

Die Größe der Erde und die Entfernung des Mondes

Anregungen zur astronomischen Zusammenarbeit zwischen Schulen

U. Backhaus

1 Einleitung

Astronomische Beobachtungen und Erkenntnisse bilden eine wichtige Grundlage unserer heutigen Weltanschauung. In vielen Untersuchungen werden ein großes Interesse von SchülerInnen an solchen Themen, aber auch beeindruckende Unkenntnis deutlich. Für die geringe Bedeutung, die astronomischen Inhalten in Lehrplänen eingeräumt wird, spielt sicher neben der allgemeinen Überfrachtung der Lehrpläne die Schwierigkeit eine Rolle, astronomische Beobachtungen in einen starren Stunden- und Lehrplan einzugliedern. Zwar lässt sich der Tageslauf von Sonne und Mond im Laufe eines Schulvormittags ganz gut beobachten. Aber die Unsicherheit des Wetters und die Langfristigkeit der zu beobachtenden Veränderungen, die erst weitreichende Schlussfolgerungen ermöglichen, machen ergänzende Beobachtungen zu Hause und über einen langen Zeitraum erforderlich.

Bereits bei der langfristigen Beobachtung der Sonne und des Mondes, z.B. um vollständige Tagbögen und ihre Veränderung im Laufe der Zeit zu dokumentieren, erhöhen sich die Erfolgsaussichten beträchtlich, wenn es gelingt, die SchülerInnen, z.B. in Form von genauen Beobachtungsplänen, zur Kooperation anzuregen und anzuleiten. Der Zusammenhang mit dem Jahreslauf und den Jahreszeiten kann auf diese Weise entdeckt werden [1]. Die Abhängigkeit der Stellung von Sonne und Mond vom geografischen Ort der Beobachtungen kann jedoch, wenn sie nicht lediglich mitgeteilt werden soll, nur durch Zusammenarbeit mit weit entfernten Schulen untersucht werden. Wenn aber eine solche Zusammenarbeit erst einmal etabliert worden ist, eröffnen sich zahlreiche neue Möglichkeiten. Über die Messung des Radius der Erde und die Sichtbarmachung der Mondentfernung und den Versuch, sie zu messen, wird hier berichtet, um dazu anzuregen, die Projekte zu wiederholen.

