

# Von der Beobachtung astronomischer Phänomene zu eigenen Messungen

U. Backhaus, Universität Koblenz

*Alle Lehrpläne und Reformen scheinen bis jetzt nicht daran zu zweifeln, daß es in diesem Alter (8 Jahre) höchste Zeit ist, aus dem Kind einen Schein-Kopernikaner zu machen. ... **Hohe Zeit, nicht mehr für wahr zu halten, was man sieht, sondern zu glauben, was der Lehrer sagt.** ... Ein Kopfnicker ist noch kein Kopernikaner. (Wagenschein (1973: Kinder und der Mond ([18], S. 277))*

## 1 Einleitung

Die Situation, die *Wagenschein* vor 25 Jahren beschrieben hat, hat sich bis heute nicht gebessert, sie hat sich sogar eher verschärft: Der Übergang von der geozentrischen zur heliozentrischen Sichtweise wird kaum noch als Problem wahrgenommen. Entsprechend gibt es nur wenig Hilfestellungen, die diesen Wechsel der Perspektive erleichtern. Das führt zu einem *Mißverhältnis zwischen Gewußtem und Erfahrenem* – ja mehr noch, zu einer weitgehenden Unabhängigkeit dieser beiden Bereiche voneinander. Diese Diskrepanz, die in allen Bereichen der Naturwissenschaften zu beobachten ist, wird heute eher größer als kleiner – man denke nur an Bereiche wie Astrophysik und Kosmologie.

Dieser Sachverhalt soll kurz am Beispiel der Phasengestalten des Mondes erläutert werden.

Bei Umfragen zeigt sich immer wieder, daß Befragte jeden Alters und unterschiedlichster Bildung (sogar unabhängig vom Umfang des erfahrenen Astronomieunterrichts! ([10]), sich die Phasengestalten des Mondes dadurch erklären, daß der Schatten der Erde auf den Mond falle.

Ist diese Erklärung beim Sichelmond im allerersten Moment vielleicht noch einleuchtend, so erstaunt sie hinsichtlich des Halbmondes (müßte dafür doch die Erde eine Scheibe sein!) und noch mehr beim fast vollen Mond (Hohlerde!). Um noch einmal mit *Wagenschein* ([19], S. 62) zu sprechen:

*Nicht die Unkenntnis als solche ist es, die hier bestürzt. Anständige Unkenntnisse, ehrliche, von schwierigen Dingen, gehören zur Bildung. Aber hier ist die Wahrheit leicht zu sehen; und noch leichter wäre zu bemerken, daß es der Erdschatten unmöglich sein kann, der den Mond aushöhlt.*

Dabei sind die Mondphasen ein gängiges Thema des Optik-Unterrichts in Schule und Hochschule! Offensichtlich erreicht das übliche Diagramm zur Erklärung der Mondphasen „von außen“ (siehe z.B. [7], S. 10) die Lernenden nicht:

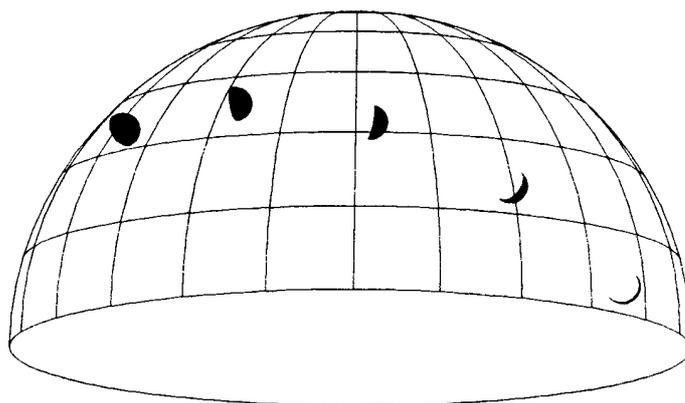
- Es erfordert nämlich einen abstrakten Prozeß des Standortwechsels: Wir müssen uns in Gedanken auf die Erdoberfläche zurückversetzen und uns vorstellen, wie

von dort die beleuchtete Hälfte des Mondes zu sehen wäre. Und wir müssen uns vorstellen, wie Sonne und Mond über den Himmel wandern, wenn die Erde sich um ihre eigene Achse dreht – und wir mit ihr!

- Und selbst wenn uns das gelingt, erklärt uns das Diagramm Phänomene, die die meisten von uns noch nicht wahrgenommen haben, z.B. daß der junge zunehmende Mond nur am frühen Abend zu sehen ist, der abnehmende Halbmond aber bereits mittags untergeht und warum der Vollmond im Sommer so viel niedriger steht als im Winter.

Es ist nicht damit getan, im Klassenraum eine Kugel halbseitig zu beleuchten. Zwar machen diese und weitere weitere Demonstrationen von Analogien (Ball in der Sonne zeigt dieselbe Gestalt wie der darüberstehende Mond ([3], S. 7), Mohnkapseln in der Sonne („Halbmohn“<sup>1</sup>) plausibel, daß die Mondphasen so zustande kommen könnten. Es könnte aber auch anders sein: Eine sich drehende, nur halbseitig (selbst-) leuchtende Kugel würde dieselben Gestalten zeigen! Eine naturwissenschaftliche Erklärung wird erst daraus, wenn die Aussagen gut zu anderen beobachtbaren Phänomenen passen – insbesondere also zu den sich mit der Phasengestalt ändernden Auf- und Untergangszeiten des Mondes.

In geozentrischer Sichtweise stellen sich die Phänomene wie in der folgenden Abbildung angedeutet<sup>2</sup> dar:



Wenn man, beginnend kurz nach Neumond, jeden zweiten Abend kurz nach Sonnenuntergang zum Himmel sieht, dann wandert der Mond in zwei Wochen von tief im Westen über hoch im Süden nach tief im Osten. Simultan dazu ändert sich die Phasengestalt vom Sichelmond über den Halbmond zum Vollmond.

