

# Die Bewegung der Planeten

## Vom Wissen über Beobachtungen zur Messung

U. Backhaus

*Wie viele, denen die „Kepler’schen Gesetze“ so leicht von der Zunge gehen, haben jemals einen Planeten gesehen, das heißt, nicht nur einfach als einen hellen Stern gezeigt bekommen, sondern sich etwas mit ihm angefreundet und seiner Wegspur durch die Sternbilder, seinem zögernden Gang, seinem heimlichen Aufglänzen? ([9])*

### 1 | Einleitung

● In keinem Buch zum Sachunterricht in der Grundschule, in keinem Astronomiebuch für Kinder fehlen von Raumsonden oder von Astronauten aufgenommene Fotos der Erde im Weltraum. Auch populäre Wissenschaftsbücher und Fernsehsendungen zeigen immer wieder solche Blicke von außen auf die Erde. Jedes Kind „weiß“ deshalb heute, dass die Erde eine Kugel ist, die frei im Weltraum schwebt bzw. sich um die Sonne bewegt. Dieses „Wissen“ ist jedoch in den Kindern – und auch in den meisten Erwachsenen – in keiner Weise verankert in dem Sinne, dass sie wüssten, woher dieses Wissen stammt oder wie man es herausgefunden hat. Und es gibt so gut wie keine Verbindung zwischen diesem Wissen und Erfahrungen, die jeder alltäglich machen könnte, wenn er nur gelernt hätte, die ent-

sprechenden Phänomene wahrzunehmen und mit abstrakten Aussagen über die Erde als Himmelskörper in Beziehung zu setzen. Das Sonnensystem und die Bewegungen der Planeten, einschließlich der Erde, um die Sonne sind deshalb ein gutes Beispiel für das bereits von *Wagenschein* oftmals beklagte und in dem Eingangszitat zum Ausdruck kommende Missverhältnis zwischen *Gewusstem* und *Erfahrenem*. Ziel dieses Aufsatzes ist es, zur Überwindung dieses Missverhältnisses beizutragen, indem Verbindungen zwischen abstrakten *heliozentrischen* Aussagen und *egozentrisch* zu machenden Erfahrungen hergestellt werden. Es werden Anregungen zu Beobachtungen des Sternenhimmels, insbesondere im Jahre 2007, gegeben. Schließlich werden einige Möglichkeiten aufgezeigt, durch genauere Beobachtungen und systematische, aber einfach durchzuführende Messungen zu ersten quantitativen Aussagen über die Bewegung der Planeten zu gelangen.

### 2 | Die Bewegung der Planeten um die Sonne

● Das Bild am Anfang dieses Aufsatzes veranschaulicht die moderne Vorstellung über das Sonnensystem, die in der Neuzeit zuerst *Kopernikus* formuliert hat und die sich

seit *Galilei*, *Kepler* und *Newton* allmählich allgemein durchgesetzt hat. Nach dieser Vorstellung bildet die Sonne das Zentrum unseres Planetensystems. Die Erde und die anderen Planeten umlaufen sie, alle mit demselben Umlaufsinn, auf elliptischen Bahnen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht (1. Kepler’sches Gesetz). Alle diese Ellipsen sind nahezu kreisförmig und liegen ungefähr in derselben Ebene. Die Namen der Planeten in der Reihenfolge zunehmenden Abstandes von der Sonne sind Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun<sup>1</sup>.

Die Bewegung aller Planeten folgt denselben Gesetzmäßigkeiten: So werden sie umso schneller, je näher sie der Sonne kommen, und ihre Umlaufzeit ist umso größer, je größer ihre Bahn um die Sonne ist. Genauer werden diese Aussagen durch das 2. und das 3. Kepler’sche Gesetz beschrieben. *Kepler* erschloss sie empirisch aus Beobachtungsdaten. Erst *Newton* konnte sie später aus seinen Bewegungsgesetzen ableiten.

Die Erde dreht sich in ungefähr 23 Stunden und 56 Minuten einmal um ihre Achse<sup>2</sup>, die mit der Umlaufebene einen Winkel von 56,5° bildet. Sie umläuft die Sonne in 365,25 Tagen und hat dabei im Mittel den unvorstellbar großen Abstand von 150 Millionen Kilometern von der Sonne. Aufgrund der Erddrehung umlaufen wir in Deutschland die Erdachse mit einer Geschwindigkeit von mehr als 1000 km/h. Unsere Geschwindigkeit aufgrund des Erdumlaufes um die Sonne beträgt sogar 30 km/s, mehr als 100000 km/h!

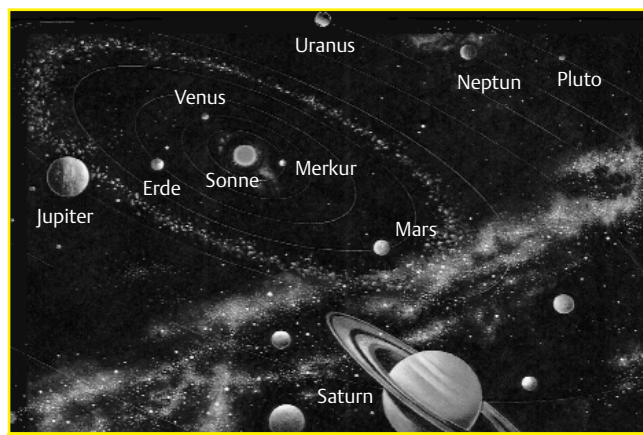


Abb. 1: Solche Bilder des Sonnensystems findet man in jedem populären Buch über Astronomie (aus [4])

<sup>1</sup> Der Merksatz, mit dem man sich diese Reihenfolge leicht einprägen kann: „MEIN VATER ERKLÄRT MIR JEDEN SONNTAG UNSERE NEUN PLANETEN.“ ist leider nicht mehr aktuell. Im August 2006 wurde Pluto von der Internationalen Astronomischen Union der Status eines Planeten aberkannt. Er gehört seitdem zu der neu geschaffenen Gruppe der Zwergplaneten.

<sup>2</sup> Erst viel später, mit immer besseren Fernrohren, stellte man fest, dass auch diese Eigenschaft allen Planeten gemeinsam ist.



Abb. 2: Mars im Löwen am 17. März 1997 (Opposition), mit feststehender Kamera fotografiert (aus [7]). Wegen der schlechten Sicht an diesem Tage mussten die Sterne des Löwen künstlich hervorgehoben werden.

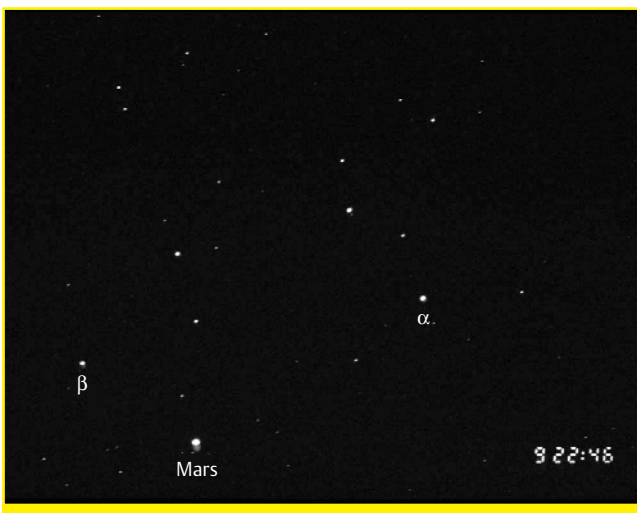


Abb. 3: Mars am 9. April 1997 (aus [7])