Das Gefühl, mit den SchülerInnen anderer Schulen, vielleicht auch mit Amateur-

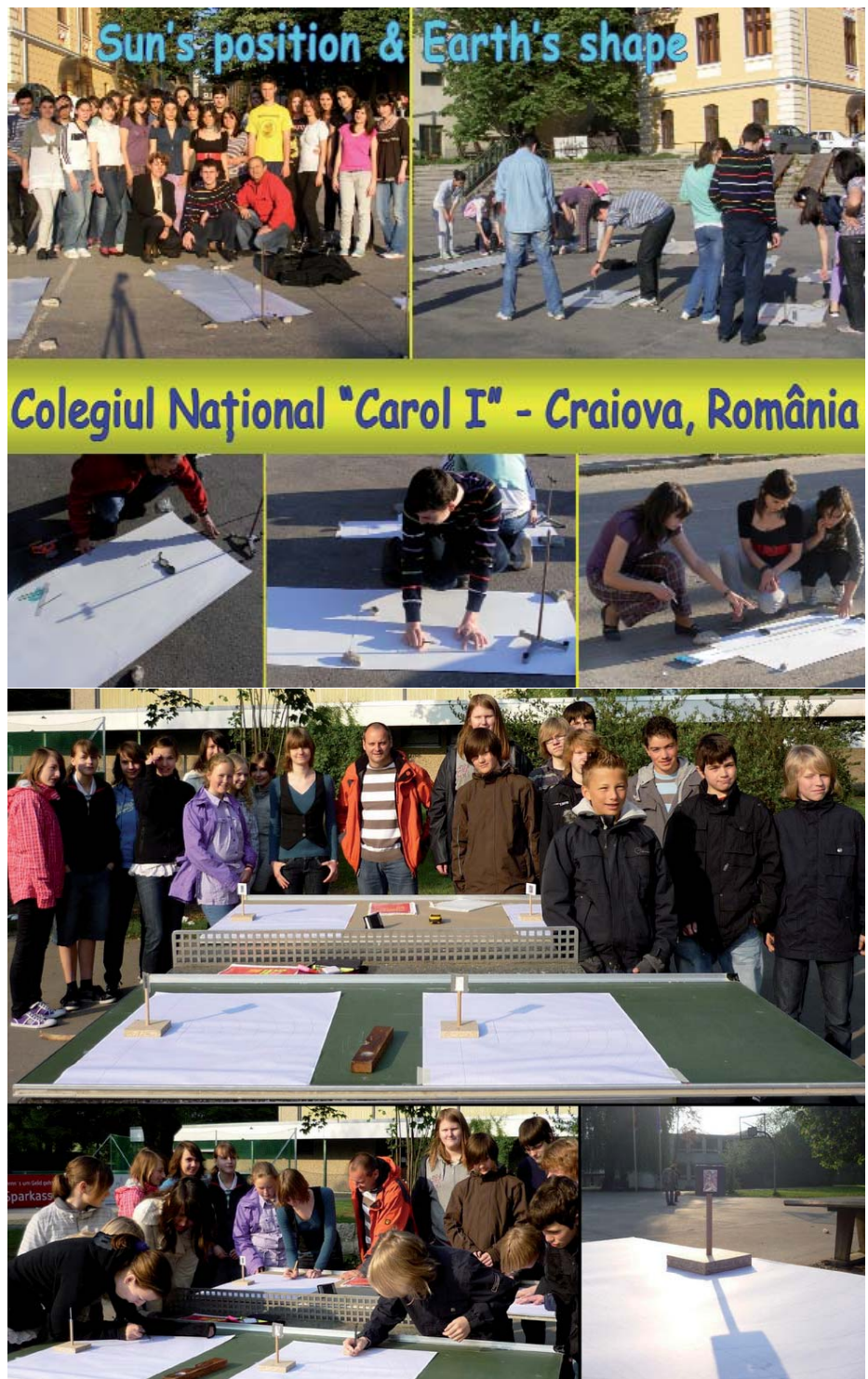


Abb. 1: Impressionen von der gleichzeitigen Sonnenstandsmessung in Craiova (Rumänien) und Lippstadt (Deutschland, Astronomische AG des Evangelischen Gymnasiums)



Abb. 2: Die Veränderung des Sonnenuntergangspunktes in der Zeit vom 1. Juni bis 14. Juli [3]

astronomen oder Profis, in einem gemeinsamen Projekt zusammenzuarbeiten, z. B. indem zu einem vorher genau verabredeten Zeitpunkt der Himmel gleichzeitig beobachtet und „vermessen“ wird, vermittelt einen ganz neuen zusätzlichen Reiz. Die SchülerInnen werden darüber hinaus angeregt, die modernen Methoden weltweiter Kommunikation, evtl. in einer Fremdsprache, anzuwenden und die Ergebnisse des Projektes oder bereits ihre Aktivitäten während der Durchführung zu dokumentieren und zu präsentieren. Die Beispiele in Abb. 1 zeigen die gleichzeitige Messung des Sonnenstandes an Schulen in Rumänien und Deutschland. Ähnliche Beispiele gibt es aus Malaysia, Damaskus, Isfahan, Oman, Dillingen, ... [2]. Einige der Gruppen, die an den unten beschriebenen Projekten teilnahmen, haben ihre Messungen in Anwesenheit der ganzen Schule oder in der Öffentlichkeit (Marktplatz, historische Stätte) durchgeführt. Eine zusätzliche Motivation der SchülerInnen beruht auf dem Bewusstsein, zu einer weltweiten Messung der Größe der Erde beizutragen.

2 Beobachtung der Sonne und Messung des Erdradius

Die Sonne, ihr Licht und ihre Wärme sind jedem Menschen vertraut. Ihre Bewegung über den Horizont und der Zusammenhang dieser Bewegung mit der Zeit und mit dem Wechsel der Jahreszeiten werden jedoch meist nur unbewusst wahrgenommen und in der Schule nur kurz behandelt und mitgeteilt. Dabei ist es einfach, den Zusammenhängen durch systematische – allerdings langfristige! – Beobachtungen selbst auf die Spur zu kommen.

2.1 Qualitative Beobachtungen

Der Tageslauf der Sonne, d. h. ihre Bewegung vom Aufgang am östlichen Horizont bis zu ihrem Untergang am westlichen Horizont lässt sich leicht verfolgen, am be-

sten durch Beobachtung und Aufzeichnung von Schatten oder durch Fotografieren. Aus der Regelmäßigkeit dieser Bewegung, die sich bei Beobachtungen im Abstand weniger Tage zeigt, ergeben sich die Möglichkeiten zur Festlegung der Himmelsrichtungen und zur Messung der Uhrzeit. Die längerfristige Veränderung der täglichen Sonnenbahn bemerkt man nur, wenn der Sonnenlauf genau beobachtet und „protokolliert“ wird. Dazu eignen sich besonders die Beobachtung des Sonnenauf- oder -untergangspunktes (Abb. 2) oder die Aufzeichnung von Schattenspuren, z. B. mithilfe eines Schattenstabes. Dabei können u. a. die folgenden Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die Richtung, in der die Sonne auf- oder untergeht, verändert sich im Jahreslauf stark, in unseren Breiten um etwa $\pm 45^\circ$. Nur zweimal im Jahr geht die Sonne genau im Osten auf und im Westen unter.
- Je weiter nördlich die Sonne auf- und untergeht, desto länger befindet sie sich über dem Horizont.
- Die Sonne erreicht immer in genau derselben Richtung ihren höchsten Stand über dem Horizont – im Süden.
- Die Mittagshöhe der Sonne ändert sich im Laufe des Jahres. Sie ist besonders groß im Sommer und besonders klein im Winter.
- Zwischen der Mittagshöhe der Sonne und den Richtungen, in denen sie auf- und untergeht, besteht ein enger Zusammenhang.

