

Beobachtung und Interpretation von Planetenbewegungen

Dr. Udo Backhaus, Universität Osnabrück, Fachbereich Physik, Barbarastr. 7, 4500 Osnabrück

[Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 45/8, 483 (1992)]

Wie viele, denen die „Keplerschen 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? (WAGENSCHHEIN 1967 [9]).

1 Einleitung

Die von WAGENSCHHEIN geäußerte Skepsis ist heute ebenso aktuell wie 1967. Daran wird sich wahrscheinlich auch wenig ändern durch einen Astronomieunterricht, der innerhalb von 60 Unterrichtsstunden einen Überblick über die gesamte Astronomie anstrebt und für die Behandlung des Planetensystems einen Rahmen von gerade 13 Stunden vorsieht, in denen neben der Untersuchung der Planetenbahnen auch noch die physikalischen Eigenschaften der Planeten und des Mondes behandelt werden sollen (siehe z.B. [6]).

Voraussetzung für eine „Verwurzelung“ des Wissens über die Planeten im Ganzen der Schüler im Sinne WAGENSCHHEINs ist, dass die Planeten selbst „anwesend“ geworden sind, d.h. in ihrer „eigenen Wirklichkeit vor den Lernenden“ stehen. Dazu reichen keine Zeichnungen, die das Zustandekommen der Planetenschleifen erklären, keine Dias von Planeten, auch nicht der einmalige Blick zum Himmel. Um die Schüler mit einem Planeten vertraut zu machen, muss dieser vielmehr über längere Zeit beobachtet, seine Bahn durch die Sternbilder verfolgt und seine Helligkeitsänderung wahrgenommen werden.

Der Mars ist für solche Beobachtungen besonders geeignet, weil er als äußerer Planet einfach zu beobachten ist, seine Bewegung schnell und seine Helligkeitsänderung sehr auffällig ist. Außerdem hat er bei der Entdeckung der Planetengesetze durch KEPLER die entscheidende Rolle gespielt, weil seine Bahn eine relativ große Exzentrizität aufweist. Leider kommt Mars jedoch nur etwa alle 2 Jahre in günstige Beobachtungspositionen. (In dieser Hinsicht ist Jupiter geeigneter!)

2 Langzeitbeobachtung des Mars

Mars fällt durch seine Helligkeit am Himmel auf, die meist größer als die aller benachbarten Sterne ist. Trotzdem ist er in keiner Sternkarte verzeichnet! Bereits nach einigen Tagen hat er seine Stellung relativ zu den benachbarten Sternen deutlich verändert. Verfolgt man ihn über längere Zeit, bemerkt man, dass er sich vor dem unveränderlichen Hintergrund des Fixsternhimmels mit seinen Sternbildern bewegt, meist ungefähr „gradlinig“ (d.h. auf einem Großkreis) von West nach Ost. Manchmal aber beginnt er zu zögern, wird immer langsamer und setzt schließlich seine Wanderung in der entgegengesetzten Richtung fort – nur um einige Wochen später abermals umzukehren. Während dieser Zeit der Rückläufigkeit erreicht er seine größte Helligkeit. Diese Wanderung kann bei Mars leicht mit bloßen Augen bemerkt und verfolgt werden, insbesondere dann, wenn auffällige Sternkonstellationen in der Nähe sind (was bei den kommenden beiden Marsschleifen der Fall sein wird). Bei der Beobachtung mit einem kleinen Fernrohr beobachtet man außerdem eine deutliche Veränderung der scheinbaren Größe des Planeten und seiner Phasengestalt.

Voraussetzung für solche Beobachtungen ist die Fähigkeit der Schüler, bestimmte Sternbilder unabhängig von ihrer Stellung am Himmel wiederzuerkennen. Gibt man den Schülern von Zeit zu Zeit Tipps für geeignete Beobachtungszeitpunkte und stellt ihnen eine geeignete Sternkarte zur Verfügung, dann können sie Mars abends selbständig verfolgen, wenn sie nicht zu weit von zu Hause einen geeigneten Beobachtungsort gefunden haben – mit nicht zu hohem Horizont und nicht zu viel „Lichtverschmutzung“.

