegt (nicht maßstabsgetreu).

3 Die Präzession der Mondbahnebene

Aus astronomischen Beobachtungen zum Monatslauf des Mondes (siehe Abb. 6a, 6b, 6c) lässt sich fast unmittelbar ablesen, dass die Mondbahnebene eine Präzession vollführt: Die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durch-

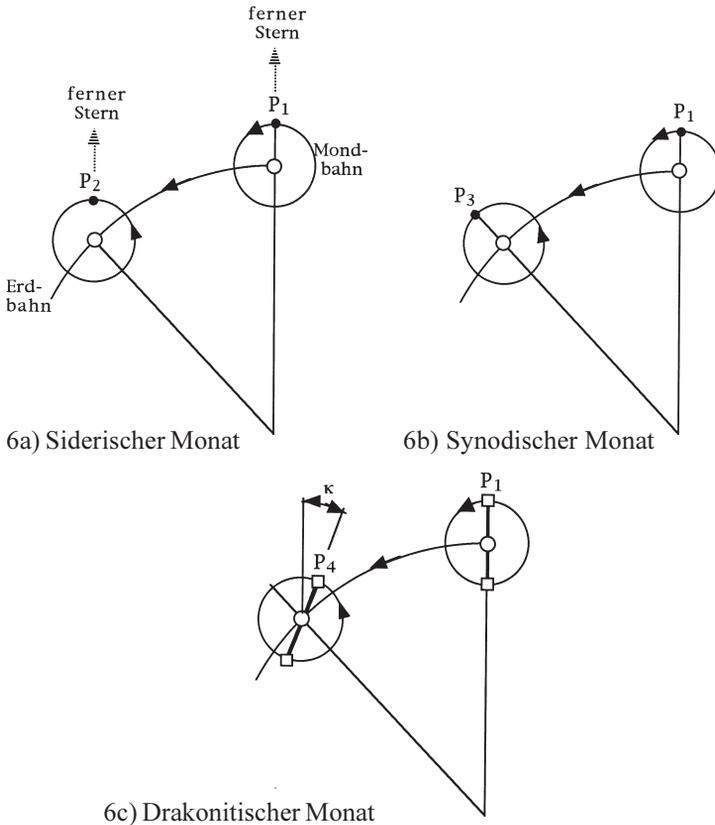


Abb. 6: Gegenüberstellung verschiedener Zeitspannen zum Mondlauf.

a) Zeitspanne zur Bewegung von P_1 nach P_2 (360° -Umlauf):

siderischer Monat: $T_{\text{sid}} = 27,3217$ Tage.

b) Zeitspanne zur Bewegung von P_1 nach P_3 (Vollmond-Vollmond):

synodischer Monat $T_{\text{syn}} = 29,5306$ Tage.

c) Zeitspanne zur Bewegung von P_1 nach P_4 (Durchgang durch den gleichen Knoten):

drakonitischer Monat: $T_{\text{drak}} = 27,2122$ Tage

(Die Rechtecke in Abb. 6c bezeichnen jeweils einen Knoten)

gängen durch den gleichen Knoten („drakonitischer Monat“, $T_{\text{drak}} = 27,2122$ Tage) ist ein wenig kürzer als die Zeitspanne, die für einen 360° -Mondumlauf benötigt wird („siderischer Monat“, $T_{\text{sid}} = 27,3217$ Tage). Anders ausgedrückt: Die Schnittlinie zwischen Ekliptik und Mondbahnebene („Knotenlinie“, in Abb. 6c die dick gezeichnete Verbindungslinie zwischen den beiden Knoten) dreht sich entgegen dem Richtungssinn des Mondumlaufs und des Erdumlaufs (ist „rückläufig“). Folgendermaßen errechnet sich die Umlaufdauer für einen 360° -Präzessionsumlauf zu $T_{\text{präz}} = 18,66$ Jahre:

Die Winkelgeschwindigkeit des Mondes auf seiner Bahn ist $\omega_M = 360^\circ / T_{\text{sid}}$; startet er in einem Knoten, so hat er nach einem drakonitischen Monat (also zu dem Zeitpunkt, wo er wieder am gleichen Knoten ankommt) den Winkel $\omega_M \cdot T_{\text{drak}} = 358,5572^\circ$ durchlaufen, d.h. während eines siderischen Monats dreht sich die Knotenlinie um $\kappa = 360^\circ - 358,5572^\circ = 1,4428^\circ$ rückläufig. Diese Winkeldrehung erscheint zwar zunächst unerheblich zu sein, aber sie tritt bei jedem Umlauf auf, summiert sich also: Die Winkelgeschwindigkeit der Knotenlinie ist $\omega_K = \kappa / T_{\text{sid}}$, und damit ergibt sich die Zeitspanne für einen ganzen 360° -Umlauf zu $T_{\text{präz}} = 360^\circ / \omega_K = 18,66$ Jahre ²⁾.