Wenn man bei dieser Wanderung des Mondes die gerade untergegangene Sonne mit in den Blick nimmt (eine Idee, auf die Lernende von allein kaum kommen können!), dann erkennt man allmählich, „wie der Mond als eine dunkle Kugel im Licht der Sonne hängt, und zwar einer sehr weit schräg *hinter* dem Mond schwebenden riesigen Sonne. – Das ist ein großer Augenblick: Die Himmelskuppel löst sich im Raum auf.“ (Wagenschein: Verdunkelndes Wissen?, [19], S. 63)

Anhand dieses Beispiels lassen sich unschwer vier Ursachen für die große Diskrepanz zwischen Gewußtem und Erfahrenem ausmachen:

<sup>1</sup>Diese Idee und entsprechende Dias stammen von J. Lichtenberger.

<sup>2</sup>Ein solches „geozentrisches“ Diagramm gibt es in fast keinem Schulbuch (siehe jedoch [2], S. 9)!

1. Verstädterung, moderne Medien und ähnliche Veränderungen der Lebenswelt haben zu einer *Entfremdung des Menschen von der Natur* geführt. Hinsichtlich unmittelbarer astronomischer Erfahrungen kommt die zunehmende „Lichtverschmutzung“ unserer Umwelt hinzu.
2. Die dadurch hervorgerufene *mangelnde Kenntnis der Phänomene* hat zur Folge, daß Modelle und Theorien Erklärungen für Vorgänge liefern, die nicht „gegenwärtig“ sind, die also noch nicht beobachtet worden sind und deren Charakteristika unbekannt, vielleicht sogar unvorstellbar sind.
3. Ein *voreiliger Übergang von der geozentrischen zur heliozentrischen Beschreibung* überfordert das Abstraktionsvermögen der Lernenden und vergrößert den Abstand zwischen Beobachtung und Erklärung.
4. *Astronomische Zahlenangaben* überschreiten das menschliche Vorstellungsvermögen bei weitem. Wenn die zugehörigen Probleme und Meßverfahren überhaupt thematisiert werden, dann ist ihre Darstellung oft so grob vereinfachend, daß man sie auch als falsch bezeichnen könnte.

Es ist hier nicht der Platz für eine gründliche Diskussion des Verhältnisses zwischen geozentrischer und heliozentrischer Betrachtungsweise. Deshalb soll sich hier auf den letzten Punkt konzentriert werden und am Beispiel eigener Meßversuche zur Bestimmung der Größe des Weltalls aufgezeigt werden, inwieweit astronomische Entfernungsmessungen exemplarisch sein können für die astronomische Erkenntnisgewinnung, dafür also (um mit Wagenschein zu sprechen), „wie man so etwas wissen kann“, was es also „heißt, Astronomie und Physik zu betreiben“. Dabei bewährt sich die heliozentrische Sichtweise insofern, als es erst durch sie möglich wird, aus den Beobachtungen quantitative Aussagen über Entfernungen abzuleiten.

## 2 Von der Beobachtung zur Messung

Erst auf einer durch Beobachtung gewonnenen empirischen Basis kann Theoriebildung aufbauen. Hinsichtlich der Astronomie gehören dazu insbesondere folgende Erfahrungen:

1. die tägliche Drehung des Sternenhimmels und seine Veränderung im Laufe des Jahres und als Voraussetzung dieser Erfahrung die Kenntnis einiger Sternbilder,
2. die tägliche Sonnenbewegung, ihr Zusammenhang mit den Himmelsrichtungen und ihre jährliche Variation,
3. die jährliche Veränderung der täglichen Sonnenbewegung über den Tageshimmel, ihr Zusammenhang mit den Jahreszeiten und mit der Veränderung des nächtlichen Sternenhimmels,
4. die Veränderung des Himmels als Reaktion auf eigene Ortsveränderung: eine Verkippung des gesamten Himmels bei Reisen in N-S-Richtung, eine Veränderung der Zeit bei Reisen von Ost nach West,

5. die Bewegung des Mondes und seine Phasengestalten,
6. die großen Planeten, ihre Helligkeitsänderungen und Bewegungen.

Alle diese Phänomene sind einfach zu beobachten – man muß nur *hinsehen*! Allerdings erfordert ihre Verfolgung einen langen Atem, der heute anscheinend weniger denn je zur Verfügung steht!

Aus diesen Beobachtungen können im Laufe der Zeit vielfältige Folgerungen gezogen werden:

1. Die Mondphasen hängen mit den Sichtbarkeitszeiten und damit mit der Stellung zwischen Mond, Sonne und Beobachter zusammen.
2. Die jährliche Veränderung des Sternenhimmels entspricht seiner täglichen Drehung und diese der durch eigene Reisen auf der Erde in W-O-Richtung hervorgerufenen Änderung.
3. Die Erde ist eine Kugel.
4. Die Mondphasen eröffnen einen ersten Blick in die Tiefe des Raumes: Ist der Mond schon sehr weit weg, so ist die Sonne noch *viel* weiter entfernt!
5. Die Planeten werden in regelmäßigen Abständen rückläufig. In dieser Zeit werden sie besonders hell. Ihre Bewegungsschleife ist umso größer, je schneller sie sich bewegen.
6. Beobachten lassen sich nur Relativbewegungen: Dreht sich der Himmel, oder dreht sich die Erde? Bewegen sich die Planeten, oder bewegt sich die Erde – oder beide?

Erst diese qualitativen Beobachtungen und die darauf aufbauenden Überlegungen führen zu dem Wunsch nach theoretischer Zusammenfassung und Modellierung und zu der Frage nach astronomischen Größenordnungen; denn diese bilden die Grundlage für unsere Vorstellungen über den Aufbau des Sonnensystems und der Welt. Meist werden astronomische Entfernungen lediglich mitgeteilt. Dabei bieten sich viele Möglichkeiten für eigene Messungen, die es ermöglichen, ein Gefühl für astronomische Entfernungen zu entwickeln.