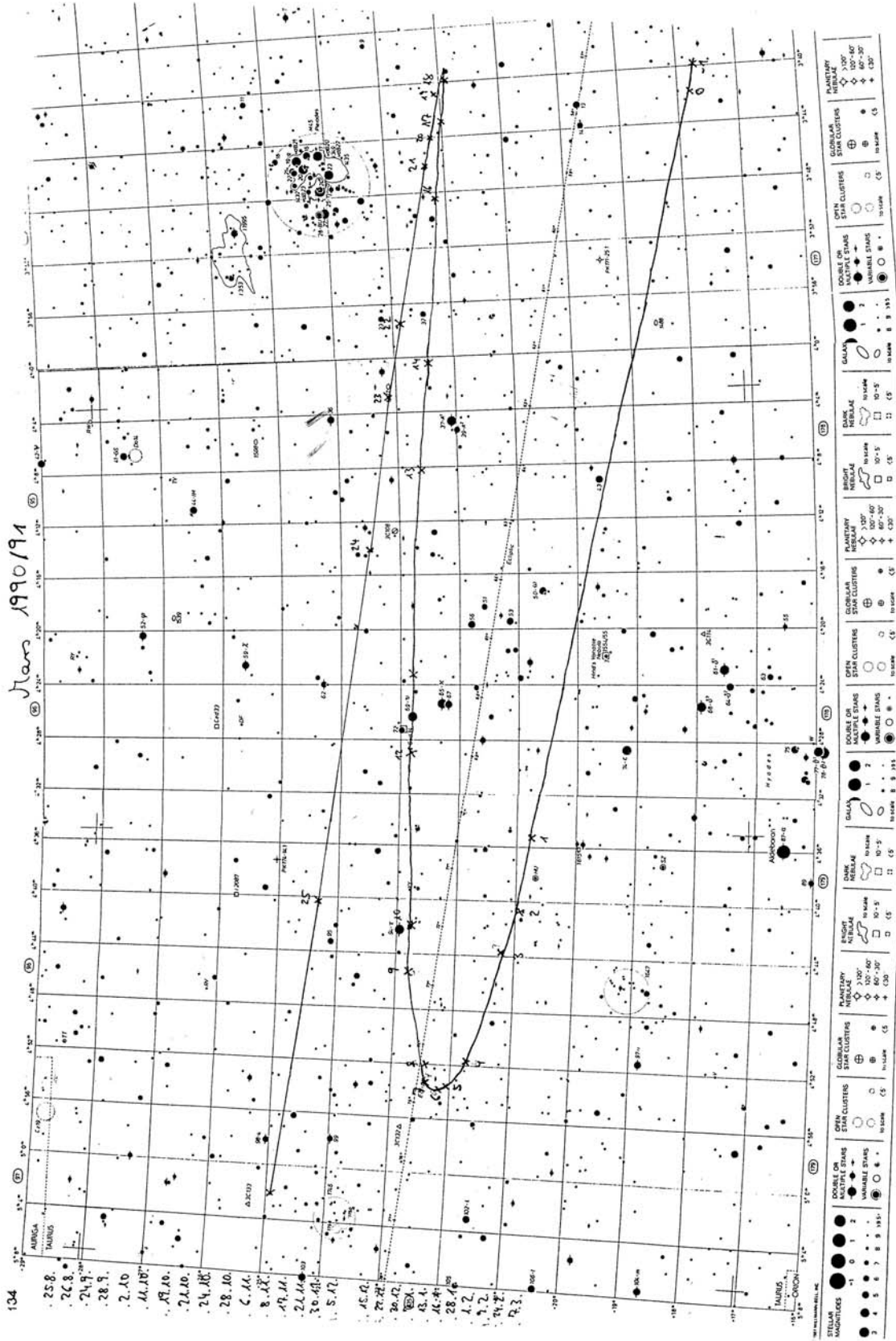


Abb. 1: Marsschleife 1990/91 im Stier, beobachtet mit Studenten mit Feldstecher 15 x 80 und eingetragen in Sternkarte [8].

Sie können dann die beobachteten Planetenpositionen in die Karte eintragen, nachdem sie sich Entfernungs- und Winkelbeziehungen zwischen Mars und den Nachbarsternen eingepägt haben: Mars auf einer Geraden mit zwei Sternen, oder mit ihnen ein gleichseitiges, gleichschenkliges oder rechtwinkliges Dreieck bildend. Es ist erstaunlich, wie oft man solche Konstellationen finden kann.

Abbildung 1 zeigt die Marsschleife, die zusammen mit Studenten im Wintersemester 1990/91 aufgezeichnet wurde. Das Bild gibt allerdings nichts von der Faszination wieder, die die Studenten (und auch der Autor, der zum ersten Mal eine ganze Planetenschleife und nicht nur einzelne Positionen registrierte) bei den Beobachtungen empfunden haben!