Die Frage „Woher weiß man das alles?“ ist schwierig zu beantworten. Schließlich hat noch niemand von hoch über der Ekliptik ebene auf das Sonnensystem blicken und

direkt beobachten können, wie die Planeten die Sonne umlaufen. Deshalb hat es Jahrtausende gedauert, bis sich die Menschen von der naheliegenden Auffassung

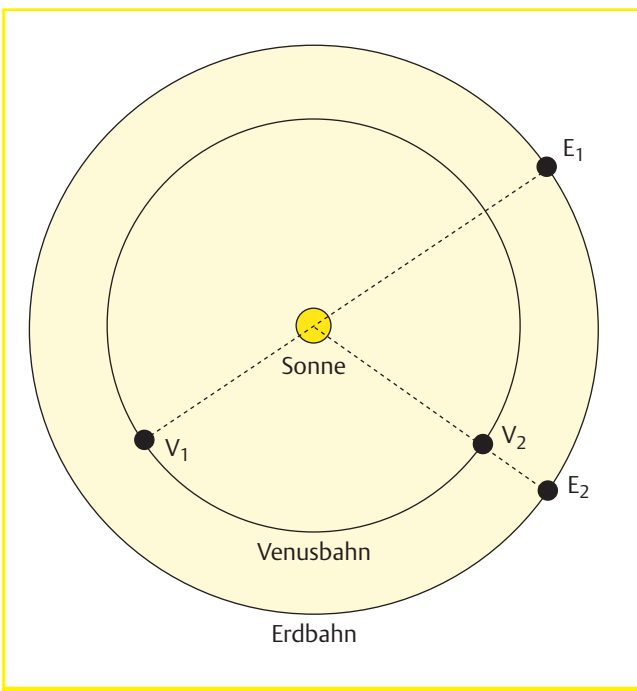


Abb. 4: In oberer (1) und unterer (2) Konjunktion zur Sonne ist Venus von der Erde aus unobservierbar.

lösen konnten, der Himmel, und mit ihm die Sonne, der Mond und alle Planeten, drehe sich um sie selbst<sup>3</sup>.

Sehr viel einfacher, wenn auch immer noch schwierig genug, ist es, umgekehrt Schlüsse aus diesen *heliocentrischen* Aussagen zu ziehen: „Wenn das wirklich so ist, dann muss am Himmel Folgendes zu beobachten sein.“ Der Versuch, diese Schlussfolgerungen durch eigene Beobachtungen und Messungen zu bestätigen, kann spannend sein und dazu beitragen, Himmelsphänomene bewusst wahrzunehmen und in das eigene Weltbild einzuordnen.

Dieser Aufsatz soll dazu anregen, sich auf diese Weise mit den Bewegungen im Sonnensystem vertraut zu machen.

### 3 | Die Planeten am Sternenhimmel

● Dadurch, dass die Erde die Sonne umläuft, steht die Sonne, von der Erde aus gesehen, im Laufe des Jahres vor immer anderen Sternbildern. Das ist direkt nicht zu beobachten. Man kann aber bemerken, dass mitternachts immer andere Sternbilder am Südhimmel stehen: Das sind die Sterne, die der Sonne gerade gegenüberstehen! Auch die Sterne, die abends nach dem Dunkelwerden am Westhorizont stehen, wechseln: Das sind die Sterne, die bald von der Sonne überstrahlt werden.

Durch die Drehung der Erde von West nach Ost gehen die Sterne am Osthorizont auf und am Westhorizont unter. Dabei behalten sie ihre Stellung relativ zueinander bei: Die ganze „Himmelskugel“ dreht sich um eine feste Achse. Sonne, Mond und die Planeten nehmen an dieser Bewegung teil. Durch die Bewegungen im Sonnensystem ändert sich allerdings ihre Stellung relativ zu den Sternen und untereinander. Bei der Sonne ist diese Bewegung nur indirekt zu erschließen, beim Mond dagegen ist sie innerhalb einiger Stunden mit bloßen Augen wahrnehmbar, insbesondere wenn er gerade an einem hellen Stern vorbeiwandert. Die Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn sind nach Sonne und Mond die hellsten Objekte am Himmel. Bei Merkur, Venus und Mars ist die Bewegung innerhalb von Tagen zu beobachten (s. Abb. 2 und 3). Die *inneren* Planeten Merkur und Venus, deren Bahndurchmesser kleiner als der der Erde ist, bleiben, von der Erde aus gesehen, immer nahe bei der Sonne. Während ihres

<sup>3</sup> Der lange Weg der Überwindung dieser so genannten geozentrischen Vorstellung wird eindrucksvoll z. B. in [5] beschrieben.

Umlaues sind sie zweimal unbeobachtbar: Einmal stehen sie hinter der Sonne, das andere Mal zwischen Sonne und Erde (*obere und untere Konjunktion*, s. Abb. 4). In beiden Fällen gehen sie zusammen mit der Sonne auf und unter.

Die *äußeren* Planeten Mars, Jupiter, Saturn usw. dagegen stehen während ihres Umlaues nur einmal in (oberer) Konjunktion zur Sonne. Im Gegensatz zu den inneren Planeten können sie aber, von der Erde aus gesehen, der Sonne genau gegenüberstehen (*Opposition*, s. Abb. 5). Sie sind dann die ganze Nacht durch beobachtbar. Weil auch die Erde die Sonne umläuft, stimmt die Zeitspanne zwischen zwei gleichartigen Konjunktionen bzw. zwischen zwei Oppositionen (die so genannte *synodische* Umlaufzeit) nicht mit der Zeit überein, die der Planet für einen Umlauf um die Sonne benötigt (*siderische* Umlaufzeit). Bei den inneren Planeten muss deshalb die synodische Umlaufzeit größer als die siderische sein.

Während einer (synodischen) Periode ändert sich der Abstand zwischen Erde und Planet. Der Planet erscheint deshalb unterschiedlich hell. Die äußeren Planeten sind dadurch besonders hell, wenn sie in Opposition zur Sonne stehen. Diese Helligkeitsänderung ist umso größer, je größer die relative Änderung des Abstandes Planet-Erde ist, je weniger sich also die Größe der Planetenbahn von der der Erdbahn unterscheidet. Deshalb ändern sich die Helligkeiten von Venus und Mars besonders deutlich. Steht ein Planet am Himmel östlich von der Sonne, dann geht er nach der Sonne unter (Abendsichtbarkeit). Steht er dagegen westlich der Sonne, geht er vor der Sonne unter, ist also abends nicht zu sehen. Dafür aber geht er vor Tagesanbruch auf (Morgensichtbarkeit). Venus erscheint uns deshalb zeitweise als *Morgenstern*, manchmal als *Abendstern*.

Da sich alle Planeten (und auch der Mond) beinahe in derselben Ebene bewegen wie die Erde, bewegen sie sich von der Erde aus betrachtet auf der Linie, die diese Ebene mit der Himmelskugel bildet, einem *Großkreis*. Dadurch erscheinen sie manchmal am Himmel wie auf einer Perlschnur aufgereiht (siehe Abb. 6, in Farbe auf der letzten Umschlagseite).