Das soll am Beispiel eigener Meßversuche zur Bestimmung der Größe des Weltalls exemplarisch erläutert werden.

## 3 Beispiel: Die Größe des Sonnensystems

### 3.1 Die Entfernung des Mondes

Es gibt kein auf der Hand liegendes Phänomen, das einen Hinweis auf die (endliche) Entfernung des Mondes hindeutet. Zunächst gibt es nicht einmal Hinweise auf unterschiedliche Entfernungen an der Himmelskugel: Alle Objekte am Himmelszelt scheinen unendlich weit weg zu sein. Erst wenn man bei genauerem und längerem

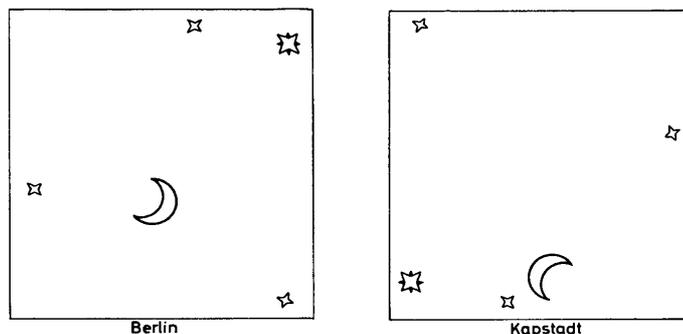
Hinsehen Relativbewegungen bemerkt, kann man deren unterschiedliche Geschwindigkeit als Anzeichen unterschiedlicher Nähe interpretieren. Insbesondere aber sind es die Mondphasen, die einen ersten Einblick in die Tiefe des Raumes eröffnen.

Wichtigster Hinweis auf eine endliche Distanz ist die sogenannte Parallaxe, ein Effekt der allen vom Auto- oder Bahnfahren bekannt ist: Alle Gegenstände der Umgebung scheinen sich, als Reaktion auf die eigene Bewegung, „nach hinten“ zu bewegen – und zwar umso schneller, je näher sie sind.

Aber selbst der Mond, das schnellste (und damit vermutlich nächste) Objekt am Himmel, bewegt sich perfekt mit, besser jedenfalls als alle Gegenstände auf der Erde. Bewegen wir uns vielleicht nicht schnell und nicht weit genug?

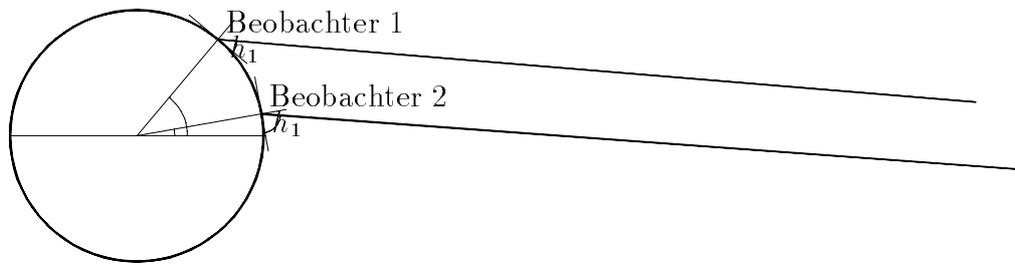
Ist auf diese Weise die Frage nach der Mondentfernung entstanden, ergeben sich mehrere Meßmöglichkeiten:

1. Tatsächlich kann man eine *Parallaxe* am Mond direkt beobachten, wenn man den Mond von der Nord- und der Südhalbkugel der Erde aus gleichzeitig anpeilt:
  - Bereits *Wagenschein* ([20]) hat eindrucksvoll dargestellt, was man sähe, wenn man den Mond von Südafrika und Europa gleichzeitig fotografierte.



Mir sind solche *Fotos* leider nicht bekannt, aber wir versuchen gerade in Koblenz via Internet Kontakte nach Südafrika zu knüpfen, um entsprechende Aufnahmen zu versuchen. Tests haben aber bereits gezeigt, daß neben Koordinationsproblemen auch aufnahmetechnische Schwierigkeiten zu überwinden sind: Wenn man den Mond richtig belichtet, sind meist keine Sterne auf dem Foto zu erkennen, bei längerer Belichtung läßt sich dagegen die Mondposition nicht mehr gut bestimmen.

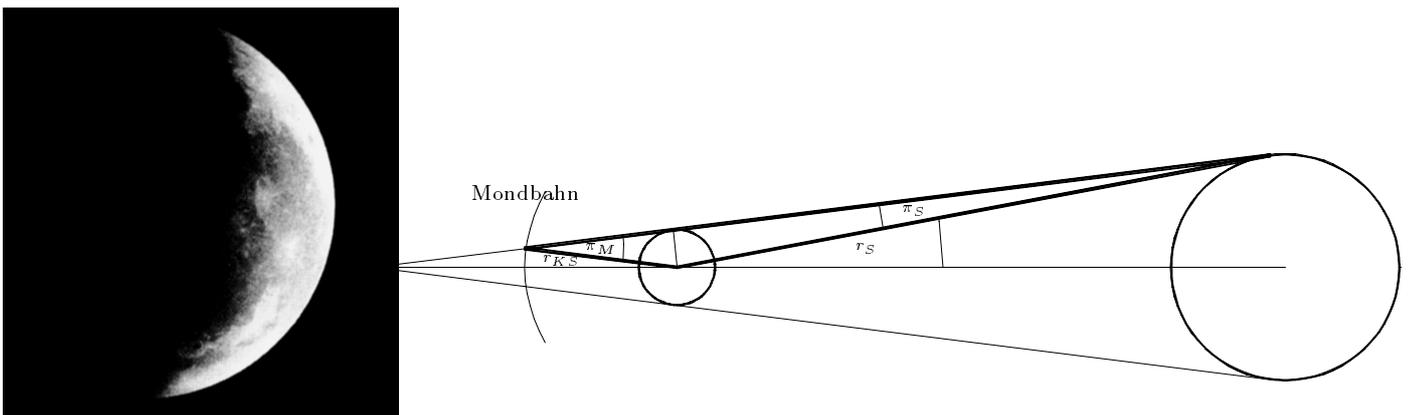
- Eine Alternative bilden simultane *Messungen der Mondhöhe* über dem Horizont mit möglichst einfachen Mitteln (z.B. Pendelquadranten).