Vielleicht bringen SchülerInnen bei der Untersuchung der Mittagshöhe die Erfahrung ein, dass bei weiten Urlaubsreisen in den Süden die Sonne viel höher über den Himmel wandert als zu Hause. Das kann der Anlass sein für gezielte Beobachtungen und Messungen bei Reisen in den Süden. Außerdem kann ausgehend von dieser Erfahrung der Frage nachgegangen werden,

wie die Menschheit auf die Idee kommen konnte, dass die Erde eine Kugel ist [4].

2.2 Sonnenstand und Erdradius

Ohne weite Reisen kann man nur aus dem immer kreisförmigen Schatten der Erde auf dem Mond bei zahlreichen Mondfinsternissen auf die Kugelgestalt schließen. Das tat bereits *Aristoteles*. Um die Größe der Erde selbst herauszufinden, muss man jedoch reisen – oder mit Menschen an weit entfernten Orten kommunizieren.

Die Grundidee von Eratosthenes, deren Genialität eindrucksvoll von Wagenschein beschrieben wird [5], wird in vielen Schulbüchern behandelt. Sie besteht darin, aus der unterschiedlichen Mittagshöhe der Sonne an Orten mit derselben geografischen Länge auf den Winkel im Erdmittelpunkt zu schließen, der von den beiden Orten aufgespannt wird (s. Kasten 1). Dabei wird ausgenutzt, dass das Sonnenlicht die Erde parallel trifft (Abb. 3). Um aus dem Zentralwinkel auf den Umfang der Erde schließen zu können, muss die Entfernung der beiden Orte voneinander bekannt sein.

So einfach diese Messung im Prinzip ist, als so problematisch erweist sie sich bei der praktischen Durchführung: Je kleiner die Entfernung zwischen den Orten ist, desto genauer müssen die Winkel gemessen werden, und je weiter sie voneinander entfernt sind, desto schwieriger lässt sich die Entfernung messen. Für die Messung des Höhenwinkels der Sonne haben sich Schattenstäbe bewährt [6]. Sie lassen sich zu einem Präzisionsmessgerät erweitern, wenn die Grundebene exakt horizontal ausgerichtet wird und als „Spitze“ des Stabes ein kleines Loch dient, das einen kleinen Sonnentaler auf den Boden projiziert (Abb. 4).

Die Anwendung dieses Messverfahrens setzt voraus, dass sich zwei Schulen gefunden haben, die (fast) auf demselben Längengrad liegen. Außerdem muss die Mes-