4 Der Saros-Zyklus

Um eine genauere Vorstellung von der Abfolge der Mondfinsternisse zu gewinnen, sei deren zeitliche Abfolge übersichtlich dargestellt (Datenquelle hierzu [1]): In Abb. 7 ist der Zeitpunkt jeder totalen und partiellen Mondfinsternis zwischen 1950 und 2000 eingetragen (total: ein Punkt, der weit über der Zeitachse liegt; partiell: ein Punkt, der nur wenig über der Zeitachse liegt). Der passende Zeitmaßstab für diese Darstellung ist die Zeitspanne, die zwischen zwei aufeinanderfolgenden Vollmonden liegt, die sogenannte „Lunation“: Eine Lunation dauert 29,531 Tage (synodischer Monat, siehe Abb. 6b). Die senkrechten Striche in Abb. 7 teilen die Zeitachse in Abschnitte zu je 6 Lunationen; die Lunationen sind fortlaufend nummeriert (Zahlen an der Abszisse).

Zunächst fällt auf, dass oft mehrere totale Mondfinsternisse im Abstand von 6 Lunationen aufeinanderfolgen; dies lässt sich sehr einfach erklären: Wenn die Knoten auf der Verbindungslinie Sonne-Erde liegen, dann ist dies nach einem halben Jahr (ungefähr 6 Lunationen) näherungsweise wieder der Fall, wenn sich die Orientierung der Mondbahnebene während dieser Zeitspanne nicht wesentlich geändert hat. Diese Aufeinanderfolge der Totalen hält aber nicht lange vor; es schieben sich längere Abschnitte ganz ohne Finsternisse, bestenfalls unter-

²⁾Zunächst möchte man vielleicht meinen, dass nach diesen 18,66 Jahren die Abfolge der Finsternisse sich wiederholt, aber in diesem Zeitraum vollführt der Mond eine nicht ganze Anzahl von synodischen Umläufen ($18,66 \times 365,2564 / 29,5306 = 230,80$), d.h. nach 18,66 Jahren steht zwar die Mondbahnebene wieder genauso wie zuvor, aber der Mond, der auf seiner Umlaufbahn zuvor z.B. in einem Knoten stand, erreicht diese Stelle nicht gleichzeitig damit.