Da der Parallaxenwinkel aber kleiner als  $2^\circ$  ist, muß dabei auf maximale Genauigkeit geachtet werden.

2. Eine zweite Möglichkeit zur Bestimmung der Mondentfernung bietet die Beobachtung einer *Mondfinsternis*: Dabei ist es nun wirklich der Schatten der Erde, der den Vollmond verdunkelt – und er zeigt überzeugend die Kugelgestalt der Erde. Der Schatten erweist sich beim Ausmessen von Finsternisfotos als etwa 3-mal so groß wie der Mond.

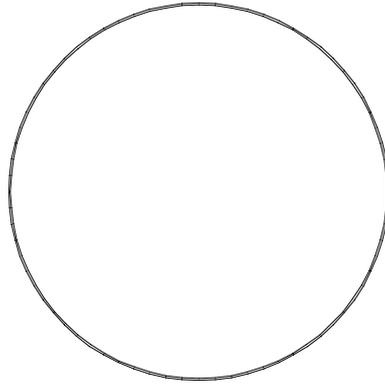
Nimmt man vereinfachend an, der Kernschatten sei ebenso groß wie die Erde, dann ist der Mond etwa nur ein Drittel mal so groß wie die Erde. Tatsächlich aber ist der Kernschatten kleiner als die Erde. Die Erde ist deshalb sogar 4-mal so groß wie der Mond!



Damit läßt sich aus der scheinbaren Größe von Mond ( $r_M$ ) und Kernschatten ( $r_{KS}$ ) seine Entfernung ableiten ( $\pi_M$  und  $\pi_S$  sind die Parallaxen von Mond und Sonne):

$$r_{KS} + r_M = \pi_M + \pi_S \approx \pi_M \quad \implies \quad \pi_M = r_M \left(1 + \frac{r_{KS}}{r_M}\right) \approx 4r_M$$

3. Eine dritte Meßmöglichkeit eröffnet vielleicht die tägliche *Größenveränderung* des Mondes: Im Gegensatz zu der allseits bekannten Täuschung, der aufgehende Mond sei größer als der hochstehende, ist letzterer dem Beobachter näher – und muß damit größer aussehen! Die Größenveränderung ist zwar klein (weniger als ein Sechzigstel!),



aber z.Z. versuchen wir gerade, sie mit Fotos nachzuweisen, nachdem ein erster Versuch von D. Vornholz<sup>3</sup> fehlgeschlagen ist.

Das Ergebnis aller dieser Meßversuche lautet: *Die Entfernung des Mondes beträgt etwa 60 Erdradien*. Allerdings haben wir dieses Ergebnis bisher nur durch Auswertung von Finsternisfotos selbst erhalten.

### 3.2 Größe und Gestalt der Erde

Die eben gemachte Aussage über die Entfernung des Mondes setzt voraus, daß die Erde eine Kugel ist, und legt die Frage nach ihrer Größe nahe.

Die Kugelgestalt der Erde wird heute anscheinend kaum noch hinterfragt, obwohl die wenigsten Lernenden (neben den bekannten Weltraumfotos) die *von der Erde aus zu beobachtenden Phänomene* kennen, die Hinweise auf diesen Umstand liefern<sup>4</sup>:

- Bei Mondfinsternissen dient der Mond als Projektionsfläche für den kreisförmigen Schatten der Erde (s.o.).
- Durch eigene Beobachtungen mit bloßen Augen kann man sich zumindest von der Krümmung der Erdoberfläche überzeugen (z.B. durch Beobachtung zweier Sonnenuntergänge am selben Tag aus verschiedenen Höhen oder von Schiffen am Horizont):
- Bei Weltreisen kippt der ganze Himmel *gleichmäßig*; am Südhimmel stehen die aus Europa vertrauten Sternbilder kopf (z.B. Orion).

Alle diese Phänomene bieten Ansatzpunkte für Messungen der Erdgröße:

- Die Veränderung der Polarsternhöhe kann nach einer Reise in Nord-Süd-Richtung z.B. mit einem Pendelquadranten gemessen werden.
- Ebenso verändert sich die Kulminationshöhe der Sonne: Manchmal kann man das bereits mit einem Bleistift als Schattenstab bemerken. Allerdings steckt der Teufel im Detail, wenn man nicht sehr weit reisen (und die zurückgelegte Entfernung selbst messen) möchte und der Effekt entsprechend klein ist.

Beispiele für selbst erzielte Ergebnisse:

---

<sup>3</sup>persönliche Mitteilung: Die Unschärfe der Fotos ist größer als der zu erwartende Effekt.

<sup>4</sup>*Wagenschein* hat auch dazu einen wunderbaren Aufsatz geschrieben ([21])!



5mal so groß wie der Erdbahnradius. Allerdings ergeben sich dabei alle Planetenbahnradien als Vielfache des Erdbahnradius. Das heißt aber: *Es fehlt der Maßstab!*

Diesen Maßstab aber bildet die Entfernung zwischen Erde und Sonne: die *Astronomische Einheit*. Wie groß ist sie in Kilometern?