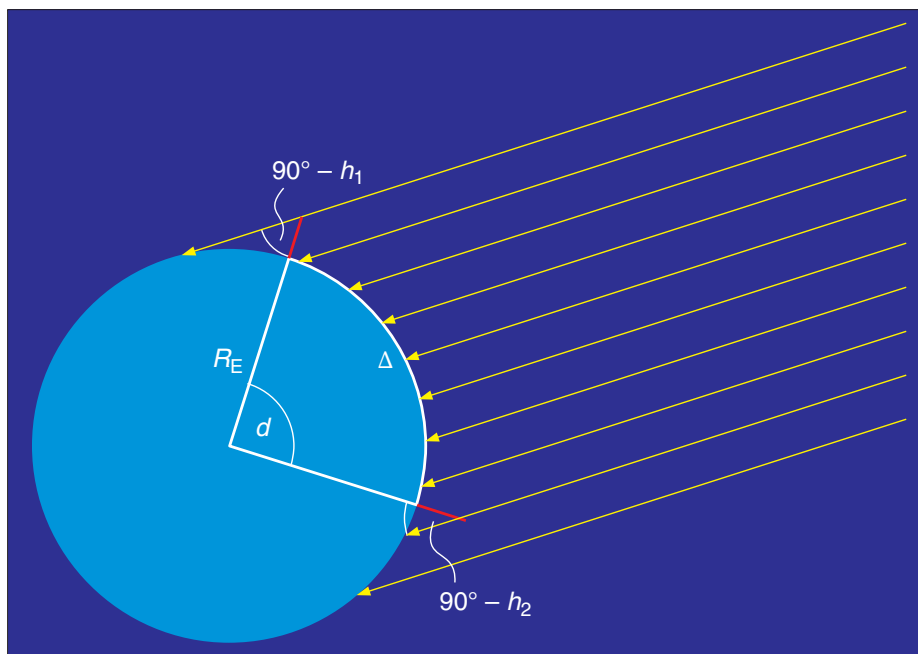
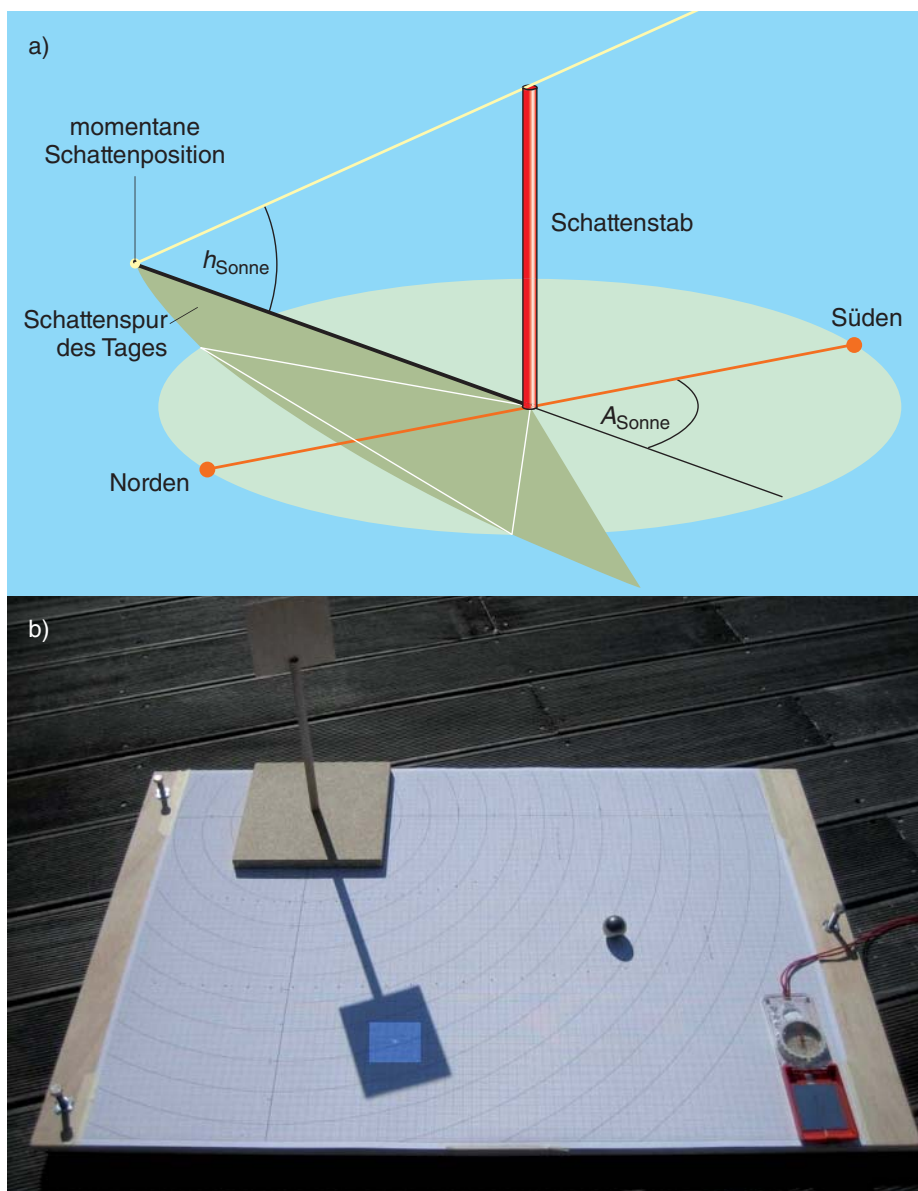


Abb. 3: Das Prinzip für die Messung des Erdradius

Abb. 4: Der Schattenstab als Präzisionsmessgerät



sung zum Zeitpunkt des lokalen Mittags erfolgen, d.h. wenn die Sonne genau im Süden steht und der Schatten des Stabes am kürzesten ist. In Abb. 4a ist angedeutet, wie vorab die genaue Südrichtung mit dem Schattenstab bestimmt werden kann (s. auch [6]).

Die Bedingung gleicher geografischer Länge schränkt die Chance, geeignete Kooperationschulen zu finden, stark ein – insbesondere wenn nach weit entfernten Partnern gesucht wird. Zum Glück ist es möglich, das Verfahren auf beliebige Orte zu verallgemeinern. Dabei treten allerdings zusätzliche Anforderungen auf (siehe Kasten 1):

- Die Zeitpunkte der Mittagmessungen müssen mit genau gehenden Uhren gemessen werden.
- Die geografische Breite mindestens eines der Orte muss bekannt sein, um die Deklination der Sonne selbst bestimmen zu können (Abb. 19).
- Da es sich nun nicht mehr um ein ebenes Problem handelt, muss auf eine Formel der sphärischen Geometrie zurückgegriffen werden.