3 Interpretation der Beobachtungsdaten

Die Interpretation der Planetenbewegung ist schwierig und hat die Astronomen über Jahrtausende beschäftigt. Trotzdem gerinnt sie im Unterricht meist in dem apodiktischen Merksatz: Die Planetenbahnen sind Ellipsen ... Vielleicht kann man Schülern einen Eindruck der Schwierigkeit vermitteln, indem man die Erklärungen mit Hilfe des antiken und des modernen Weltbildes gegenüberstellt. Dazu kann man z.B. mit mechanischen Modellen wie im Deutschen Museum in München, die man mit einem Metallbaukasten nachbaut (siehe z.B. [1], [7]), Schleifen (oder zumindest Hin- und Herbewegungen) an die Wand des Klassenzimmers projizieren. Diese Modelle können veranschaulichen, wie die Planetenbewegungen im antiken und im modernen Weltbild erklärt werden. Dabei zeigt sich: Geometrisch, d.h. hinsichtlich der Beschreibung der Planetenpositionen, sind geozentrisches und heliozentrischen Weltbild äquivalent!¹

Für die qualitative Erklärung von Planetenschleifen ist die Annahme gleichförmiger Planetenbewegungen auf konzentrischen Kreisen völlig ausreichend. Auf Grund dieser Annahme lassen sich sogar die Radien einiger Bahnen mit befriedigender Genauigkeit bestimmen (siehe z. B. [5] und [1]). Dazu registriert man die Planetenposition zur Zeit der Opposition und einige Zeit davor oder danach während der Rückläufigkeit und bestimmt die Winkeldistanz δ zwischen diesen Positionen (Abb. 2 rechts). Der Bahnradius ergibt sich dann aus

$$r_{Pl} = \frac{\sin(\varepsilon + \delta)}{\sin(\beta + \delta)} AE.$$

Dabei sind ε und β die Zentralwinkel, die von der Verbindung Sonne – Planet zwischen den Zeitpunkten der Messung und der Opposition überstrichen werden. Diese Winkel kann man mit Hilfe der siderischen Umlaufzeiten bestimmen.

Ist der Planet z. Z. der Opposition unbeobachtbar, dann muss eine beliebige zweite Position während der Rückläufigkeit ausgemessen werden. Dann bekommt man den Winkel δ , indem man die Nullstelle der Funktion

$$f(\delta) = \sin(\beta_2 + \delta)\sin(\varepsilon_1 - \eta + \delta) - \sin(\varepsilon_2 + \delta)\sin(\beta_1 - \eta + \delta)$$

numerisch oder grafisch bestimmt. Dabei ist $\eta = \delta_2 - \delta_1$ die aus

$$\cos \eta = \sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cdot \cos \delta_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)$$

(siehe Abb. 2 unten) bestimmbare Winkeldistanz zwischen den beiden Planetenpositionen.

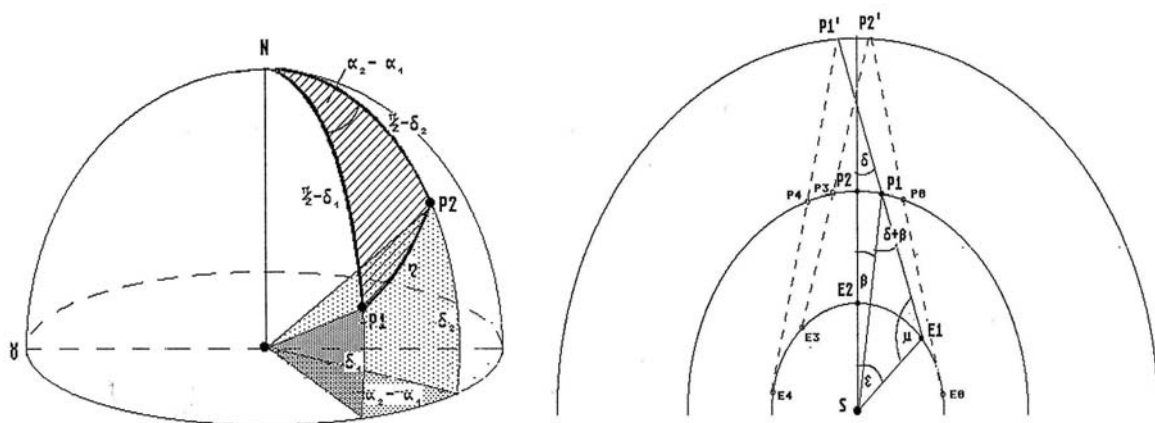


Abb. 2: Zur Bestimmung der Planetenkoordinaten.

¹ Der Übergang zwischen den beiden Weltbildern wird sehr anschaulich von TEICHMANN [7] beschrieben.