## 3.4 Die Entfernung der Sonne

### 3.4.1 Aristarchs Idee

Die Sonne ist zu weit entfernt und zu hell für direkte Parallaxenmessungen. War bereits die Parallaxenbestimmung am Mond schwierig, erfordert sie doch eine Winkelmessung in einem Dreieck mit einem Seitenverhältnis von 1:60, so wäre für eine Parallaxenmessung an der Sonne eine Winkelmessung in einem Dreieck erforderlich, dessen Seitenlängen sich wie 1:24000 verhalten!

---

Seitenverhältnis 1 : (60\*400)

---

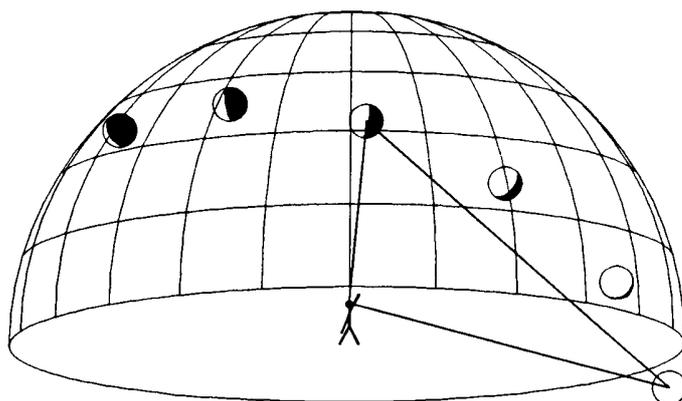
Seitenverhältnis 1 : 400

---

Seitenverhältnis 1 : 60

---

Aristarch hatte bereits vor 2000 Jahren die Idee, die Sonnenentfernung nicht direkt, sondern durch Vergleich mit der Entfernung des Mondes zu bestimmen. Seine geniale Idee bestand darin, die Konstellation von Mond und Sonne durch sich selbst zu ergänzen und auf das dadurch entstehende himmlische Dreieck die auf der Erde entwickelte Geometrie anzuwenden. Dadurch vergrößert sich das Seitenverhältnis des auszumessenden Dreiecks auf etwa 1:400.



Den Winkel beim Mond sieht man dem Mond selbst an – besonders einfach bei Halbmond: Dann beträgt er genau  $90^\circ$ ). Der eigene Winkel muß dann kleiner als  $90^\circ$  sein, und je größer er ist, desto weiter muß die Sonne entfernt sein. *Bereits mit bloßen Augen kann man erkennen, daß dieser Winkel in der Nähe von  $90^\circ$  liegt!*

So einfach die Idee ist, so schwierig ist ihre Umsetzung: Eigene Versuche ([16]) zeigten, daß mit einem Sextanten die Winkeldistanz zwischen Sonne und Mond sehr genau gemessen werden kann, daß aber der richtige Zeitpunkt nicht gut genug (nötig wäre eine Genauigkeit von etwa zehn Minuten!) bestimmt werden kann: Da sich die Halbmondzeitpunkte für verschiedene Orte auf der Erde um bis zu vier Stunden unterscheiden, ist die in astronomischen Kalendern (für den Erdmittelpunkt!) angegebene Uhrzeit zu ungenau. Man muß deshalb den Halbmondzeitpunkt für den eigenen Standort *selbst berechnen*. Dann ergibt sich zwar aus den Meßergebnissen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Erwartung und Messung. Es zeigt sich aber: In die Berechnung des Zeitpunktes fließt die Sonnenentfernung mit ein.

Weil der Mond keine perfekte Kugel, sondern mit Kratern übersät ist, kann auch der Phasenwinkel, selbst mit einem Fernrohr, aus dem Verlauf der Schattengrenze auf der Monsoberfläche nicht genügend genau abgeleitet werden<sup>5</sup>.

Es sprechen also viele Argumente dafür, daß Aristarch den von ihm angegebenen Wert nicht wirklich gemessen hat, sondern den Wert angegeben hat, den er maximal für möglich hielt.

Für die tatsächliche Messung der Sonnenentfernung sind also andere Methoden erforderlich<sup>6</sup>:

Eine Möglichkeit, größere und damit leichter zu messende Winkel zu erhalten, besteht darin, im Sonnensystem eine Entfernung zu messen, die kleiner als die zur Sonne ist<sup>7</sup>. Kennt man nämlich den absoluten Abstand zweier die Sonne umkreisenden Himmelskörper zu einem einzigen Augenblick, dann kann man diesen, z.B. mit Hilfe des 3. Keplerschen Gesetzes, auf die Entfernung zur Sonne hochrechnen.

Ein weiterer Ausweg eröffnet sich durch die Heranziehung physikalischer Gesetzmäßigkeiten, die es ermöglichen, aus den Zahlenwerten anderer physikalischer Größen den Abstand zwischen Erde und Sonne zu berechnen: So kann aus der *Messung von Lichtlaufzeiteffekten* bei bekannter Lichtgeschwindigkeit die zugehörige Entfernung berechnet werden. Die Beobachtung von Jupitermond-Verfinsterungen und die Messung der Lichtaberration sind Beispiele dafür. Schließlich erlaubt der *Doppler-Effekt* (z.B. die jährliche Verschiebung von Sternspektren) bei bekannter Lichtgeschwindigkeit die Bahngeschwindigkeit der Erde und daraus ihren Bahnradius zu berechnen.

Von diesen Verfahren bieten sich die Methoden der Jupitermondverfinsterungen und der Kleinplanetenparallaxen für eigene Meßversuche an.

