**Ergänzung / Fortsetzung des Artikels *„Die Lichtgeschwindigkeit nach Ole Rømer“* in der Zeitschrift** **ASTRONOMIE + RAUMFAHRT** **49 (2012) 1**

von Albrecht Schultz

Im genannten Artikel wurden Werte für die Lichtgeschwindigkeit vorgestellt, die man aus den Verfinsterungen des galileischen Mondes Io nach der Jupiteropposition am 29.2.1992 gewinnen konnte. In Diagramm 4b ist nochmals veranschaulicht, wie die errechnete Lichtgeschwindigkeit von der Anzahl der gezählten Io-Umläufe abhängt. Hier sind auch Ergebnisse für die Zeit vor der Opposition einbezogen. Dazu wurde auf Tabelle 2b mit Verfinsterungs-Anfängen (VA‘s) zurückgegriffen; *k* ist dort negativ, die Zählung erfolgt rückwärts vom VA des Oppositionstages (*k* = 0) bis zum VA des 19. September 1991 (*k* = -92). Wieder gibt es einen Trend in der Entwicklung der *c*-Werte, sie werden umso kleiner, je weiter man sich vom Oppositionstermin rückwärts entfernt; für *k* = -35 sind sie schon zu klein.

Nur von *k* = -35 bis *k* +60 liefert das Rømer-Verfahren unter Berücksichtigung der Fehlergrenzen richtige Werte. Die besten Resultate mit *c* = (3,0 0,3)·108 m/s ergeben sich, wenn man die Zählung der Verfinsterungen nach 35, 44 oder 48 Io-Umläufen ab der Jupiter-Opposition anhält.

**Verfälschende Einflüsse**

Die Ergebnisse werfen die Frage auf, ob stillschweigend angenommene Voraussetzungen für die Anwendbarkeit der grundlegenden Formel (1) ständig erfüllt sind. Es gibt Umstände, die den Gebrauch der Formel einschränken, dabei sind *PIo* und die kritischen Größen. Um den Kurvenverlauf in Diagramm 4b zu erklären, gibt es zwei Möglichkeiten, die sich nicht gegenseitig ausschließen:

1. Die für den Oppositionstermin ermittelte Umlaufdauer von 2548,59 min stimmt streng genommen nur in diesem Zeitpunkt. Die zunächst noch geringe Änderungsgeschwindigkeit lässt es aber zu, *PIo* in einem bestimmten Zeitbereich um die Jupiter-Opposition als konstant anzusehen; davor und danach müsste mit anderen Werten gerechnet werden. Mit unserem Verfahren lässt sich *PIo* nur um die Oppositionszeit einigermaßen zuverlässig bestimmen, und wegen der Nicht-Konstanz besteht nur in einem entsprechend engen Zeitfenster um den Oppositionszeitpunkt herum die Chance, den richtigen Wert für *c* zu erhalten. Man steckt dabei in einem Dilemma: Je näher der letzte gezählte Umlauf am Oppositionszeitpunkt liegt, desto besser stellt das ermittelte *PIo* die mittlere synodische Periode im Zeitintervall dar, desto größer ist aber auch – wie an den Fehlerintervallen in Diagramm 4b abzulesen ist – die statistische Unschärfe.
2. Die dem Jahrbuch entnommenen Zeitmarken sind für größere Beträge von *k* unsicher, mit ihrem Gebrauch schleichen sich systematische Fehler ein, auf die weiter unten eingegangen wird.

Näheres zu (I):

Als erste Ursache für die Nicht-Konstanz von Io‘s synodischer Umlaufdauer ist die Exzentrizität der Jupiterbahn zu nennen. Während Jupiter z.B. auf dem Weg vom Perihel zum Aphel immer langsamer wird, verkleinert sich *PIo*. (Das Stück, das Jupiter von einem VE bis zum nächsten auf seiner Umlaufbahn zurücklegt, wird kürzer; dann verkleinert sich in **Bild 1** auch der Winkel , d.h. auch Io muss auf seiner Bahn weniger Weg zurücklegen.) Die Zeitpunkte maximaler und minimaler Planetengeschwindigkeit liegen ca. 6 Jahre auseinander (die Hälfte der siderischen Jupiterperiode). Ein Blick in die Jahrbücher belehrt uns, dass Jupiter im Juni 1993 das Aphel erreichte, d.h. über das Jahr 1992 befanden wir uns fast im Endstadium der besagten Phase. Oben wurde erwähnt, dass für die Io-Perioden während der Jupiter-Oppositionen 1991, 1992, 1993 Werte von 2548,65 bis 2548,54 min ermittelt wurden. Eine Abnahme in dieser Größenordnung hält auch einer rechnerischen Überprüfung stand. Im Jahr 1992 verringert sich *PIo* innerhalb von 4 Monaten (70 Umläufen) infolge der Abnahme der Jupitergeschwindigkeit um ca. 0,02 min. Deshalb müsste in Formel (1) das Produkt durch das Integral ersetzt werden; dieses ließe durch eine Trapezfläche annähern. Wenn man das in den Auswertungen für die Lichtgeschwindigkeit durchführt, ergeben sich für große Beträge von *k* nach der Jupiteropposition bessere *c*-Werte, vor der Opposition aber schlechtere. Es müssen also auch Änderungen mit kürzerer Periode stattfinden, die in ihrer Summe stärker sind. Solche ergeben sich z. B. aus der (leichten) Exzentrizität der Io-Bahn: Die VA’s / VE’s finden von Umlauf zu Umlauf an verschiedenen Stellen der Bahnellipse statt – Io ist also in den kurzen Bahnabschnitten, die jeweils von VA zu VA (von VE zu VE) über die 360°-Drehung hinaus durchlaufen werden, unterschiedlich schnell – , und das ändert ebenfalls die synodische Umlaufzeit. Zusätzlich lassen Abweichungen vom strengen -Kraftgesetz, bedingt durch die Abplattung Jupiters und Bahnstörungen durch die anderen Jupitermonde die Lage der Apsidenachse im Raum nicht konstant.