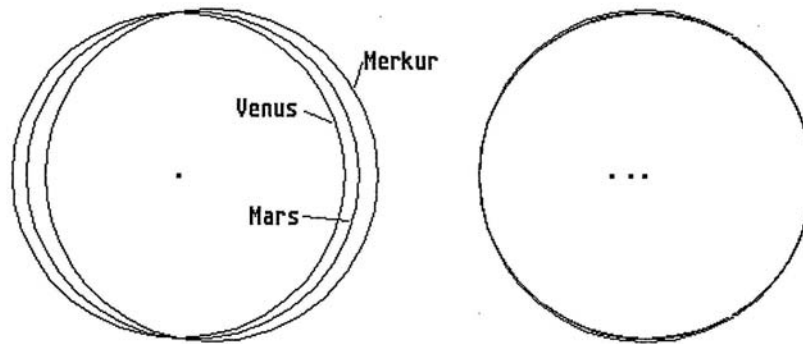


Abb. 3: Die Bahnellipsen von Merkur, Venus und Mars, auf gleiche Größe normiert, bzgl. der Sonne (links) und bzgl. des Mittelpunktes (wobei dann die Sonne an verschiedenen Stellen steht).

Die Notwendigkeit, über exzentrische Kreise oder gar Ellipsen zu sprechen (die Unterschiede zwischen den beiden Kurvenarten sind bei den auftretenden kleinen Exzentrizitäten minimal, s. Abb. 3), ergibt sich erst aus wesentlich höheren Ansprüchen an die Genauigkeit (so ändert sich der Abstand von Mars zur Sonne während seiner Rückläufigkeit 1992/93 nur von 1,57 AE auf 1,64 AE).

Die Bestimmung einer elliptischen Planetenbahn wird man in der Schule in der Regel nicht anstreben können: Die mathematischen Voraussetzungen dafür sind nicht vorhanden. Das war aber zur Zeit KEPLERS nicht anders! KEPLER musste ganz neue geometrische Methoden entwickeln und wesentliche Schritte auf dem Weg zur Infinitesimalrechnung zurücklegen, bevor er seine Gesetze aufstellen konnte². Vielleicht sollte man deshalb, anstatt vorschnell die Keplerschen Gesetze an die Tafel zu schreiben, den Schülern einen Eindruck von den Schwierigkeiten zu vermitteln versuchen, die KEPLER überwinden musste – und seine Zeitgenossen und Nachfahren, bis sie die Bedeutung der Gesetze erkannt hatten!

KEPLERS Kampf mit der Marsbahn wird von KOESTLER [4] eindrucksvoll geschildert (an dessen Darstellung im Kapitel 4/VI ich mich im folgenden anlehne). Dabei zitiert er auch ausführlich aus der „Neuen Astronomie“, von der glücklicherweise seit kurzem wieder eine deutsche Übersetzung erhältlich ist [3]. In diesem Buch stellt KEPLER nicht nur sein fertiges System vor, sondern beschreibt auch ausführlich seine Überlegungen und Irrwege. Er begründet das selbst folgendermaßen:

„...mir kommen die Wege, auf denen die Menschen zur Erkenntnis der himmlischen Dinge gelangen, fast ebenso bewundernswürdig vor wie die Natur dieser Dinge selber. Daher zeige ich diese Wege mit Sorgfalt auf; freilich wird sicher der Leser einigen Überdruß dabei empfinden. Es macht einem jedoch ein Sieg, der mit Gefahr errungen worden ist, mehr Freude, und heller geht die Sonne aus den Wolken hervor“ (Zusammenfassung des 45. Kapitels, [3], S.47).

Ich denke, diese Begründung hat bis heute nichts von ihrer Überzeugungskraft verloren – auch wenn man ihr sicher nur anhand weniger Beispiele wird folgen können.

Zunächst muss KEPLER drei Neuerungen in die Astronomie einführen:

- Bei KOPERNIKUS war nicht die Sonne das Zentrum des Planetensystems, sondern der Mittelpunkt der Erdbahn. Kepler stellt dagegen die Sonne insofern in den Mittelpunkt, als er alle Koordinaten bzgl. der Sonne berechnet. Da er zunächst weiterhin an Kreisbahnen festhält, muss er jedoch einen Mittelpunkt außerhalb der Sonne akzeptieren. Da er aber von einer anziehenden Kraft der Sonne überzeugt ist, nimmt er eine zweite Kraft im Planeten selbst an, die im Widerstreit mit der ersten die exzentrische Bahn bewirkt. Er beschreibt deshalb die exzentrische Kreisbewegung als Bewegung auf einem Epizykel, dessen Mittelpunkt auf einem Kreis mit Mittelpunkt in der Sonne umläuft.
- Er beweist, dass die Marsbahn nicht, wie von KOPERNIKUS angenommen, im Raum oszilliert, sondern dass ihre Ebene durch die Sonne geht und einen festen Winkel mit der Erdbahn bildet.
- Er beseitigt die Voraussetzung einer gleichförmigen Bewegung der Planeten auf ihren Kreisbahnen. Dadurch werden die bei KOPERNIKUS erforderlichen fünf Epizyklen der Marsbahn überflüssig. Allerdings empfindet er danach seine eigene Epizykeldarstellung der exzentrischen Kreisbewegung als wenig überzeugend, weil nun der Epizykel ungleichförmig die Sonne umlaufen muß, obwohl er immer denselben Abstand zur Sonne hat. Außerdem muß auch die Bewegung auf dem Epizykel in derselben Weise ungleichförmig sein:

„Er (der Planet) wüsste also im voraus auswendig, was die fremde, unvernünftige Sonnenkraft (mit dem Epizykelmittelpunkt) auszurichten im Begriff wäre. Das ist alles sinnlos“ ([3], S. 241).