### 3.4.2 Meßverfahren nach Römer

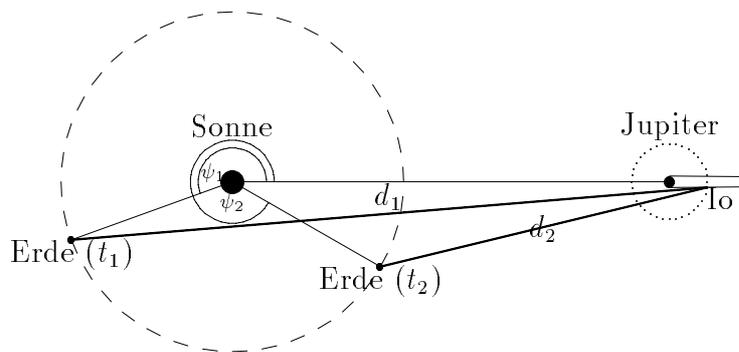
Kehrt man das erste Verfahren zum Nachweis der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes um ([14]), dann kann man aus den Meßergebnissen mit Hilfe der bekannten Lichtgeschwindigkeit den heute viel schwieriger zu messenden Wert der Astronomischen Einheit ableiten:

---

<sup>5</sup>Zur Zeit laufen in Koblenz Untersuchungen, mit welcher Genauigkeit aus digitalisierten Mondfotos mit Hilfe von Bildbearbeitungsprogrammen das Verhältnis zwischen beleuchteter und unbeleuchteter Fläche bestimmt und daraus der Phasenwinkel berechnet werden kann.

<sup>6</sup>Eine ausführlichere Darstellung mit umfangreicher Literatur befindet sich in [5]

<sup>7</sup>Mars ist zum Zeitpunkt seiner Opposition nur halb so weit entfernt wie die Sonne. Die geringste Entfernung zwischen Venus und Erde beträgt nur etwa ein Viertel der Sonnenentfernung. Und manche Kleinplaneten kommen der Erde in Opposition noch viel näher als Mars und Venus.



Der Jupitermond Io hat eine (synodische Umlaufzeit  $T_{Io}$ ). Zwischen  $t_1$  und  $t_2$  haben  $n$  Io-Umläufe stattgefunden. Ios Verfinsterei müßte also zur Zeit  $t_1 + nT_{Io}$  stattfinden. Tatsächlich wird sie aber zum früheren Zeitpunkt  $t_2$  beobachtet. Die Zeitdifferenz ist ein Maß für die Veränderung des Abstandes zwischen Erde und Jupiter und damit für den Bahnradius der Erde:

$$d_1 - d_2 = c(t_1 + nT_{Io} - t_2)$$

Bei näherem Hinsehen zeigt sich jedoch, daß auch dieses Verfahren deutlich schwieriger durchzuführen ist, als seine Darstellung in Schulbüchern suggeriert. Immerhin kann es anhand historischer Daten oder von aktuellen Kalenderdaten nachvollzogen werden.

Da uns überzeugende Darstellungen tatsächlicher *eigener Messungen* nicht bekannt sind, versuchen wir in Koblenz in Kooperation mehrerer Amateur- und Schülergruppen eigene Meßergebnisse zu erzielen – bisher mit mangelhaftem Erfolg: Die Hälfte der Termine liegt in der zweiten Nachthälfte. Und auch von den verbleibenden Verfinstereien ist längst nicht jede zu beobachten (Wetter und andere Sichtbarkeitsbedingungen).

Bisher sind uns nur zwei Beobachtungen (teilweise) gelungen: Am 21.10.1997 tauchte Io mehr als eine Minute „zu früh“ auf. Dadurch war der eine Beobachter noch unaufmerksam, ein anderer noch beim Wein, bei einem dritten das Teleskop noch nicht justiert. Am 30.10.1997 differierten die Meßergebnisse an 8 Teleskopen um bis zu 33 Sekunden.

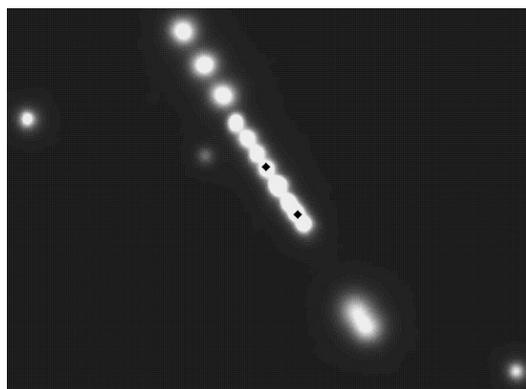
### 3.4.3 Kleinplanetenparallaxen

Die Grundidee der Bestimmung der Sonnenentfernung durch Messung der Parallaxe eines (Klein-) Planeten wurde bereits oben angedeutet: Die Planeten sind längst nicht so hell wie die Sonne, und sie kommen der Erde z.T. viel näher. Kennt man aber nur einen Abstand im Sonnensystem, dann kann man ihn auf die Entfernung zwischen Erde und Sonne hochrechnen.

Kepler setzte diese Idee am Beispiel von Mars, dessen minimaler Abstand von der Erde nur eine halbe Astronomische Einheit beträgt, als erster in die Tat um. Er konnte keine Parallaxe beobachten und schloß deshalb aus der Kenntnis seiner Beobachtungsgenauigkeit (bzw. der von Tycho), daß Aristarchs Ergebnis mindestens um den Faktor 3 zu klein sein mußte. Es dauerte aber noch bis 1672, bis Cassini, wiederum an Mars, die erste moderne Messung der „Sonnenparallaxe“ gelang, die zeigte, daß sich Aristarch sogar um den Faktor 20 geirrt hatte.

Ende 1996 organisierte die ESO<sup>8</sup> ein internationales Projekt, im Rahmen dessen die Zusammenarbeit zwischen Schulklassen, Amateurastronomen und professionellen Sternwarten erprobt werden konnte. Für uns bot sich dadurch die Gelegenheit für einen Versuch, die erste moderne Messung der Sonnenentfernung durch Cassini anhand eines Kleinplaneten<sup>9</sup> nachzuvollziehen([4]): Der Kleinplanet *Semiramis*, der sich in der Zeit der Erde bis auf etwa Sonnenentfernung näherte, sollte von verschiedenen Orten Europas und der Erde aus gleichzeitig fotografiert werden, um durch Vergleich der Fotos seine parallaktische Verschiebung vor dem Hintergrund der Fixsterne bestimmen und daraus seine Entfernung berechnen zu können.