Das Verfahren kann auch so verallgemeinert werden, dass an allen beteiligten Schulen zu einem beliebigen Zeitpunkt gleichzeitig gemessen wird. Dann muss nicht nur die Höhe der Sonne über dem Horizont, sondern auch ihr Azimut gemessen werden, d.h. die gegen Süden gemessene Richtung, in der sie steht, bzw. der Winkel, den der Schatten des Stabes mit der Nordrichtung bildet (in Abb. 4a mit A_{Sonne} bezeichnet). Der Weg, auf dem aus zwei solchen Messungen der Erdradius abgeleitet werden kann, wird in Kasten 1 beschrieben.

2.3 Das IYA2009-Projekt

Das Internationale Jahr der Astronomie im Jahre 2009 (IYA2009) bot eine gute Chance, SchülerInnen auf der ganzen Welt anzuregen, die Bewegung der Sonne im Laufe einiger Wochen bewusst wahrzunehmen und sich auf die Messung der Erdgröße vorzubereiten, indem Schattenstäbe konstruiert und der Umgang mit ihnen geübt wurde. Für das Projekt war durch Vorträge (z.B. [7]), im Internet und durch Rundmails an die Deutschen Schulen im Ausland gewonnen worden.

Im Zentrum des Projektes [8,9] stand der 24. April 2009 als gemeinsamer Beobachtungstag, an dem zu drei genau vorgeschriebenen Zeitpunkten (6.47 Uhr UT, 15.56 Uhr UT und 22.29 Uhr UT, s. Abb. 5) die Position (A, h) der Sonne über dem lokalen Horizont möglichst genau gemessen wer-



Abb. 5: Die Tagseite der Erde zu den drei Projektzeitpunkten 6:47 h, 15:56 h und 22:29 h UT. Eingebledet sind die Positionen der teilnehmenden Gruppen.

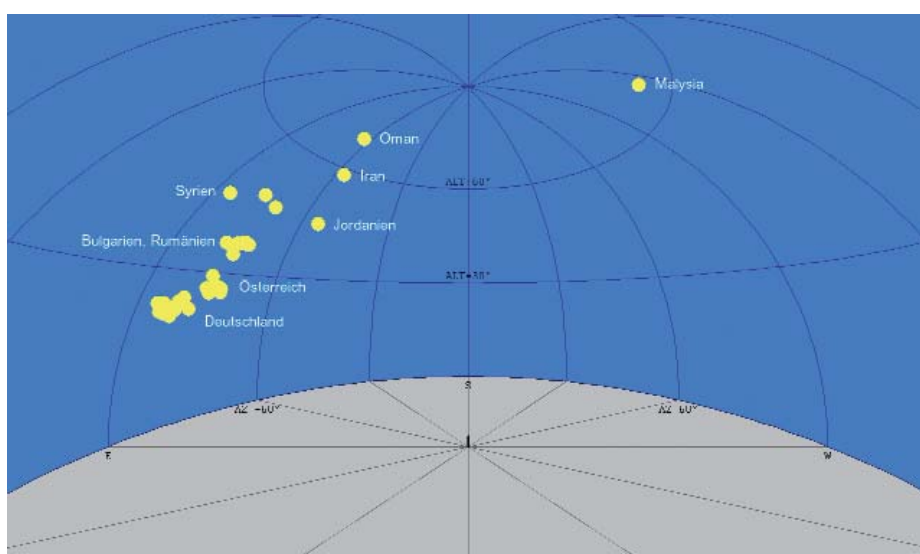


Abb. 6: Einige der von den teilnehmenden Gruppen um 6.47 Uhr UT gemessene Sonnenpositionen

den sollte. Datum und Uhrzeiten waren so gewählt, dass

- sich möglichst viele Menschen auf der Tagseite der Erde befanden,
- die Sonne über markanten Orten (Bangalore in Indien, Bridgetown auf Barbados bzw. eine Position exakt südlich von Hawaii) im Zenit stand und
- sich interessierte Schulen zu mindestens einem Zeitpunkt an der Messung beteiligen konnten.

Den subsolaren Punkten wurde bei der Planung eine gewisse Bedeutung beigemessen, weil sie eine erste, sehr einfache, Möglichkeit bieten, die Qualität der eigenen Höhenmessung zu prüfen: Bei der Ableitung des Erdradius aus der gemessenen Höhe und der Entfernung zum subsolaren Punkt handelt es sich um ein ebenes Problem [10].

Die beiden einzigen angemeldeten Schulen, die auch um 22.29 Uhr UT hätten messen können, lieferten leider keine Ergebnisse. Die meisten Messergebnisse wurden für 6.47 Uhr UT hochgeladen

(Schulvormittag in Europa!). Diese werden im Folgenden genauer vorgestellt.