Der erste Versuch, die wesentlichen Parameter der Marsbahn auf Grund dieser Voraussetzungen approximativ zu bestimmen, füllt 900 eng beschriebene Blätter.

² KEPLER beklagt an mehreren Stellen seiner „Neuen Astronomie“ die fehlende Eleganz seiner Beweisführung und formuliert mehrfach Aufforderungen an die „Geometer“ seiner Zeit.

„Wenn du (lieber Leser) dieses mühseligen Verfahrens überdrüssig wirst, so magst du mit Recht Mitleid mit mir empfinden, der ich es mindestens siebzigmal mit sehr großem Zeitverlust durchlaufen habe; du wirst dich auch nicht mehr darüber wundern, dass nun schon das fünfte Jahr verstreicht, seit ich Mars in Angriff genommen habe“ (3, S. 147).

Trotz mathematischer Fehler am Anfang und zum Schluss seiner Rechnung ist ihm ein scheinbarer Erfolg beschieden:

„Du siehst nun, fleißiger Leser, dass die auf dieser Basis aufgebaute Hypothese nicht nur den vier Positionen genügt, auf denen sie ruht, sondern auch innerhalb von zwei Minuten alle anderen Beobachtungen (von Marsoppositionen durch TYCHO BRAHE) wiedergibt.“

Jedoch (auf der nächsten Seite):

„Wer sollte es für möglich halten! Diese Hypothese, die mit den (beobachteten Marsoppositionen) so nahe übereinstimmt, ist doch falsch ..“ ([3], S. 163).

Zwei weitere Beobachtungen TYCHOs fügen sich nämlich nicht ein; sie weichen um bis zu völlig unakzeptablen acht Bogenminuten von den berechneten Positionen ab. Mogelte man sich früher über solche Unstimmigkeiten hinweg, so ist eine solche Nachsicht jetzt nicht mehr möglich.

„Da aber jener Fehler jetzt nicht vernachlässigt werden durfte, so wiesen allein diese 8' den Weg zur Erneuerung der ganzen Astronomie, sie sind der Baustoff für einen großen Teil des Werkes geworden“ ([3], S. 166).

Der Grund dafür liegt insbesondere in KEPLERs Einführung der physikalischen Kausalität in die formale Geometrie des Himmels: Solange die Kosmologie rein geometrischen Spielregeln gehorchte, konnten Unstimmigkeiten durch Einführung zusätzlicher Epizyklen behoben werden. In einem Universum, das von wirklichen, physikalischen Kräften bewegt wird, ist das nicht länger möglich.

„Daher haben wir das Gebäude, das wir aufgrund der tychonischen Beobachtungen errichtet hatten, nachher zufolge anderer Beobachtungen desselben Mannes wieder eingerissen. So musste es uns ergehen, da wir einigen wahrscheinlichen, in Wirklichkeit aber falschen Annahmen (in Nachahmung der früheren Meister) gefolgt waren“ ([3], S. 175).

Der entscheidende Schritt ist schließlich die Beseitigung der kreisförmigen Bewegung. KEPLER unternimmt ihn, nachdem ihm ein letzter Versuch, die Kreisförmigkeit zu retten, misslungen ist:

„Die Sache liegt daher einfach so: Die Planetenbahn ist kein Kreis; sie geht auf beiden Seiten allmählich herein und dann wieder bis zum Umfang des Kreises im Perigäum hinaus. Eine solche Bahnform nennt man ein Oval“ ([3], S. 267).

In der vollkommenen Symmetrie der Sphären und Kreise lag eine tief beruhigende Anziehungskraft – sonst hätte sich die Vorstellung nicht zweitausend Jahre gehalten. Ein Oval dagegen ist eine willkürliche Form. Sie „entstellt den ewigen Traum der Harmonie der Sphären“ ([4], S. 332). Zur Bestimmung der genauen Form einer unbekanntenen Kurve müssen viele ihrer Punkte genau vermessen werden. Voraussetzung dafür ist die genaue Kenntnis der Erdbahn, bei deren Untersuchung sich der ungleichförmige Umlauf der Erde bestätigte und KEPLER schließlich (vor dem ersten) sein zweites Gesetz findet.