Ein innerer Planet bewegt sich meist mit der Sonne von West nach Ost über den Sternenhimmel. In der Zeit um die untere Konjunktion jedoch bewegt er sich von Ost nach West an der Sonne vorbei. Dadurch kehrt sich seine Bewegungsrichtung am

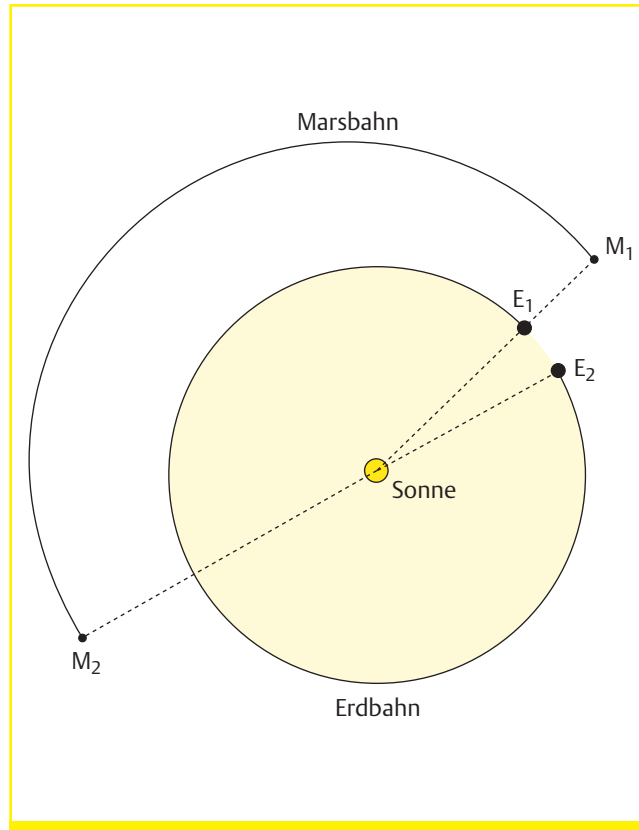


Abb. 5: Mars kann in Opposition (1) und Konjunktion (2) zur Sonne stehen.



Abb. 6 (in Farbe auf der letzten Umschlagseite): Am 19. November 1993 markierten die Venus, Merkur und Jupiter am Himmel deutlich die Bewegungsebene aller Planeten – die Ebene der Ekliptik.

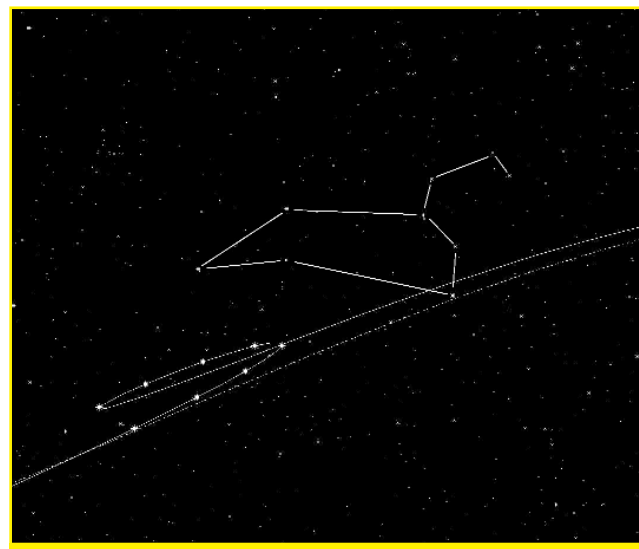


Abb. 7: 1997 bewegte sich Mars rückläufig im Sternbild Löwe.

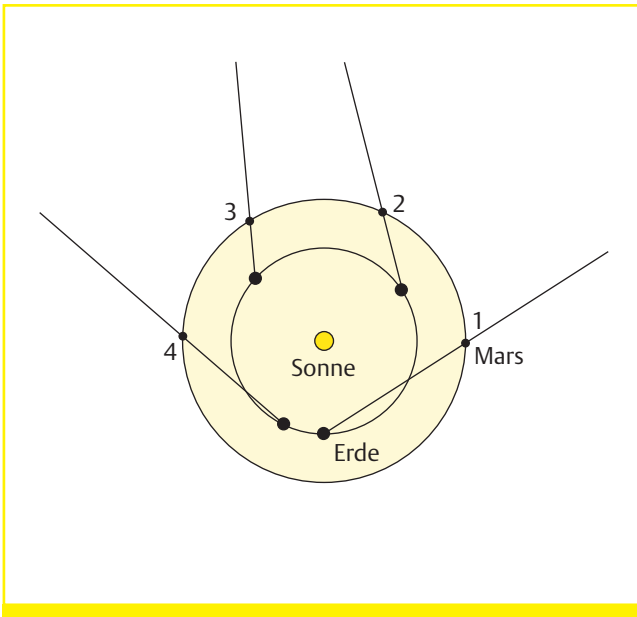


Abb. 8: Die Rückläufigkeit eines äußeren Planeten entsteht dadurch, dass sich die Blickrichtung von der Erde zum Planeten während des Überholvorganges (zwischen 2 und 3) im Uhrzeigersinn verändert.

- Welche Planeten wären abends zusehen, welche morgens und welche wären unbeobachtbar, wenn die Stellung der Planeten im Sonnensystem der Abb. 1 entspräche?
- Wie könnte das Sonnensystem am 19. November 1993 ausgesehen haben (Abb. 6)?
- In welche Richtung bewegte sich die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne im Moment der Aufnahme?

#### 4 | Beobachtungen und Messungen an Mars

● Der Jahreswechsel 2007/2008 ist optimal geeignet, an Mars Beobachtungen und Messungen vorzunehmen: Am 25. Dezember erreicht er seine Oppositionsstellung im Sternbild Zwillinge (ähnlich wie in Abb. 2): Er geht dann auf, wenn die Sonne untergeht, ist also die ganze Nacht durch beobachtbar. In der Zeit zwischen 14. November und 2. Februar ist er rückläufig, seine Schleifenbewegung dauert entsprechend länger. In dieser Zeit lässt sich die Bewegung von Mars von Woche zu Woche, zeitweilig sogar von Tag zu Tag, einfach beobachten und fotografieren. Geeignet sind dazu u. a. folgende Verfahren:

- Man beobachte die Stellung von Mars relativ zum Horizont im Abstand von etwa einer Woche abends um immer dieselbe Uhrzeit, z. B. um 22 Uhr, von immer demselben Beobachtungsort aus. Die Beobachtungen können etwa am 1. November beginnen. Die Positionsveränderung von Mars wird besonders deutlich, wenn man ihn in eine Zeichnung einträgt, die den Ost- und Südhorizont am gewählten Standort darstellt.
- Die Bewegung von Mars relativ zum Sternenhimmel wird deutlich, wenn man auf seine Position relativ zu den Zwillingsternen Castor und Pollux und zu Beteigeuze („rechte Schulter von Orion“) achtet. Bereits wenn man diese Position nach Augenmaß in eine Skizze einträgt, kann man die Schleifenbewegung selbst „entdecken“ (Abb. 9) und, mit etwas Übung, eine befriedigende Übereinstimmung mit der wahren Bewegung erzielen (Abb. 10).
- Ein noch besseres Ergebnis erzielt man, wenn man Mars zusammen mit seinem Sternumfeld fotografiert. Dazu reicht es, eine (Spiegelreflex-) Kamera, deren Objektiv eine Brennweite zwischen 35 mm

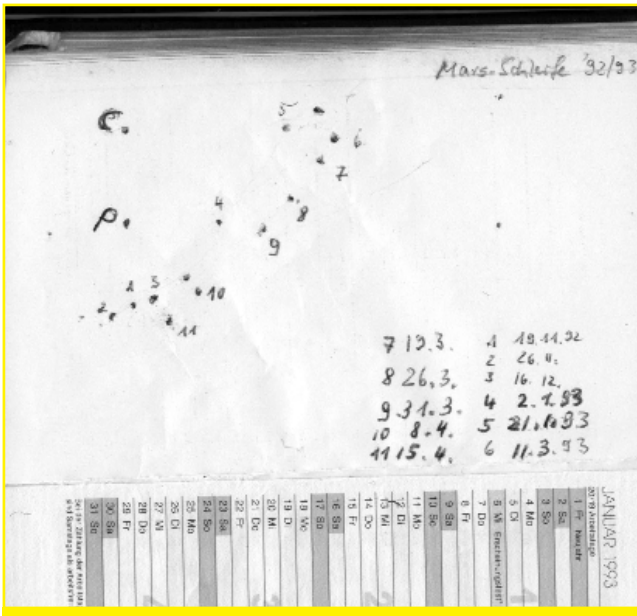


Abb. 9: Während des abendlichen „Gassigehens“ registrierte Marsbewegung mit C: Castor, P: Pollux (private Mitteilung von L. Schön)

Sternenhimmel zeitweise um: Der Planet wird rückläufig.