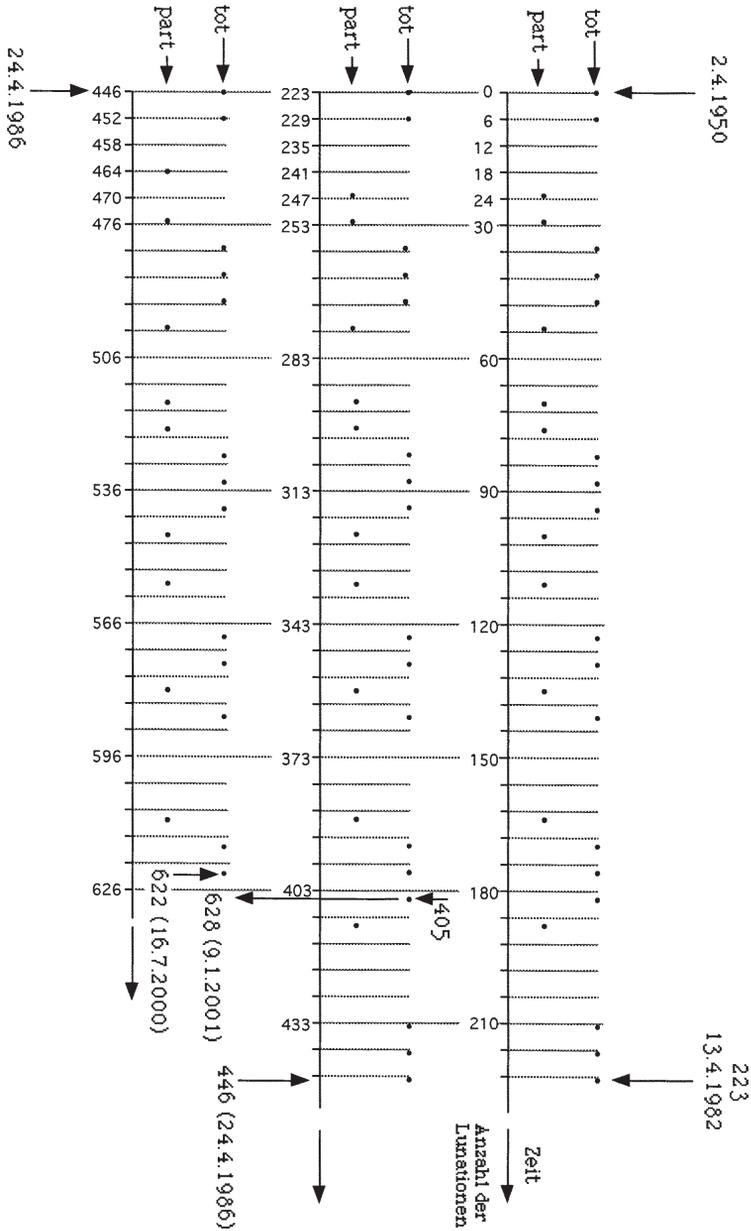


Abb. 7: Wiederholung der Sequenz von Mondfinsternissen nach 223 Lunationen.

brochen durch Partielle, dazwischen. Die Ursachen dafür sind, dass 6 Lunationen nicht genau einem halben Jahr entsprechen, und dass die Mondbahnebene eine langsame Präzession vollführt, wie oben schon erläutert.

Besonders deutlich sieht man in Abb. 7 die langfristige Periodizität in der Aufeinanderfolge der Finsternisse: Nach 223 Lunationen wiederholt sich das Muster; dies ist ein „Saros-Zyklus“. Die drei untereinanderliegenden Zeilen sind so angeordnet, dass sie sich in ihrer Nummerierung um 223 unterscheiden; die Periodendauer des Saros-Zyklus (auch der Sonnenfinsternisse) beträgt also 223 Lunationen, dies sind $223 \times 29,5306$ Tage = 18,03 Jahre. Der Saros-Zyklus und seine Periode war schon den Babyloniern bekannt und diente z.B. im klassischen Altertum zur Vorhersage von Finsternissen (z.B. *Thales* von Milet).

Man kann in Abb. 7 auch selbst die Zeitachse fortsetzen und aufgrund der Periodendauer von 223 Lunationen darauf schließen, wie die Abfolge der Finsternisse in nächster Zukunft sein wird: Die Lunationsnummer der letzten eingetragenen Finsternis ist 622 (16. 7. 2000); die entsprechende Lunation eine Saros-Periode vorher trägt die Nummer 399. Die auf 399 folgende nächste Totale war 405, also wird auch bei $405 + 223 = 628$ wieder eine Totale stattfinden; Lunation 628 ist die sechste nach 622 (16. 7. 2000), und sie tritt ein am 9. 1. 2001, wie in jedem Kalender (der die Mondphasen angibt) leicht abzulesen ist.

Die Länge der Saros-Periode bestätigt sich aus folgender Überlegung: Die für 223 Umläufe erforderliche Zeitspanne entspricht auch (fast genau) dem Zeitraum, der für eine ganze Anzahl von Knotenumläufen (drakonitischen Monaten) erforderlich ist: $223 \cdot 29,5306 / 27,2122 = 241,99895$ (d.h. die Knotenlinie hat dann fast genau die gleiche Orientierung wie vorher, und ein neuer Saros-Zyklus kann beginnen). Die Abweichung 0,00105 von der ganzen Zahl bedeutet eine Zeitabweichung von nur $0,00105 \times 27,2122 = 0,02857$ Tage = 41 Minuten. Aus dieser Abweichung läßt sich auch abschätzen, dass der Saros-Zyklus über etwa 30 bis 40 Perioden praktisch unverändert erhalten bleibt, wobei manche typischen Einzelheiten aber noch länger bestehen. Neben dem Saros-Zyklus gibt es auch andere, aber weniger spektakuläre Zyklen (siehe z.B. [2]).

5 Rekonstruktion der Struktur des Saros-Zyklus

Im Rahmen der obengenannten Vereinfachungen lässt sich die Abfolge der Finsternisse in einem Saros-Zyklus rechnerisch reproduzieren; das Ergebnis stimmt weitgehend, aber natürlich nicht in allen Einzelheiten, mit der Beobachtung überein. Es geht nun darum, den jeweiligen Winkelabstand des Vollmondes vom Knoten festzustellen; aus diesem ersieht man dann, ob eine totale, eine partielle, oder keine Finsternis auftritt.