Auf der Suche nach der Form seines „Ovals“ verrennt sich Kepler noch einmal gründlich: Er versucht, die Gestalt des Ovals dadurch zu konstruieren, dass er die Bewegung des Planeten auf seinem Epizykel – im Gegensatz zu der des Epizykelmittelpunktes um die Sonne – als gleichförmig annimmt:

„Es passierte mir aber, was man mit dem Sprichwort sagt: Ein eiliger Hund wirft blinde Junge. ... So befestigtesich in mir jener Irrtum, den ich oben ... glücklich zurückzuweisen mich angeschickt hatte, der Irrtum nämlich, es falle der planetarischen Kraft die Aufgabe zu, den Planetenkörper auf einer epizyklischen Bahn herumzuführen. ... Denk darüber nach, lieber Leser, und du wirst die Kraft dieses Argumentes deutlich verspüren; ich konnte mir ja kein anderes Mittel denken, durch das der Planetenbahn eine ovale Form gegeben würde.

Als mich diese Gedanken überfallen hatten, feierte ich, vollkommen unbesorgt darum, um welchen Betrag der Planet auf den Seiten hereingeht und ob die Zahlen stimmen, bereits einen neuen Triumph über den Mars“ ([3], S. 269 f).

Ein Jahr seines Lebens und sechs Kapitel in seinem Buch schlägt sich KEPLER mit seinem „Ei“ herum und findet dabei nicht die Ellipsenform, obwohl sie so dicht am Wege liegt:

„Wie früher ... rufe ich auch jetzt wieder bei dieser Fläche mit der Eiform (oder Gesichtsform, wenn einem das besser gefällt) die Geometer auf und bitte sie dringend um Hilfe.

Wenn unsere Figur eine vollkommene Ellipse wäre, so wäre die Aufgabe von Archimedes gelöst ...“ ([3], S. 277).

Schließlich findet KEPLER durch Zufall eine Beziehung:

„Als ich ... den Schluss ziehen musste, dass die Breite des Mändchens (zwischen der Marsbahn und dem zugehörigen Umkreis) ... gleich 429 (bezogen auf einen Kreisradius von 100000)... ist, machte ich mir sogleich Gedanken über die Ursache und die Art, wie ein sichelförmiger Abschnitt von dieser Breite entsteht.

Als mich dieser Gedanke umtrieb, als ich immer wieder erwog, dass ... mein Triumph über den Mars eitel gewesen ist, verfiel ich ganz von ungefähr auf die Sekante (den Sekans) des Winkels $5^{\circ}18'$, der das Maß für die größte optische Gleichung (d.i. der Winkel, unter dem der Abstand Sonne-Exzentermittelpunkt vom Planeten aus erscheint) ist. Als ich merkte, dass diese gleich 100429 (1,00429) ist, war mir, als würde ich aus dem Schlaf geweckt...“ ([3], S. 325).

Er erkennt die gefundene Beziehung³ aber zunächst nicht als Ellipsengleichung und versucht mit ihrer Hilfe, die Bahn punktweise zu konstruieren – wobei ihm noch einmal ein Fehler unterläuft und ihm die Bahn zu „pausbackig“ gerät. Zu guter Letzt aber erkennt er, dass die konstruierte Bahn Ellipsenform bekommt:

„Wozu soll ich viele Worte machen? Die Wahrheit der Natur, die verstoßen und verjagt worden war, kam heimlich zur Hintertür wieder herein und wurde unter fremdem Gewand von mir aufgenommen. Ich ... ging wieder auf die Ellipsen zurück, in der Meinung, hierbei eine (ganz andere) Hypothese anzuwenden, während doch beide ... völlig zusammenfallen. ... Weitans am meisten aber trieb es mich um, dass ich, obgleich ich fast bis zum Verrückwerden nachdachte und umschaute,

Erscheinung	Datum	Mars	Sonne	Helligkeit
erstes Erscheinen im Frühaufgang	ca. 15.05.1992	MA 3.00 Uhr	SA 4.30 Uhr	1.2 mag
Beginn der Rückläufigkeit	29.11.1992	MA 19.34 Uhr	SU 16.20 Uhr	-0.6 mag
Oppositi	07.01.1993	MA 16.00 Uhr	SU 16.30 Uhr	-1.3 mag
(ca. letzter sichtb. Abendaufgang)	17.02.1993	MA 12.30 Uhr	SU 17.50 Uhr	-0.3 mag
Ende der Rückläufigkeit letzte Abendsichtbarkeit	ca. 01.08.1993	MU 21.40 Uhr	SU 20.20 Uhr	1,8 mag