Auch die äußeren Planeten werden einmal während ihrer synodischen Periode rückläufig – in der Zeit um ihre Opposition zur Sonne (Abb. 7). Diese Rückläufigkeit ist etwas schwieriger einzusehen: Blickt man von Norden auf das Sonnensystem, bewegen sich alle Planeten entgegen dem Uhrzeigersinn um die Sonne. Wenn die Erde stillhalten würde, würde sich deshalb ein äußerer Planet immer von West nach Ost über den Sternenhimmel bewegen. Durch den Erdumlauf ändert sich daran nur etwas, wenn die Erde den Planeten überholt: Der Planet scheint sich dann in die entgegengesetzte Richtung zu bewegen – wie ein langsamer Zug, der aus einem ihn überholenden Zug beobachtet wird. Abb. 8 veran-

schaulicht diese Bewegungsumkehr durch die Richtungsänderung, die der Blick von der Erde zum Planeten während des Überholvorganges vollzieht.

Es ist nicht leicht, die Verbindung zwischen diesen Erscheinungen am Himmel und den Bewegungen im Sonnensystem zu ziehen, und es sind viele Beobachtungen nötig, um alle diese Phänomene selbst wahrzunehmen. Aber schon die einmalige Beobachtung der Bewegung eines Planeten vor dem Hintergrund des Sternenhimmels oder die bewusste Wahrnehmung unterschiedlicher Helligkeiten desselben Planeten schaffen eine erste Ahnung, wie die Aussagen von Fernsehsendungen und Lehrbüchern mit der eigenen Umwelt verknüpft sind. Vielleicht gelingt es dann auch, Antworten auf die folgenden Fragen zu finden:

und 50 mm hat, fest auf einem Stativ zu montieren. Die Belichtungszeit sollte, je nach Lichtstärke des Objektivs und Empfindlichkeit des Films, zwischen 15 Sekunden und einer Minute liegen. Digitalkameras sind geeignet, wenn sie eine ausreichend lange Belichtungszeit ermöglichen.

Wenn man die Marspositionen aus den Fotos sorgfältig<sup>4</sup> in eine Sternkarte der entsprechenden Himmelsgegend (Abb. 11) überträgt, kann man die Bewegung recht genau ausmessen ([1]). Der Vergleich des Fotos in Abb. 12 mit der Freihandaufzeichnung in Abb. 9 verdeutlicht das Verfahren.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich leicht der Radius der Marsbahn um die Sonne bestimmen, wenn man die Position von Mars am Tage seiner Opposition und eine weitere Position während seiner Rückläufigkeit registriert hat<sup>5</sup> ([1]):

$$r_{\text{Mars}} = \frac{\sin(\eta + \varepsilon)}{\sin(\eta + \beta)} \quad (1)$$

Dabei ist  $\eta$  der Winkel, um den sich Mars in der betrachteten Zeit am Sternenhimmel bewegt hat.  $\varepsilon$  und  $\beta$  sind die Zentralwinkel, die Erde und Mars in derselben Zeit auf ihrer Bahn um die Sonne überstrichen haben. Sie lassen sich leicht aus den entsprechenden Umlaufzeiten (Erde: 365,25 Tage, Mars: 687 Tage) berechnen.

## 5 | Beobachtungen und Messungen an Venus

● Auch Beobachtungen an Venus lassen sich im Jahr 2007 sehr gut durchführen, da sie am 18. August in unterer Konjunktion zur Sonne steht. In den Monaten vorher ist sie als Abendstern, in den folgenden Monaten als Morgenstern zu beobachten. In dieser Zeit lässt sich die Bewegung von Venus relativ zu den Sternen, insbesondere aber relativ zum Horizont und zu anderen Planeten und zur Sonne, besonders gut beobachten:

- Die sich ändernde Position relativ zum Horizont wird offenbar, wenn man abends, jeweils im Abstand von unge-

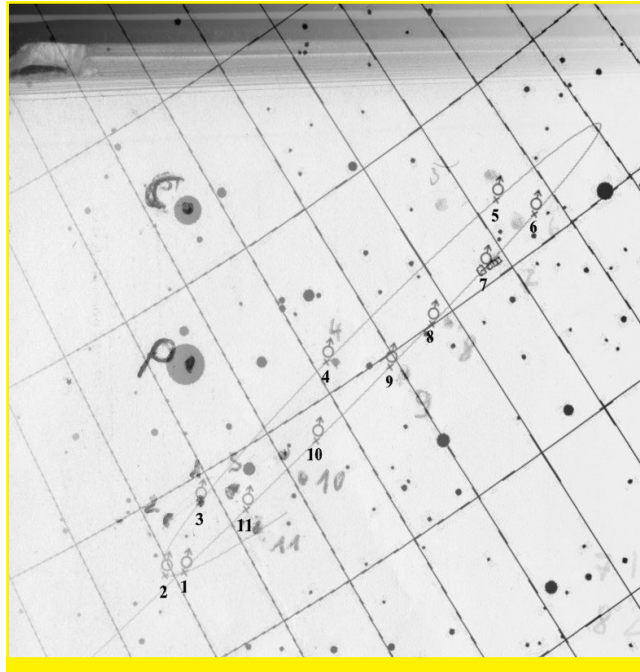


Abb. 10: Vergleich der Aufzeichnungen in Abb. 9 mit berechneten der Marspositionen

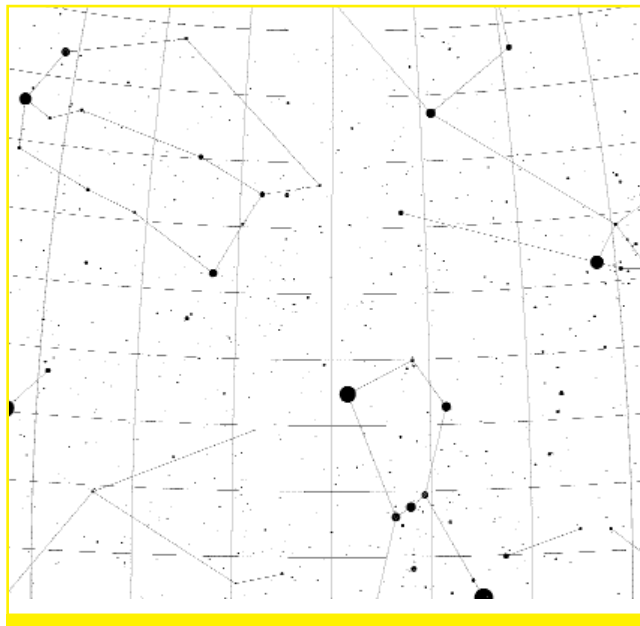


Abb. 11: Sternkarte zum Eintragen der Positionen von Mars während seiner Schleifenbewegung 2007/08



Abb. 12: Mars in den Zwillingen am 26.3.1993

<sup>4</sup> Das funktioniert erstaunlich gut bereits nach Augenmaß. Noch bessere Ergebnisse erzielt man, wenn man Dreiecke ausmisst, die Mars mit Sternen bildet.