Das Projekt startete bereits mehrere Wochen vor dem Tag der Messung. Die Zeit sollte genutzt werden, um sich mit dem Lauf der Sonne und dem Gebrauch des Schattenstabes vertraut zu machen und um einen geeigneten sonnenbeschienenen Ort und eine geeignete ebene und horizontale Fläche zu finden bzw. herzustellen, groß genug, um den Schatten des Stabes zum Projektzeitpunkt aufzufangen. Außerdem musste die genaue Südrichtung vorab bestimmt und markiert werden. Unmittelbar nach der Messung konnten die Ergebnisse online in eine Datenbank eingetragen werden. Alle Messergebnisse wurden sofort für alle Teilnehmer sichtbar und konnten benutzt werden, um einen „eigenen“ Wert für die Erdgröße zu berechnen.

Abb. 6 zeigt Messergebnisse für den ersten Messzeitpunkt. Obwohl alle Teilnehmer zur selben Zeit zu derselben Sonne blickten, sehen sie die Sonne an ganz unter-

schiedlichen Positionen über dem Horizont. Das kann nur bedeuten, dass sie nicht alle auf derselben Ebene stehen, sondern dass ihre Horizontebenen gegeneinander geneigt sind: Die Krümmung der Erdoberfläche wird sichtbar. Der Vergleich der gemessenen Sonnenpositionen in Abbildung 6 mit den Positionen der Beobachter auf der Erde (Abb. 5 links) macht das noch deutlicher. Wäre es gelungen, auf der ganzen Erde Teilnehmer zu gewinnen, würden sich die gemessenen Sonnenpositionen in Abb. 6 über den ganzen Himmel verteilen.

Die Kugelgestalt der Erde, bei der Behandlung der Messung von Eratosthenes meist vorausgesetzt, kann dadurch nachgewiesen werden, dass die Messergebnisse zu Paaren zusammengefasst werden und aus diesen Paaren der zugehörige Wert für den Erdradius berechnet wird. Für diese Berechnung wurden in kleines Programm und eine Excel-Tabelle zur Verfügung gestellt, die den in Kasten 1 beschriebenen Algorithmus umsetzen und mit denen die Teilnehmer den Erdradius für beliebige Kombinationen von Messergebnissen selbst berechnen konnten.

In Abb. 7 sind alle Ergebnisse grafisch dargestellt. Die Grafik macht deutlich, dass die Resultate umso besser sind, je weiter die Beobachtungsorte voneinander entfernt sind. Für Entfernungen oberhalb von etwa 3500 km stimmen sie recht befriedigend mit dem richtigen Wert von 6378 km überein. Bei kleineren Abständen streuen sie jedoch sehr stark. Wesentliche Ursache dafür ist, dass nicht alle teilnehmenden Gruppen die Südrichtung hinreichend sorgfältig bestimmt haben, sodass die gemessenen Werte für das Azimut der Sonne nicht genau genug waren.

Es ist jedoch möglich, bereits bei sehr kleinen Basislängen aus den unterschiedlichen Sonnenständen den Erdradius abzuleiten. Am Projekttag wurde in der Wis-