Tab. 1 Marserscheinungen 1992/93

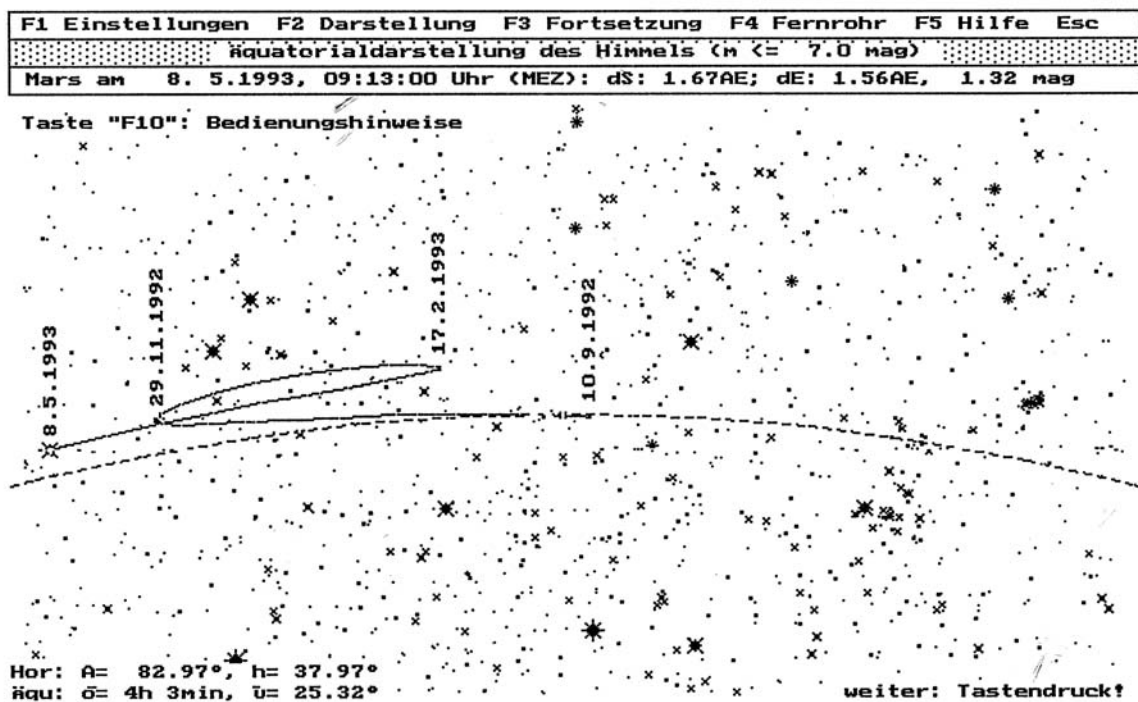


Abb. 4: Marsschleife 1992/93 in den Zwillingen (erstellt mit [2]).

nicht ausfindig machen konnte, warum der Planet ...lieber den elliptischen Weg geht.... O ich närrischer Kauz!“ ([3], S. 344 f.).

³ Diese Beziehung kann man auch so ausdrücken: Im oberen Scheitelpunkt der Bahn, wenn also für die exzentrische Anomalie $E=90^\circ$ gilt, ist der Abstand r zwischen Planet und Sonne nicht $a\sqrt{1+e^2}$, wie es bei einer exzentrischen Kreisbewegung mit Radius a sein müsste, sondern es gilt $r=a$. Den Sekans der optischen Gleichung im Auge behaltend verallgemeinert KEPLER diese Beziehung zu einer Konstruktionsvorschrift, die auf $r=a(1+ecosE)$ hinausläuft.

Keplers Gesetze gehören nicht zu denen, die uns im Rückblick selbstverständlich erscheinen. Sie machen eher den Eindruck von „Konstruktionen“ als „Entdeckungen“. Tatsächlich bekamen sie ja erst im Lichte der Mechanik NEWTONs einen Sinn. KEPLER konnte keine logische Begründung sehen, warum die Bahn elliptisch statt z.B. eiförmig sein sollte. Deshalb erwiesen sich auch seine Zeitgenossen, einschließlich GALILEIs, als unfähig, die Bedeutung der Gesetze zu erkennen. Die Keplerschen Entdeckungen waren nicht von der Art derer, die „in der Luft liegen“ und häufig mehrmals fast gleichzeitig, aber unabhängig gemacht werden. Sie waren vielmehr außerordentliche Leistungen eines Einzelnen.