Obwohl in den entscheidenden Nächten der Himmel über Europa dicht mit Wolken verhangen war und sich nur wenige Schüler- und Amateurgruppen zusammengefunden hatten, war das Projekt schließlich erfolgreich: Die Observatorien auf La Silla und in der Haute Provence fotografierten *Semiramis* mehrfach nahezu gleichzeitig:



Das Bild stellt die Kombination aller Aufnahmen aus Chile und der Provence dar, die mit Hilfe der auf den Fotos erkennbaren Fixsterne genau „übereinandergelegt“ wurden. Das Bild macht dreierlei deutlich:

1. *Semiramis* „hält nicht still“: Wegen seiner Eigenbewegung wandert der Kleinplanet während der etwa zweistündigen Beobachtungszeit geradlinig über das ganze Bild. Um seine Parallaxe bestimmen zu können, müßte also wirklich gleichzeitig fotografiert werden!
2. Die Astronomen in der Provence mußten durch Wolkenlücken fotografieren. In der von uns vorgeschlagenen Zeit (2.00 Uhr UT) war *Semiramis* gerade durch eine Wolke verdeckt. Zeitgleiche Positionen müssen deshalb durch Interpolation gefunden werden.
3. Die beiden Bewegungsgeraden haben eine etwas unterschiedliche Richtung. Dieser Effekt beruht auf dem endlichen Abstand von *Semiramis*: Für verschiedene Orte auf der Erde überlagern sich Eigenbewegung des Planeten und Rotationsbewegung des Beobachters aufgrund der Erddrehung zu etwas unterschiedlichen Gesamtbewegungen.

---

<sup>8</sup>Das ist die Organisation der europäischen Südsternwarte (*European Southern Observatory*) auf La Silla in Chile.

<sup>9</sup>Mars war in der vorgeschriebenen Zeit nicht beobachtbar.

Da der Abstand von Semiramis zum Zeitpunkt der Aufnahmen fast genau 1AE betrug, macht das Bild *die Entfernung zwischen Erde und Sonne sichtbar*<sup>10</sup>: Die unterschiedlichen Bewegungen und die verschiedenen Positionen um 2.00 UT<sup>11</sup> beruhen auf dem parallaktischen Effekt, der vom Abstand zwischen der Provence und La Silla hervorgerufen wird. Dieser stellte sich zum Zeitpunkt der Aufnahmen *von Semiramis aus gesehen* folgendermaßen dar:



Unser Ergebnis bei diesem Projekt lautet: *Die Sonnenparallaxe beträgt etwa 8.8", d.h. die Sonnenentfernung beträgt 23500 Erdradien*. Die Sonne ist also 400mal so weit entfernt wie der Mond.

Dieses Ergebnis haben wir zwar nicht wie geplant aus Amateuraufnahmen gewonnen. Die erreichte Genauigkeit hat jedoch gezeigt, daß eigene Meßversuche von Europa aus und/oder mit Fernrohren kürzerer Brennweite erfolgversprechend sind<sup>12</sup>.

## 4 Fixsternparallaxe

Wenn aber die Sonne so (fast unvorstellbar) weit entfernt ist, muß die Entfernung der Fixsterne noch viel größer sein! Denn die Bewegung der Erde um die Sonne muß sich doch in einer parallaktischen Veränderung der Sternpositionen widerspiegeln. Tatsächlich ist der Effekt der Fixsternparallaxe noch mindestens um einen Faktor 10 kleiner als der der Sonnenparallaxe<sup>13</sup>, und es dauerte nach Copernicus noch fast

<sup>10</sup>Der Effekt ist allerdings sehr klein: Die Brennweite der verwendeten Fernrohre betrug etwa 7m: Das Bild zeigt einen Ausschnitt von etwa 1'x1'!

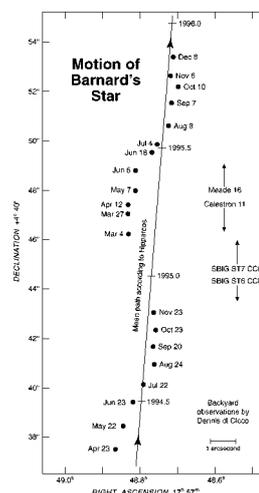
<sup>11</sup>Markiert sind die interpolierten Positionen für die Provence (unten rechts) und für La Silla.

<sup>12</sup>Manche Kleinplaneten kommen der Erde noch viel näher, so daß ihre Parallaxe leicht von Europa aus gemessen werden kann. Ein schönes Beispiel liefern [13]: Sie fotografierten den Kleinplaneten 1980 PA am 1.11.1996 bei einer Erdentfernung von nur 0.06AE aus der Schweiz und aus der Eifel im Abstand von jeweils 5 Minuten mit f=1200/1600mm.

<sup>13</sup>Das heißt aber: Da die Basis, der Erdbahndurchmesser, 24000mal so groß ist, müssen die Fixsterne mindestens 10\*24000mal so weit entfernt sein wie die Sonne!

300 Jahre, bis mit einer ersten Messung durch Bessel der direkte Nachweis der Erdbewegung gelang.

Inzwischen ist es sogar möglich, diesen Effekt mit Amateurmitteln zu messen ([8], [9]). Das folgende Bild zeigt fünf Fotos von „Barnards Pfeilstern“, eines der nächsten und schnellsten Sterne am Himmel, die im Abstand von jeweils einem halben Jahr aufgenommen wurden und mit Hilfe der anderen, viel weiter entfernten, Sterne genau übereinandergelegt wurden. Daneben ist zum Vergleich eine Zusammenstellung moderner Messungen abgebildet <sup>14</sup>.