Erläuterungen zu (II):

Die galileischen Monde rotieren annähernd in der Äquatorebene Jupiters, diese ist laut Jahrbuch um 3,12° gegen die Bahnebene geneigt. Wenn wir davon ausgehen, dass die Schattenachse des Planeten in der Ekliptik liegt – das stimmt *nicht ganz*, denn die Jupiterbahn ist um 1,3° gegen die Ekliptik geneigt – , sehen wir während einer siderischen Jupiterperiode das Satellitensystem zweimal in Kantenstellung, zweimal maximal gegen uns geöffnet **(Bild 2)**; Io wandert deshalb von Umlauf zu Umlauf durch unterschiedliche Zonen des Jupiterschattens. Nur wenn wir die Io-Bahn in Kantenstellung sehen, finden die Durchgänge nahe der Achse des Schattenkegels statt; wenn wir die Io-Bahn geöffnet sehen, zieht Io auch nördlich bzw. südlich der Achse durch den Schatten, die Verfinsterung setzt im Vergleich zum Zeitraum der Kantenstellung später ein und endet früher **(Bild 3)**. Die Zeitpunkte maximaler Öffnung und Kantenstellung liegen ca. 3 Jahre auseinander (1/4 der siderischen Jupiterperiode), und während der maximalen Öffnung erscheint uns die Io-Bahn um ein Drittel des Jupiterradius nach oben oder unten verschoben (das ergibt sich aus der Neigung der Bahnebene und dem Bahnradius des Mondes). In den Ahnert-Jahrbüchern erhält man Auskunft darüber, wie sich die Io-Bahn dem Beobachter im Innern des Sonnensystems präsentiert: Die Jupiter-Ephemeriden enthalten Tabellen der „jovizentrischen Breite“ *BS* der Sonne – das ist die Breite desjenigen Punktes der Jupiteroberfläche, der auf der Verbindungslinie von Sonnen- und Planetenmittelpunkt liegt (m.a.W. die Deklination der Sonne bezogen auf den Mittelpunkt und den Äquator Jupiters), siehe **Bild 4**. Weil Io fast in der Äquatorebene Jupiters rotiert, beobachten wir bei *BS* = 0° seine Bahn in Kantenstellung, bei ≈ 3° in maximaler Öffnung. Zur Jahresmitte 1994 ist die jovizentrische Breite der Sonne mit *BS* = -3,14° extrem, d.h. im Zeitraum Mitte 1991 bis Mitte 1994 vollzieht sich der Übergang von Kantenstellung auf maximale Öffnung. Man kann abschätzen, dass in den Halbjahren vor und nach der Opposition 1992 jeweils Verlagerungen der Ein- bzw. Austrittsstellen in der Größenordnung 1000 km in Ost-West-Richtung zustande kommen; das würde den Zeitpunkt des wahrgenommenen VA / VE am Ende um ungefähr eine Minute verschieben und den *c*-Wert merklich verändern. Möglicherweise erfährt die Inklination der Io-Bahn durch Störungen der anderen Jupitermonde geringfügige periodische Veränderungen, dadurch ergäben sich ebenso Verschiebungen der Ein- und Austrittsstellen in den Schattenkegel. Wir können hier nur die möglichen Störeffekte aufzählen, aber in Ermangelung spezieller Ephemeriden für die galileischen Monde die Einflüsse auf die *c*-Werte in Diagramm 4 nicht näher analysieren. Die Störungen des Io-Orbits sind in den Berechnungen für die in den Jahrbüchern notierten Ereignisse jedenfalls berücksichtigt.

**Dr. Albrecht Schultz**

Im Alten Kloster 16

76857 Eußerthal





****

**Bild 1** Zur Definition des synodischen Umlaufes für den Mond Io: Er dauert von einem Verfinsterungsende bis zum nächsten und wird z.B. an einem fiktiven Standort auf der Nachtseite Jupiters registriert; innerhalb der synodischen Umlaufzeit wird vom Radiusvektor des Jupitersatelliten gegenüber den Fixsternen der Vollwinkel und zusätzlich ein Winkel überstrichen



**Bild 2** Die Io-Bahn von der Sonne aus gesehen: Kantenstellung bzw. maximale Öffnung



**Bild 3** Querschnitt des Jupiterschattens und Verfinsterungs-Stellen (schematisch).

Zeitliche Abfolge: VA(-2) → VA(-1) → VA(0) → Jupiteropposition → VE(0) → VE(1) → VE(2).

Die Abplattung des Planeten ist nicht berücksichtigt.

***BS***

**Jupiter**

Sonne

Jupiter-Äquator

und Io-Bahnebene

**Bild 4** Zur Definition der jovizentrischen Breite *BS* der Sonne