<sup>5</sup> Das Verfahren lässt sich auch leicht verallgemeinern auf zwei beliebige Positionen während der Rückläufigkeit. Zum Beispiel kann man die nicht beobachtete Position am Tage der Opposition durch Interpolation gewinnen.

fähr einer Woche, immer um dieselbe Uhrzeit und vom selben Beobachtungsort aus die Stellung von Venus in eine Horizontsskizze einträgt.

- Besonders eindrucksvoll werden dabei die folgenden Zeiten sein:
  - Um den 20. Mai stehen neben Venus auch Merkur, der Mond und Saturn am abendlichen Himmel: Sie markieren deutlich die Ebene der Ekliptik am Himmel. Auch ihre Bewegung relativ zueinander wird offenbar.
  - Ende Juni stehen Venus und Saturn nahe beieinander. Ihre relative Positionsveränderung wird von Tag zu Tag wahrnehmbar sein.
  - Die Rückläufigkeit von Venus ist schwierig zu beobachten, weil sie in dieser Zeit recht nahe bei der Sonne steht.
  - Wenn man die Venusposition kurz nach Sonnenuntergang (bzw. kurz nach Sonnenaufgang) registriert, kann man wahrnehmen, wie sich der Winkelabstand zur Sonne verändert.

Wenn man Venus bereits kurz vor Sonnenuntergang oder noch kurz nach Sonnenaufgang am Himmel findet, dann lässt sich ihr sich ändernder Winkelabstand zur Sonne mit einfachen Mitteln mit hinreichender Genauigkeit messen ([8]). Auf diese Weise können die Maximalabstände  $\alpha_{\max}$  (am 8. Juni und 22. Oktober) registriert und gemessen werden. Mithilfe dieser Werte lässt sich der Radius  $r_{\text{Venus}}$  der Venusbahn berechnen (Abb. 13):

$$\sin \alpha_{\max} = \frac{r_{\text{Venus}}}{r_{\text{Erde}}}$$

oder

$$r_{\text{Venus}} = \sin \alpha_{\max} \cdot AE. \quad (2)$$

Dabei steht AE für den mittleren Abstand Erde-Sonne, die *Astronomische Einheit*. Wie aber kann man die (siderische) Umlaufzeit von Venus bestimmen?<sup>6</sup> Die Umlaufzeit, die wir von der Erde aus messen, ist dadurch verändert, dass die Erde selbst die Sonne umläuft! Diese *synodische* Umlaufzeit lässt sich z. B. bestimmen, indem man die Zeit misst, die zwischen zwei östlichen

<sup>6</sup> Die meist gegebene Antwort, die Umlaufzeit eines Planeten lasse sich aus dem 3. Keplerschen Gesetz berechnen, wenn der Bahnradius bekannt sei, ist unsofern unehrlich, als Kepler dieses Gesetz empirisch gefunden hat, Bahnradien und Umlaufzeiten also bereits kennen musste.

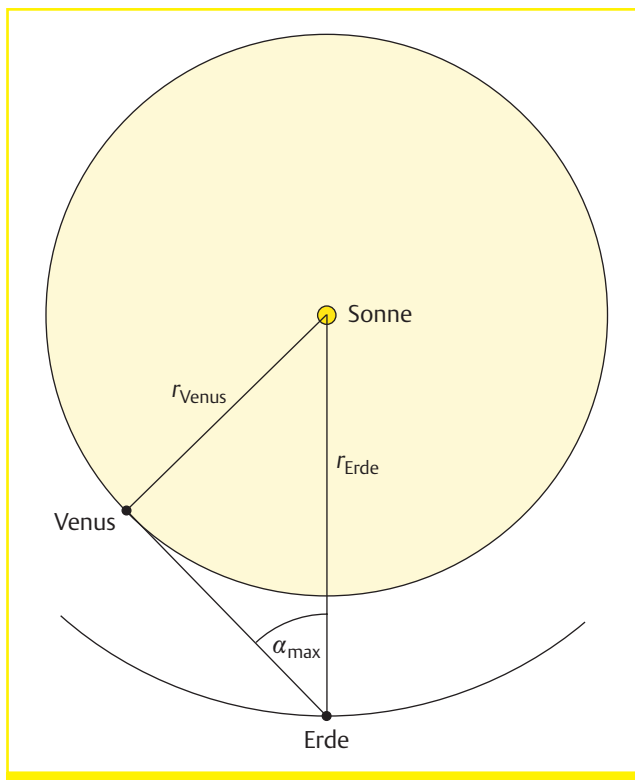


Abb. 13: Die Stellung von Venus und Erde, wenn Venus von der Erde aus den maximalen Winkelabstand zur Sonne einnimmt

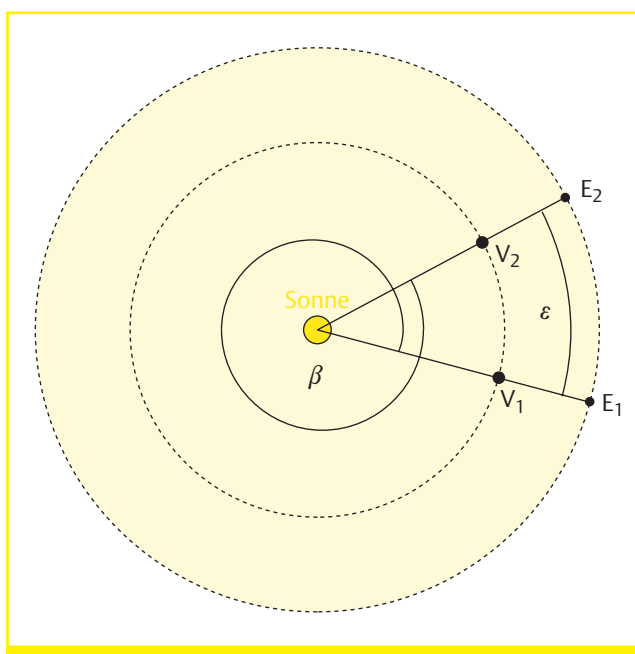


Abb. 14: Zum Zusammenhang zwischen synodischer und siderischer Umlaufzeit eines inneren Planeten

(abendlichen) Maximalabständen zwischen Venus und Sonne vergeht. Durch Beobachtungen allein im Jahr 2007 lässt sie sich bestimmen, indem man die Zeit zwischen dem östlichen und dem westlichen Maximalabstand zur Sonne misst. Mit Hilfe von Abb. 13 kann man sich überlegen, wie der Zentralwinkel, den Venus in dieser Zeit überstrichen hat, mit dem Maximalwinkel zusammenhängt.

Aus der so bestimmten synodischen Umlaufzeit lässt sich die „wahre“, die siderische Umlaufzeit von Venus folgendermaßen ab-

leiten<sup>7</sup>: In der Zeit  $T_{\text{syn}}$  zwischen zwei Überholvorgängen hat die Erde den Zentralwinkel  $\epsilon$ , Venus aber den Zentralwinkel

$$\beta = \epsilon + 2\pi \quad (3)$$

überstrichen (Abb. 14). Da Venus und Erde

<sup>7</sup> Wenn rotierende Bezugssysteme und Winkelgeschwindigkeiten bekannt sind, ist die Argumentation einfacher: Die beobachtete Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{\text{syn}}$  von Venus gehört zum rotierenden Bezugssystem, in dem Sonne und Erde ruhen, das sich also mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{\text{Erde}}$  dreht. Der Zusammenhang zwischen synodischer und siderischer Winkelgeschwindigkeit ist also  $\omega_{\text{syn}} = \omega_{\text{sid}} - \omega_{\text{Erde}}$ . Daraus folgt sofort (4).