Zur rechnerischen Erfassung der Winkelstellung des Mondes betrachte man Abb. 8. Als Anfangspunkt sei die im Teilbild ganz oben gezeichnete Situation gewählt; der Vollmond steht dort genau im Knoten. Nach Ablauf des ersten synodischen Monats (die Erde hat den Bahnwinkel β zurückgelegt) steht der Vollmond bereits

$$\varphi_n = n \cdot \varphi_1 = n \cdot (\beta + \mu) = n \cdot 30,664^\circ \quad (1)$$

(n: alle ganzen Zahlen).

In den in Abb. 6 wiedergegebenen Realbeobachtungen findet sich eine totale Mondfinsternis (Lunation Nr. 399), welche die maximal mögliche Dauer fast erreicht (ca. 100 Minuten), d.h. der Knoten liegt bei dieser praktisch genau im Zentrum des Erdschattens, eine Konstellation, die fast genau der in Abb. 8 oben dargestellten entspricht (eine kleine Winkelkorrektur φ_0 hierzu wird nachträglich angebracht). Lunation Nr. 399 wird deshalb als Anfang eines Saros-Zyklus gewählt. Deshalb wird (1) umgeschrieben zu

$$\varphi_n = \varphi_0 + (n - 399) \cdot (\beta + \mu) = \varphi_0 + (n - 399) \cdot 30,664^\circ \quad (1')$$

Die Winkelstellung jedes Vollmondes eines ganzen Saros-Zyklus ist nun dargestellt durch eine der ganzen Zahlen im Bereich $399 \leq n \leq 622$; ($\varphi_0 = 0,2^\circ$).

Zur rechnerischen Auswertung der Abfolge der Finsternisse kann man nun folgendermaßen vorgehen: Zunächst berechnet man aus (1') alle Werte von φ_n eines Zyklus; sodann wählt man hieraus diejenigen Werte von φ_n aus, die nahe an 180° , oder an 360° , oder an 540° , oder an 720° usw. herankommen (dies ist z.B. in Abb. 8 bei φ_6 der Fall: Der Vollmond liegt sehr nahe an einem Knoten), und trägt die Winkeldifferenz zwischen Vollmond und Knoten, $\Delta\varphi$ (die Differenz zu 180° , oder zu 360° , oder zu 540° , oder zu 720° usw.) als Funktion von n in ein Diagramm (Abb. 9a) ein. Dort ist z.B. für $n = 399$ die Winkelabweichung $\Delta\varphi = 0,2^\circ$ (gewählter Anfangspunkt also $\varphi_0 = 0,2^\circ$) zu ersehen, ferner $\Delta\varphi = 4,2^\circ$ für $n = 405$, $\Delta\varphi = 8,1^\circ$ für $n = 411$, usw. Um aus der Menge der so eingetragenen Punkte ablesen zu können, welcher davon eine totale, welcher eine partielle Mondfinsternis bedeutet, muß man die entsprechenden Grenzen für $\Delta\varphi$ kennen; eine gesonderte Abschätzung³⁾ ergibt:

$$\text{Totale Monfinsternis für: } -4,9^\circ \leq \Delta\varphi \leq +4,9^\circ \quad (2)$$

sowie außerhalb (2):

$$\text{Partielle Mondfinsternis für: } -10,8^\circ \leq \Delta\varphi \leq +10,8^\circ \quad (3)$$

³⁾ Hierzu betrachte man Figur 10a: Der für eine Totale maximal mögliche Winkel (Blickwinkel zwischen Schattenmitte und Mondmitte von der Erde aus gesehen) ist $0,43^\circ$, was aus den Zahlenwerten von Abb.5 hervorgeht. Mit $\alpha = 5,13^\circ$, $\tan\alpha = 0,089$ folgt hieraus $\Delta\varphi = 4,9^\circ$. Ebenso erhält man nach Abb.10b: $\Delta\varphi_{\text{part}} = 10,8^\circ$. Bei genauerer Rechnung ist zu berücksichtigen, dass z.B. die in Abb. 10b erscheinende Strecke zwischen Schattenmitte und Knoten in der Ekliptik (die hier als Strich erscheint) eigentlich auf einem Kreis (Erdbahn) abgetragen werden muss, wodurch der Winkel α in Abb. 10b etwas vergrößert (α^*) erscheint. Der Schwankungsbereich 3% ergibt sich aus zwei Besonderheiten: Die Schwankung des Erdbahnradius, wodurch der Schattenkegel ein wenig verändert wird, und die Schwankung des Mondbahnradius.