Die Auswertung des Bildes ([8], [6]) ergibt: *Barnards Pfeilstern ist etwa 300000AE von der Erde entfernt.*

## 5 Schluß

Damit ist es uns gelungen, die ersten Stufen der „himmlischen Entfernungsleiter“ selbst zu erklimmen. Dabei hat sich uns eine große Diskrepanz zwischen der Prinzipdarstellung in Lehrbüchern und den Erfordernissen bei tatsächlichen Messungen aufgetan. Trotzdem ist allen Beteiligten deutlich geworden:

- *Astronomische Entfernungsangaben beruhen auf (leicht) zu beobachtenden Phänomenen.*
- *Eigene Messungen sind möglich!*

Allerdings benötigen die meisten Beobachtungen und Messungen viel Zeit. Es wird deshalb immer nur exemplarisch möglich sein, sie selbst durchzuführen. Dann allerdings ist Ergebnis nicht nur ein Meßwert, sondern

- ein eigenes Gefühl für die Größenordnungen astronomischer Entfernungen und für die Schwierigkeiten, die bei ihrer Messung auftreten,
- die Erfahrung der Erklärungsmächtigkeit des heliozentrischen Weltbildes und

<sup>14</sup>Das Bild und nähere Erläuterungen können aus dem Internet ([11]) bezogen werden.

- ein Eindruck, „woher man so etwas wissen kann“, was es also heißt, Physik zu betreiben.

Eigene Versuche solcher Messungen lohnen deshalb selbst dann, wenn sie nicht zu vernünftigen Meßergebnissen führten. Allerdings machen sie es erforderlich, die stundenweise Planung und Organisation von Physik- und Astronomieunterricht zu überwinden zugunsten von Beobachtungs- und Meßprojekten, die sich über mehrere Wochen oder Monate hinziehen können.

### Die ersten Stufen der himmlischen Entfernungsleiter

**Erdradius**  $R_E = 6370km$

**Mond**  $r_{Mond} = 60R_E$   
 $\approx 380000km$

**Venus**  $r_{Venus} = 0.7AE$

**Mars**  $r_{Mars} = 1.5AE$

**Jupiter**  $r_{Jupiter} = 5.2AE$

**Sonne**  $r_{Sonne} = 1AE$   
 $= 400r_{Mond}$   
 $= 24000R_E$   
 $\approx 150 \cdot 10^6 km$

**Barnards Stern**  $r_{Barnard} = 300000AE$

**61 Cygni**  $r_{61Cygni} = 665000AE$

## Literatur

- [1] U. Backhaus: *Beobachtung und Interpretation von Planetenbewegungen*, Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 45/8, 483 (1992)
- [2] U. Backhaus, H.-J. Schlichting, L. Schön: *Physikbuch 5/6*, Diesterweg: Frankfurt 1994
- [3] U. Backhaus, H.-J. Schlichting, L. Schön: *Physikbuch 7/8*, Diesterweg: Frankfurt 1995
- [4] U. Backhaus: *Astronomy On-Line: Measuring the Distance to the Sun*, Vorträge der DPG in Berlin 1997, S. 638; die ausführlich dargestellten Ergebnisse können im internet unter der folgenden Adresse gefunden werden: <http://uni-koblenz.de/~backhaus/aol/finalrep.htm>
- [5] U. Backhaus: *Die Entfernung der Sonne – Bedeutung, Geschichte, Messung*, Astronomie und Raumfahrt 35/1, 30 (1998)
- [6] U. Backhaus: *Astronomisches Praktikum: Eigenbewegung und Parallaxe von Barnards Pfeilstern*, wird veröffentlicht in Astronomie und Raumfahrt
- [7] W. Bredthauer et al.: *Impulse Physik*, Klett: Stuttgart 1993

- [8] E. Heiser, R. Schröder: *Eigenbewegung und Parallaxe von Barnards Pfeilstern*, Sterne und Weltraum 5/5, 388 (1996)
- [9] E. Heiser, R. Groß, U. Backhaus: *Die Parallaxe von 61 Cygni – anhand von Amateuraufnahmen selbst bestimm!*, Vorträge der DPG Regensburg 1998, in diesem Band
- [10] D. B. Herrman: *Astrologiegläubigkeit in Ost und West*, Astronomie und Raumfahrt 40/4, 19 (1997)
- [11] <http://astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/Hipparcos/properm.html>
- [12] A. Lieber: *Bau und Einsatz einfacher astronomischer Geräte*, Staatsexamensarbeit, Koblenz 1997
- [13] M. Miller: *Parallaxenmessung an 1980PA*, Sterne und Weltraum 36/4, 361 (1997)
- [14] U. Quast, U. Backhaus: *Die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach Römers Verfahren mit Hilfe eines astronomischen Kalenders*, Naturwissenschaften im Unterricht (Physik/Chemie) 35/7, 35 (1987)
- [15] S. Stein: *Beobachtung und Auswertung der Marsbewegung*, Staatsexamensarbeit, Koblenz 1997
- [16] D. Vornholz, U. Backhaus: *Wer hat recht - Aristarch oder der Sextant?*, Astronomie und Raumfahrt 31, 20 (1994)
- [17] D. Vornholz, U. Backhaus: *Wie lang ist Sylt?*, Astronomie und Raumfahrt 33/3, 32 (1996)
- [18] M. Wagenschein: *Naturphänomene sehen und verstehen*, Klett: Stuttgart 1988
- [19] M. Wagenschein, *Verstehen lehren*, Beltz: Weinheim 1992
- [20] M. Wagenschein, *Wie weit ist der Mond von uns entfernt?*, 1962, abgedruckt in [18], S. 302
- [21] M. Wagenschein, *Die Erfahrung des Erdballs*, 1965, abgedruckt in [18], S. 309