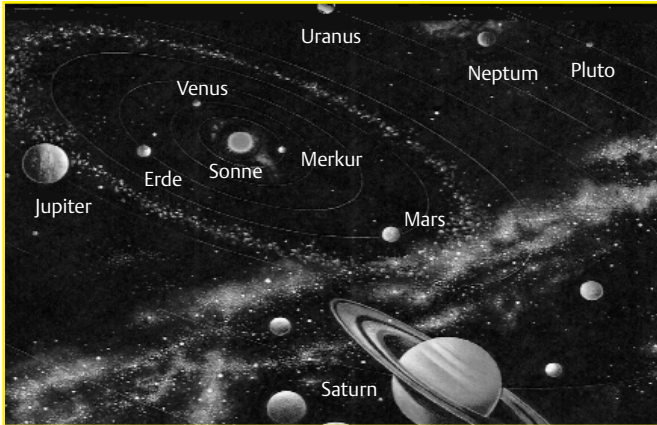


Abb. A1



Abb. A2



Abb. A3: Überlagerung zweier Fotos, die im Rahmen des Venustransitprojektes im Abstand von drei Stunden aufgenommen wurden

**Aufgabe 5:** Messung der Umlaufzeit von Mars

Die letzten Marsoppositionen traten am 28. 3. 2003 und 7. 11. 2005 ein, die nächste wird am 25. 12. 2007 erreicht. Berechnen Sie anhand dieser Daten die synodische und die siderische Umlaufzeit von Mars.

**Aufgabe 6:** Bestimmung des Marsbahnradius

Die Abb. A4 und A5 zeigen Fotos von Mars am Tage seiner Opposition (17. 3. 1997) und 23 Tage später (9. 4. 1997). Bestimmen Sie anhand dieser Fotos den Radius der Marsbahn.

- Bestimmen Sie den Winkel, um den sich Mars rückläufig weitbewegt hat. (Der Abstand zwischen den Sternen  $\alpha$  Leo und  $\beta$  Leo beträgt  $24,6^\circ$ )
- Welche Zentralwinkel  $\varepsilon$  und  $\beta$  haben Erde und Mars im betrachteten Zeitintervall überstrichen? (Die siderische Umlaufzeit von Mars haben Sie ja bereits in der vorangegangenen Aufgabe bestimmt.)
- Berechnen Sie aus diesen Ergebnissen den Radius der Marsbahn.

**Aufgabe 1:** Synodische und siderische Umlaufzeit äußerer Planeten

(a) Leiten Sie eine dem Zusammenhang  $1/T_{\text{sid}} = 1/T_{\text{syn}} + 1/(1a)$  entsprechende Beziehung für den Zusammenhang zwischen synodischer und siderischer Umlaufzeit bei äußeren Planeten her.

(b) Bei einem äußeren Planeten können synodische und siderische Umlaufzeit identisch sein. Wie groß ist dann diese Umlaufzeit? Veranschaulichen Sie diesen Spezialfall!

**Aufgabe 2:** Sonnensystem und Planetensichtbarkeit

(a) Wie würde der abendliche Westhimmel aussehen, wenn die Planeten tatsächlich die in Abb. A1 gezeigte Stellung im Sonnensystem hätten?

(b) Welche Stellung im Sonnensystem könnten die Planeten an dem Tag gehabt haben, an dem das Foto in Abb. A2 aufgenommen wurde?

**Aufgabe 3:** Bestimmung der Umlaufzeit von Venus

Am 10. 1. 2003 erreicht Venus den größten westlichen Winkelabstand zur Sonne (gemessen im Rahmen des Transitprojektes [www.didaktik.physik.uni-essen.de/~backhaus/VenusProject/venusorbit.htm](http://www.didaktik.physik.uni-essen.de/~backhaus/VenusProject/venusorbit.htm)). Versuchen Sie selbst zu beobachten, dass Venus 2007, drei Perioden später, diese Stellung am 27. Oktober erreichen wird.

**Aufgabe 4:** Venustransit und Bahnradius der Venus

Abb. A3 zeigt die Überlagerung zweier Fotos, die um 7:00 Uhr und 10:00 Uhr MEZ vom Venustransit am 8. 6. 2004 aufgenommen wurden. Bestimmen Sie anhand dieser Fotos das Verhältnis der Bahnradien von Venus und Erde! (Der Winkeldurchmesser der Sonne betrug an jenem Tag  $31,6' = 0,527^\circ$ . Die in der vorangehenden Aufgabe bestimmte synodische Umlaufzeit von Venus (584 Tage) kann als bekannt vorausgesetzt werden.)

(a) Berechnen Sie die sich aus diesen Beobachtungsdaten ergebende synodische Umlaufzeit von Venus.

(b) Leiten Sie aus Ihrem Ergebnis die siderische Umlaufzeit von Venus ab.

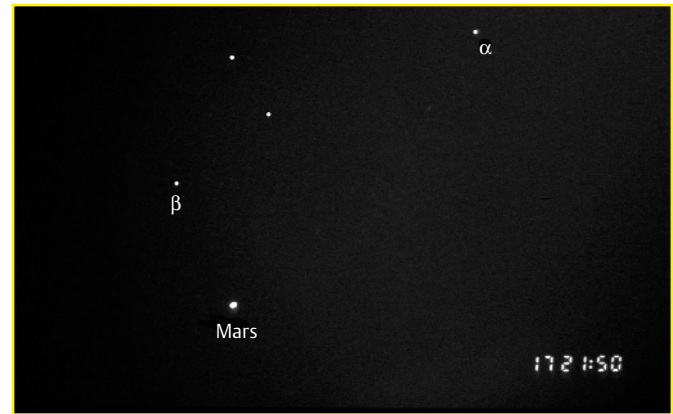


Abb. A4: Mars im Löwen am 17. März 1997 (Opposition), mit feststehender Kamera fotografiert.

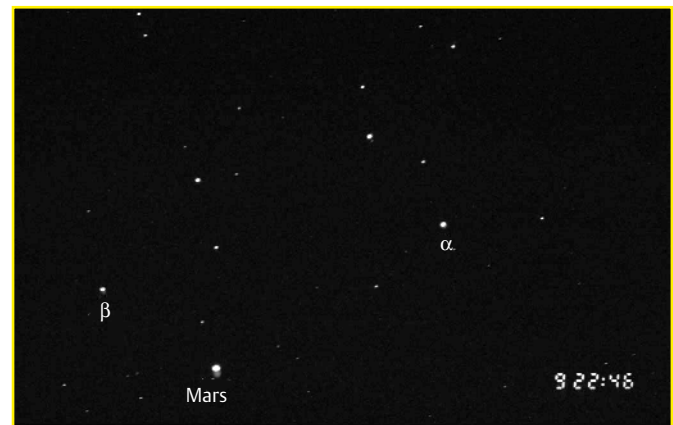


Abb. A5: Mars am 9. April 1997

## Arbeitsblatt 2 \_ Lösungen zur Bewegung von Planeten

## Lösungen der Aufgaben

## Lösung 1: Synodische und siderische Umlaufzeit äußerer Planeten

(a) Die gesuchte Beziehung lässt sich ableiten, wenn man in Abb. 14 die Rollen von Erde und Planet vertauscht. Dann ergibt sich ganz entsprechend  $\varepsilon = \beta + 2\pi$ , woraus folgt:

$$\frac{1}{T_{\text{sid}}} = \frac{1}{1 \text{ a}} - \frac{1}{T_{\text{syn}}} \quad (5)$$

(b) Setzt man in (5)  $T_{\text{syn}} = T_{\text{sid}}$ , ergibt sich sofort  $T_{\text{sid}} = 2 \text{ a}$ . Wenn die Erde, ausgehend von der Oppositionsstellung des Planeten, einen Umlauf ausgeführt hat, hat der Planet die Sonne erst zur Hälfte umlaufen. Aus der Oppositionsstellung ist die Konjunktionsstellung geworden. Nach zwei Jahren, wenn der Planet einen Umlauf, die Erde aber bereits zwei vollendet hat, tritt die nächste Opposition ein.