Deswegen ist der Weg, auf dem sie gefunden wurden, von besonderem Interesse und geeignet, Schülern eine Ahnung von den Schwierigkeiten zu vermitteln, die dabei überwunden werden mussten. KEPLER selbst schließt seinen Nachweis, dass die Marsbahn eine Ellipse ist, mit den Worten:

„Wenn jemand meint, die vorstehende Untersuchung sei deshalb schwer verständlich, weil meine Denkweise verworren ist, so gestehe ich eine Schuld meinerseits insofern ein, als ich diese Dinge nicht unberührt lassen wollte, obgleich sie schwer verständlich ... sind. Im übrigen möchte ich den Betreffenden, was den Stoff anlangt, bitten, er möge die Kegelausschnitte des Apollonius lesen. Da wird er sehen, daß es Stoffe gibt, die durch keine noch so glückliche Denkweise so dargeboten werden können, daß man sie beim flüchtigen Lesen versteht. Man muß viel nachdenken und das Gesagte immer und immer wiederholen“ ([3], S. 353).

4 Anregungen zur Beobachtung der Marsbewegung 1992/93

Ende des Jahres 1992 setzt Mars wieder zu einer schönen Schleifenbewegung an, für deren Beobachtung zum Schluss einige Hinweise gegeben werden sollen: Die Tabelle enthält die wichtigsten Daten. Dabei sind die Stationen der Marsbewegung ausgewählt, die bereits seit dem Altertum regelmäßig für die äußeren Planeten vorausberechnet und tabelliert wurden:

- *Frühaufgang*: Der Planet befindet sich erstmalig so weit westlich der Sonne, dass sein Aufgang zu beobachten ist, bevor er in der Morgendämmerung verblasst.
- *Beginn der Rückläufigkeit*: Die Erde setzt zum Überholen des Planeten an. Dadurch beginnt der Planet, sich scheinbar „rückwärts“, d.h. relativ zum Fixsternhimmel von Ost nach West, zu bewegen.
- *Abendaufgang*: Durch die Relativbewegung von Planet und Sonne am Himmel geht der Planet immer früher auf. Dieser Zeitpunkt steht für den letzten am Abend sichtbaren Planetenaufgang. Er stimmt etwa mit dem Zeitpunkt der Opposition des Planeten überein, zu dem der Planet der Sonne gerade gegenübersteht.
- *Ende der Rückläufigkeit*
- *Ende der Abendsichtbarkeit*: Die Sonne kommt dem Planeten (von Westen her) so nahe, dass der Planet untergeht, bevor es dunkel genug geworden ist, um ihn zu entdecken.

Der erste Frühaufgang des Planeten und seine letzte Abendsichtbarkeit sind heute kaum noch zu beobachten. Die beiden Termine stecken aber doch grob den zeitlichen Rahmen ab, innerhalb dessen mit Aussicht auf Erfolg nach dem Planeten gesucht werden kann.

Abbildung 4 zeigt die Bahn des Mars durch die Sternbilder „Stier“ und „Zwillinge“. Durch die unmittelbare Nähe heller Sterne, insbesondere Castor und Pollux, wird die Bahn auch mit bloßen Augen leicht zu verfolgen sein.

Auch die Marsschleife 1995 im Sternbild „Löwe“ wird gut zu beobachten sein.

Literatur

- [1] U. BACKHAUS: Bestimmung der Radien von Planetenbahnen mit Fernglas und Sternkarte. – Praxis der Naturwissenschaften/Physik 39/5 (1990) 10.
- [2] U. BACKHAUS: Planetarium – Ein Programm zur Simulation der Vorgänge am Sternenhimmel. – Frankfurt: Diesterweg 1992.
- [3] J. KEPLER: Neue Astronomie, übersetzt und eingeleitet von MAX CASPAR, 1. unveränderter Nachdruck der Ausgabe von 1929. – München: Oldenbourg 1990.
- [4] A. KOESTLER: Die Nachtwandler – Die Entstehungsgeschichte unserer Welterkenntnis. – Frankfurt: Suhrkamp 1980.
- [5] W. SCHLOSSER: Astronomische Musterversuche. – Frankfurt: Hirschgraben 1983.
- [6] Lehrplan Astronomie (Grundkurs) in Bayern. – In: Staatsinstitut für Schulpädagogik und Bildungsforschung (Hg.): Handreichungen für den Physikunterricht im Gymnasium/Kollegstufe: Grundkurs Astronomie. – Donauwörth: Ludwig Auer 1988.
- [7] J. TEICHMANN: Wandel des Weltbildes. – Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft 1983.
- [8] W. TIRION – B. RAPPAPORT – G. LOVI: Uranometria 2000.0 Vol. I (The Northern Hemisphere) und Vol. II (The Southern Hemisphere). – Richmond: Willman-Bell 1987 und 1988.
- [9] M. WAGENSCHNEIDER: Die Erfahrung des Erdballs. – Der Physikunterricht 1 (1967) 1.