(aufgrund von Schwankungen im Erdbahnradius und im Mondbahnradius können diese Bereichsgrenzen um etwa 3% größer oder kleiner sein). Bereich (2) ist in Abb. 9a als dunkel schattierte Fläche markiert, Bereich (3) durch eine weniger dunkel schattierte Fläche; die Schwankungsbreite der Grenzen ($\pm 3\%$) ist an den jeweiligen Flächengrenzen durch einen horizontalen dicken Balken angezeigt. Jeder in den schattierten Flächen liegende Punkt bedeutet also eine Finsternis, (siehe z.B. die ersten sechs in den schattierten Zonen liegenden Punkte). Für $n = 399$ ist die Mondfinsternis total; für $n = 405$ ebenfalls total; für $n = 411$ partiell; für $n = 434$ partiell; für $n = 440$ total; für $n = 446$ total, usw.). Zum leichteren direkten Vergleich mit dem realen Geschehen (Abb. 7) wird aus Abb. 9a ein Diagramm, das der Darstellung von Abb. 7 entspricht, abgeleitet: Abb. 9b.

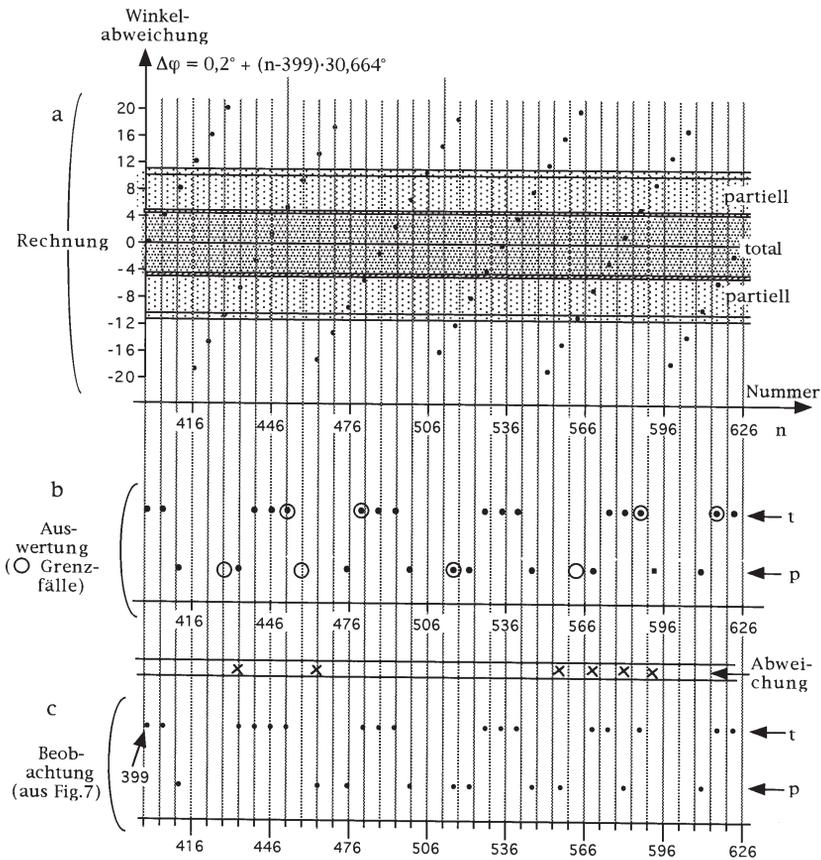


Abb. 9: Oben a): Rechenergebnis; Mitte b): Auswertung der Rechnung; Unten c): Vergleich mit der Beobachtung.

Einige der Punkte in Abb. 9a liegen auf oder sehr nahe am Schwankungsbalken (z.B. für $n = 428$, $n = 458$, u.a.), so dass nicht sicher entschieden werden konnte, ob diese als „total“ oder „partiell“ in Abb. 9b einzutragen sind; die Entscheidung zwischen diesen beiden Möglichkeiten wurde in Übereinstimmung mit den entsprechenden Punkten in Abb. 7 getroffen (diese Punkte sind gekennzeichnet durch einen kleinen Kreis).