## Lösung 2: Sonnensystem und Planetensichtbarkeit

(a) Von der Erde aus gesehen stehen Venus, Uranus und Neptun östlich von der Sonne. Diese drei Planeten müssten also nach Sonnenuntergang am Westhimmel zu sehen sein. Wahrscheinlich steht allerdings Neptun so nahe bei der Sonne, dass es selbst mit einem Teleskop schwer fallen würde, ihn zu finden.

Jupiter steht in Opposition zur Sonne, steht also nach Sonnenuntergang am Osthimmel. Mars geht erst gegen Mitternacht auf.

(b) Da Venus, Merkur und Jupiter am Morgenhimmel stehen, müssen diese Planeten westlich von der Sonne stehen. Abb. A6<sup>8)</sup> zeigt die Stellung der Planeten im Sonnensystem am 11. November 1993. Es zeigt, dass an jenem Tage Mars nur kurz nach Sonnenuntergang zu beobachten war.

## Lösung 3: Bestimmung der Umlaufzeit von Venus

(a) Zwischen den beiden Terminen liegen  $\Delta t = 1751$  Tage, die synodische Umlaufzeit von Venus beträgt demnach  $T_{\text{syn}} = 584$  Tage.

(b) Nach Gleichung (4) ergibt sich  $T_{\text{sid}} = 225$  Tage.

## Lösung 4: Venustransit und Bahnradius der Venus

(a) Vergleicht man den Abstand der Venuspositionen mit dem Sonnendurchmesser, dann erhält man einen Wert von  $\eta' = 12,2' = 0,204^\circ$  für den Winkel, den Venus von der Erde aus in den drei Stunden überstreicht.

(b) Der Zentralwinkel, den Venus in dieser Zeit synodisch überstreicht, kann aus der synodischen Umlaufzeit abgeleitet werden. Er beträgt  $\beta = 0,077^\circ$ .

(c) Die beiden Winkel müssen sich aber verhalten wie der Abstand der Venus von Sonne und Erde, siehe Abb. A7.

$$\frac{\beta'}{\eta'} = \frac{r_E - r_V}{r_V} \Rightarrow \frac{r_V}{r_E} = \frac{\eta'}{\eta' + \beta'} = \frac{0,204^\circ}{0,281^\circ} = 0,73.$$

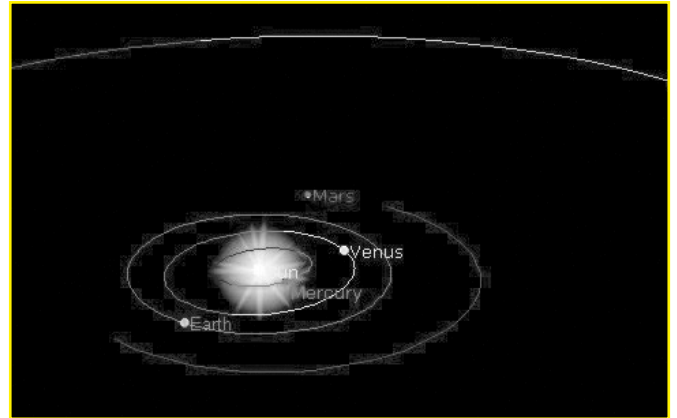


Abb. A6: Das innere Sonnensystem am 19. November 1993

Der Radius der Venusbahn beträgt also  $r_V = 0,73 \text{ AE}$  – gemessen innerhalb von nur drei Stunden!

## Lösung 5: Messung der Umlaufzeit von Mars

Aus den Daten ergibt sich im Mittel eine synodische Umlaufzeit von  $T_{\text{syn}} = 781$  Tage. Daraus ergibt sich mit Hilfe von (5) die siderische Umlaufzeit von Mars zu  $T_{\text{sid}} = 686$  Tage.

## Lösung 6: Bestimmung des Marsbahnradius

(a) Überträgt man nach Augenmaß die Marsposition vom 9. April in das Bild vom 17. März (Opposition), dann ergibt sich eine Veränderung der Marsposition um  $\eta \approx 7,8^\circ$ .

(b) Entsprechend ihren siderischen Umlaufzeiten von 365,25 Tagen und 686 Tagen haben Erde und Mars in dem Zeitintervall von 23 Tagen Zentralwinkel von  $\varepsilon = 22,7^\circ$  und  $\beta = 12,1^\circ$  überstrichen.

(c) Mit Hilfe von Gleichung (1) ergibt sich der Radius der Marsbahn zu  $r_{\text{Mars}} = 1,5 r_{\text{Erde}}$  oder  $r_{\text{Mars}} = 1,5 \text{ AE}$ .

<sup>8)</sup> Im Internet sind leicht Programme zu finden, die die Bewegungen im Sonnensystem simulieren oder für beliebige Tage die Stellung der Planeten anzeigen. Die Abbildung wurde mit dem Astronomieprogramm „The Sky“ erstellt.

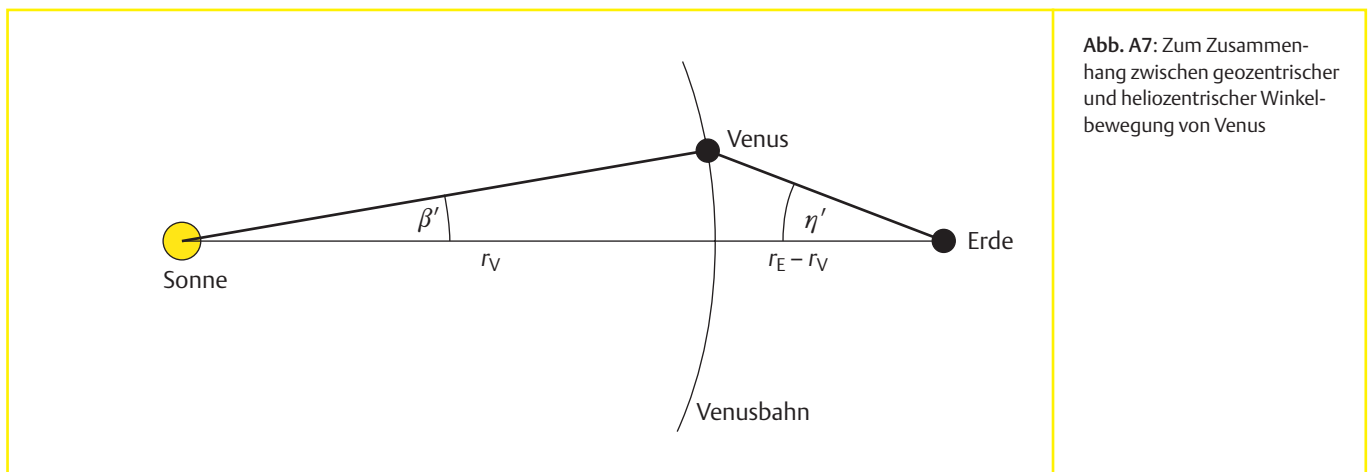


Abb. A7: Zum Zusammenhang zwischen geozentrischer und heliozentrischer Winkelbewegung von Venus



### Bemerkungen zur Ellipsenform der Planetenbahnen

In vielen Publikationen ist die Ellipsenform der Planetenbahnen stark übertrieben, die Stellung der Sonne innerhalb der Planetenbahn nicht zu der Form passend dargestellt.