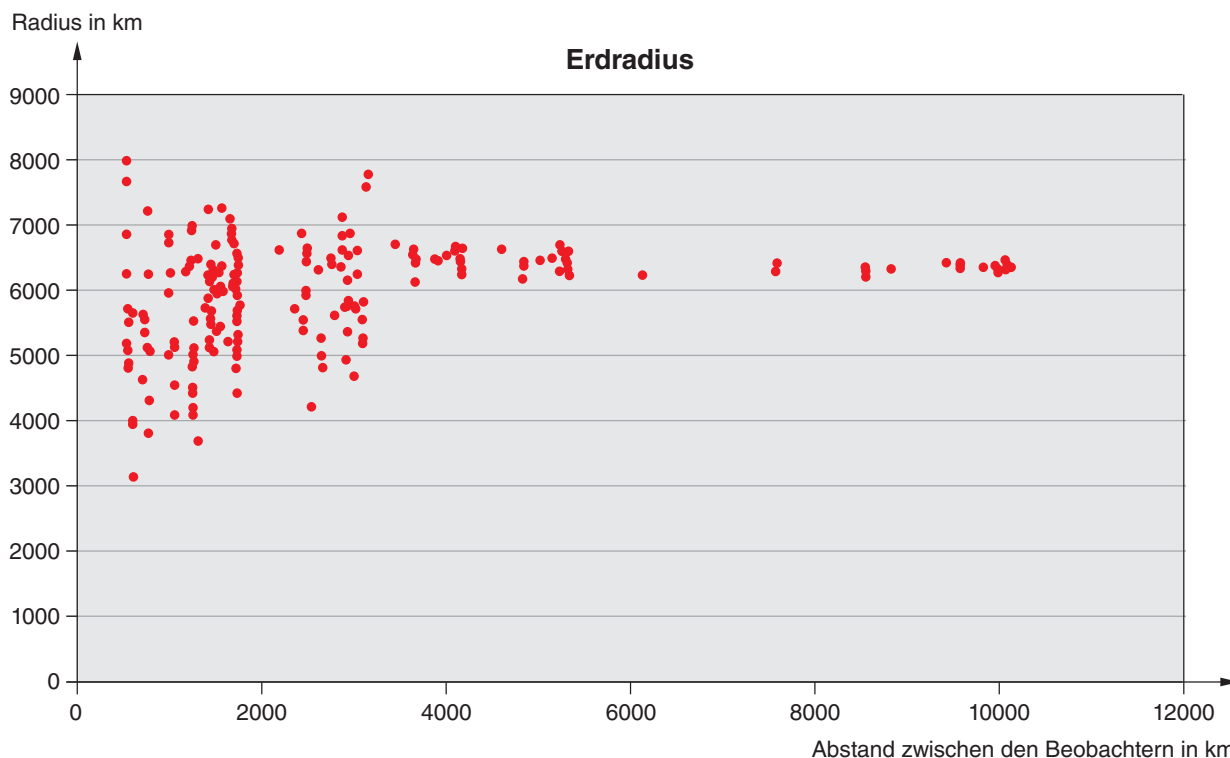


Abb. 7: Die Auswertungsergebnisse für 6.47 Uhr UT in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen den Beobachtern

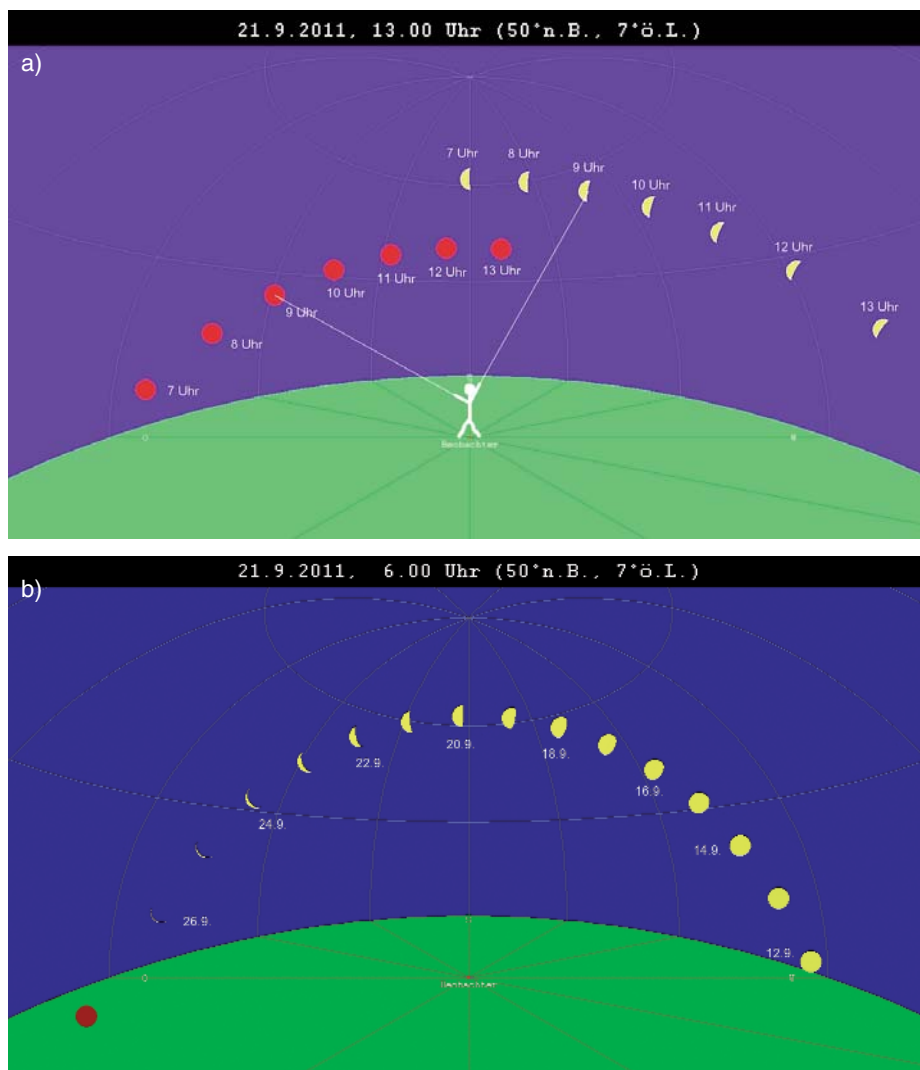
senschaftssendung „Leonardo“ des Westdeutschen Rundfunks über das Projekt berichtet [11]. Vor der Sendung wurde der Sonnenstand von zwei Gruppen innerhalb von Nordrhein-Westfalen (Volkssternwarte Aachen und Physik-Astro-AG des Ratsgymnasiums Minden, Abstand 259 km Luftlinie) gemessen und live ausgewertet. Aus den beiden unmittelbar vor der Sendung gemessenen Positionen ergaben sich für den Erdradius die Werte 6302 km und 5583 km. Die Entfernung zwischen diesen beiden Orten konnte selbst gemessen werden: Bei einer späteren Autofahrt entlang einer möglichst kurzen Strecke vom einen Beobachtungsort zum anderen ergab sich eine Entfernung von 301 km.