Der unmittelbare Vergleich dieser Rechnung mit der beobachteten Realität kann nun anhand Abb. 9b und Abb. 9c (Auszug aus Abb. 7) vorgenommen werden: Man sieht völlige Übereinstimmung in der Zeitskala (die Punkte in 9b und 9c z.B. am Anfang und am Ende des Saros-Zyklus liegen genau übereinander, was jedoch nur bei erheblich erhöhtem Auflösungsvermögen der grafischen Darstellung überzeugend ersichtlich wäre); auch hinsichtlich des Typs der Finsternis (total oder partiell) stimmt der Inhalt von 9b und 9c weitgehend überein bis auf wenige Fälle, insbesondere im Bereich $n = 550$ bis $n = 590$ (gekennzeichnet durch Kreuze in der Zeile „Abweichung“). Eine bessere Übereinstimmung kann erwartet werden, wenn man weitere Korrekturen, die aus der nichtkreisförmigen Mondbahn (Drehung der Apsidenlinie) folgen, anwendet, was aber hier nicht ausgeführt wird.

5 Ausblick

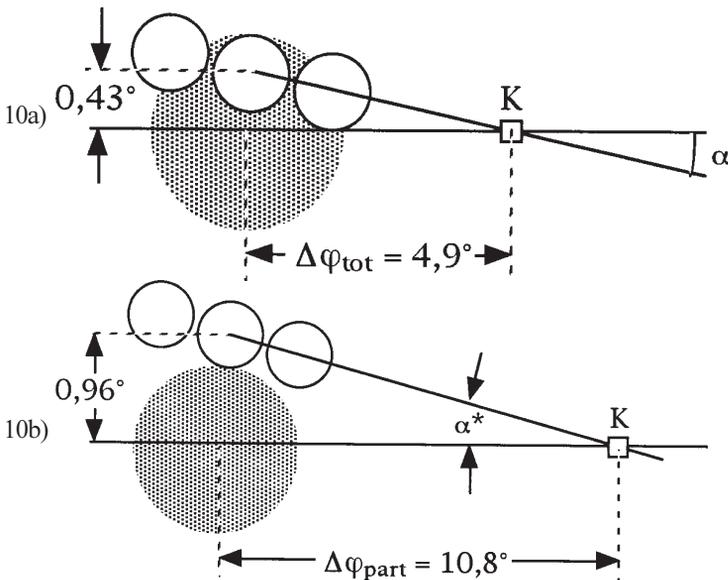


Abb. 10: Zur Bestimmung der Grenzwinkel für totale (Abb.10a) und für partielle (Abb. 10b) Mondfinsternis (nicht maßstabsgetreu).

Einer der Gründe für die Präzession der Mondbahnebene ist das Drehmoment, welches von der Sonne auf die Mondbahn z.B. in Position B oder D ausgeübt wird (in gleicher Weise erfährt die Erde, als z.B. abgeplattetes Rotationsellipsoid, aufgrund ihrer schräg zur Ekliptik stehenden Rotationsachse ein Drehmoment, das bekanntlich zur Präzessionsbewegung der Erdachse mit der Periode von etwa 26.000 Jahren führt). Man sieht aber sofort, dass dieses Drehmoment nicht der einzige Grund für die Präzession der Mondbahnebene sein kann: Es ändert sich längs der Jahresbahn (es ist maximal in Position B und D, verschwindet aber in Position A und C), und demnach müsste die Präzession in der Umgebung von B und D viel deutlicher ausfallen als in der Umgebung von A und C; dies ist aber nicht der Fall, denn dann wäre der drakonitische Monat nicht eine feste Größe. Eine verbesserte Behandlung würde erfordern, mehrere Abweichungen vom gezeichneten Idealbild in die Betrachtung einzubeziehen und damit eine erhebliche Verkomplizierung in Kauf zu nehmen; hierzu gehört insbesondere die Drehung der Apsidenlinie des Mondes (anomalistischer Monat, 27,5546 Tage), die hier ignoriert wurde, aber eine merkliche Rolle spielt. Eine geschlossene analytische Behandlung im Rahmen des Dreikörperproblems Sonne, Erde, Mond ist anspruchsvoll (siehe z. B. [3]) und würde hier zu weit führen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Tabellen zu Zeitpunkt und Typ der Mondfinsternisse in Meyers Handbuch Weltall, 4. und 6. Auflage, Bibl. Inst. Mannheim, 1967 bzw. 1984.
- [2] R. KIPPENHAHN, W. KNAPP: „Schwarze Sonne, roter Mond“, DVA 1999
- [3] M. SCHNEIDER: „Himmelsmechanik“, Bd. II, Bibl. Inst. Mannheim, 1993