Tatsächlich sind die Bahnen aller Planeten nahezu kreisförmig. Selbst die Bahn von Mars, die nach der von Merkur am stärksten von der Kreisform abweicht, ist nur bei äußerst genauer Betrachtung von einem Kreis zu unterscheiden (Abb. 15). Deshalb wird bei den Auswertungen und Berechnungen dieser Arbeit vorausgesetzt, dass Venus, Erde und Mars die Sonne gleichförmig und konzentrischen Kreisen umlaufen, die alle in derselben Ebene liegen.

Der durch die Bahnform gemachte Fehler ist kaum zu bemerken. Größer ist jedoch der Fehler aufgrund der angenommenen Konzentrität und Gleichförmigkeit, da sich die Bahngeschwindigkeit eines Planeten nach dem 2. Kepler'schen Gesetz verändert, wenn sich sein Abstand zur Sonne ändert: Abb. 15 zeigt deutlich, dass sich die Sonne S nicht im Mittelpunkt M der nahezu kreisförmigen Marsbahn befindet.

Trotzdem führen die vereinfachenden Annahmen dieser Arbeit, die die Auswertungen in dieser Weise erst möglich machen, zu bemerkenswert guten Ergebnissen.

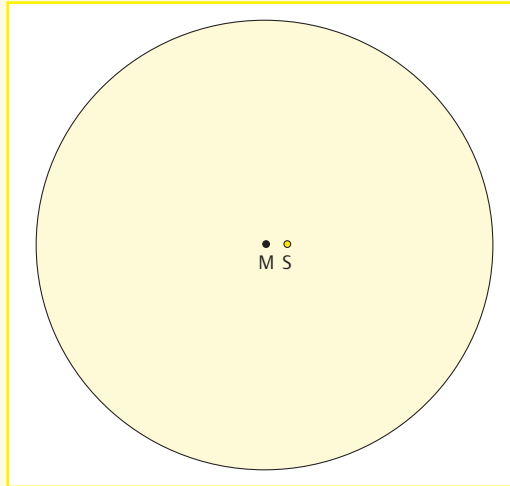


Abb. 15: Vergleich der Marsbahn mit einem Kreis

näherungsweise mit konstanter Winkelgeschwindigkeit umlaufen, hängen diese Winkel folgendermaßen mit den zugehörigen siderischen Umlaufzeiten  $T_{sid}$  von Venus und  $a$  der Erde zusammen:

$$\beta = \frac{2\pi}{T_{sid}}, \quad \varepsilon = \frac{2\pi}{1a} T_{syn}.$$

Setzt man das in (3) ein, ergibt sich der gesuchte Zusammenhang zwischen siderischer und synodischer Umlaufzeit von Venus:

$$\frac{1}{T_{sid}} = \frac{1}{T_{syn}} + \frac{1}{1a}. \quad (4)$$

Besonders genau lässt sich die Umlaufzeit von Venus bestimmen, wenn es gelingt, zwei sonst unbeobachtbare untere Konjunktionen durch Beobachtung zweier aufeinander folgender Venusdurchgänge vor der Sonne (8. Juni 2004 und 6. Juni 2012, dazwischen liegen fünf synodische Venusperioden) zu registrieren. Bei einem sogenannten Venustransit sieht man Venus als kreisrunde Scheibe vor der Sonne vorbeilaufen und kann innerhalb von Stunden die Bewegung von Venus beobachten und den Abstand zwischen Venus und Sonne bestimmen (s. u.). Die historische Bedeutung von Venustransits bestand allerdings in der Möglichkeit, durch ihre Beobachtung von verschiedenen Orten der Erde aus die Entfernung zwischen Erde und Sonne genau zu messen. Der vergangene Venustransit 2004 war Gegenstand eines großen internationalen Projektes, in dem diese historischen Mes-

sungen mit modernen Methoden, aber einfachen Mitteln nachvollzogen wurden ([3]). Leider sind Venustransits extrem selten!

### 6 | Schlussbemerkungen

● Wenn es gelingt, einige der beschriebenen Vorgänge und Konstellationen am Himmel selbst zu beobachten und sich bei der Beobachtung in die Stellung der Erde im Sonnensystem, ihre Position relativ zu anderen Planeten und ihre momentane Bewegung eindenken, dann ist ein erster Schritt zur Überwindung der großen Diskrepanz zwischen dem Schulwissen und der eigenen Erfahrung gemacht. Allerdings sind viele weitere Beobachtungen der Vorgänge am Himmel nötig, um die egozentrische bzw. geozentrische Wahrnehmung mit der wissenschaftlichen heliozentrischen Sichtweise in Einklang zu bringen. In [4] werden viele weitere Vorschläge für Beobachtungen und Überlegungen gemacht, die gemeinsam mit Schülern durchgeführt werden können.

Die Aufgaben sollen darüber hinaus erste Anregungen geben, zunehmend genauer hinzusehen und sich auch mit quantitativen Aspekten der Bewegungen im Sonnensystem zu befassen. Konkrete Hinweise auf lohnende Beobachtungen können jedem astronomischen Jahrbuch (z. B. [6]) entnommen oder auch im Internet gefunden werden.

Die Überlegungen dieses Aufsatzes befassen sich nur mit den geometrischen Aspekten des Sonnensystems. Es soll deshalb abschließend betont werden, dass die geozentrische und die heliozentrische Be-

schreibung in dieser Hinsicht völlig äquivalent sind: Zwischen den beiden vermittelt eine (im Prinzip) einfache Koordinatentransformation zwischen zwei Systemen, die mit der Erde bzw. mit der Sonne fest verbunden sind. Um über die „Richtigkeit“ der beiden Systeme urteilen zu können, sind zusätzliche (physikalische) Argumente und Erfahrungen erforderlich.

#### Literatur

- [1] U. Backhaus: Bestimmung der Radien von Planetenbahnen mit Fernglas und Sternkarte, Praxis der Naturwissenschaften/Physik 39/5, 10 (1990)
- [2] U. Backhaus et al.: Observing, Photographing and Evaluating the Transit of Venus on June 8th, 2004, Internet-Projekt, <http://www.didaktik.physik.uni-essen.de/~backhaus/VenusProjekt.htm>
- [3] U. Backhaus: Der Venustransit 2004 – Forschendes Lernen in einer internationalen Kooperation, Computer + Unterricht 57, 34 (2005)
- [4] U. Backhaus u. K. Lindner: Astronomie plus, Cornelsen: Berlin 2005
- [5] J. Hamel: Geschichte der Astronomie, Birkhäuser: Basel usw. 1998
- [6] H.-U. Keller: Das Himmelsjahr, Franckh-Kosmos: Stuttgart
- [7] S. Stein: Beobachtung und Auswertung der Bewegung des Planeten Mars, Staatsexamensarbeit, Universität Koblenz 1998
- [8] Internetprojekt Observing, Photographing and Evaluating the Transit of Venus, June 8th, 2004, Teilprojekt: Measuring the the Radius of Venus' Orbit, <http://www.didaktik.physik.uni-essen.de/~backhaus/VenusProject/venusorbit.htm>
- [9] M. Wagenschein: Die Erfahrung des Erdballs, Der Physikunterricht 1, 1 (1967), siehe auch <http://martinwagenschein.de/Archiv/W-010.pdf>

#### Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Udo Backhaus, Fb Physik der Universität Duisburg-Essen, Campus Essen, Didaktik der Physik, 45117 Essen, E-Mail: [udo.backhaus@uni-due.de](mailto:udo.backhaus@uni-due.de), <http://didaktik.physik.uni-duisburg-essen.de/~backhaus/>