Bei einem früheren Projekt konnte nachgewiesen werden, dass eine ungefähre Messung des Erdradius sogar auf der nur 30 km langen Insel Sylt möglich ist [12].

4 Beobachtung des Mondes und Messung der Mondentfernung

Allen Menschen ist bekannt, dass der Mond in verschiedenen Gestalten (Phasengestalten) am Himmel zu sehen ist. Aber bereits die Unterscheidung zwischen zu- und abnehmendem Mond fällt schwer, und die meisten überrascht es, dass man den Mond auch am Taghimmel entdecken kann. Bevor Messungen am Mond durchgeführt werden, sollten Schüler deshalb angeregt werden, durch aufmerksame Beobachtungen etwas mit dem Mond und seiner Bewegung vertraut zu werden [13].

Abb. 8: Die Wanderung des abnehmenden Halbmondes am Morgen (a). Die Position des abnehmenden Mondes, kurz vor Sonnenaufgang im Abstand von zwei Tagen beobachtet (b).



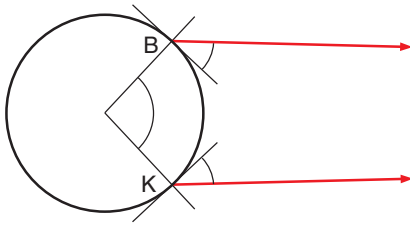


Abb. 9: Das Prinzip der Messung der Mondparallaxe zwischen Berlin (B) und Kapstadt (K) (aus [16])

Erfahrungen, die dabei gesammelt werden können, sind beispielsweise:

- Der Mond geht wie die Sonne am Osthorizont auf und am Westhorizont unter.
- Sonne und Mond wandern gemeinsam über den Himmel; im Laufe eines Tages bleibt der (Winkel-) Abstand zwischen ihnen ungefähr gleich (Abb. 8a).
- Im Laufe eines Monats verspäten sich die Auf- und Untergänge immer mehr.
- Im Laufe eines Monats verändert sich die Phasengestalt des Mondes in systematischer, vorhersagbarer Weise. Dabei ändern sich der Winkelabstand zur Sonne und die Auf- und Untergangszeiten – und dadurch die Tages- und Nachtzeiten, in denen der Mond sichtbar ist (Abb. 8b).

4.1 Einfache Messungen

Bei der langfristigen Beobachtung des Mondes, zunächst im Laufe von Morgen und Abenden, dann im Laufe eines Monats, entstehen Fragen, denen mit einfachen Messungen nachgegangen werden kann:

- Wie verändern sich die Auf- und Untergangsrichtungen des Mondes und die Höhe, die er im Süden über dem Horizont erreicht?
- Wie lang ist ein Monat: Wie viele Tage vergehen von einem Vollmond zum nächsten, oder besser von einem (abnehmenden) Halbmond zum nächsten?
- Wie lange dauert es, bis der Mond wieder an demselben Stern vorbei kommt?

Diesen Fragen kann man ähnlich wie bei der Sonne nachgehen. Höhenmessungen sind zwar bei sehr klarem Himmel wie bei der Sonne mit einem Schattenstab möglich. Als neue Messgeräte bieten sich aber Pendelquadranten an [6].

Bei der Beobachtung und Erklärung der Mondphasen entsteht bei den Schülern, vielleicht zum ersten Mal, die Frage nach der Entfernung des Mondes. Bei der Betrachtung von Sonne, Mond und Sternenhimmel liegt sie zunächst insofern nicht nahe, weil am Himmel auf einfache Weise keine (unterschiedlichen) Entfernungen

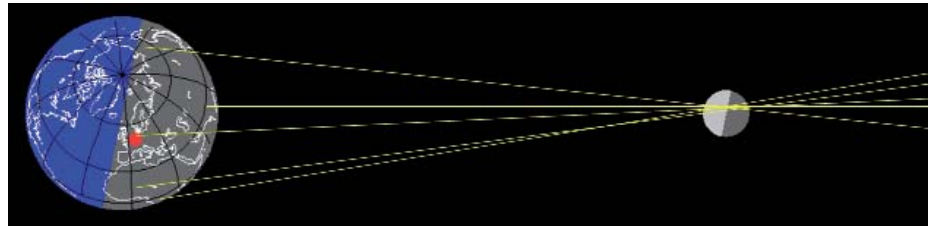


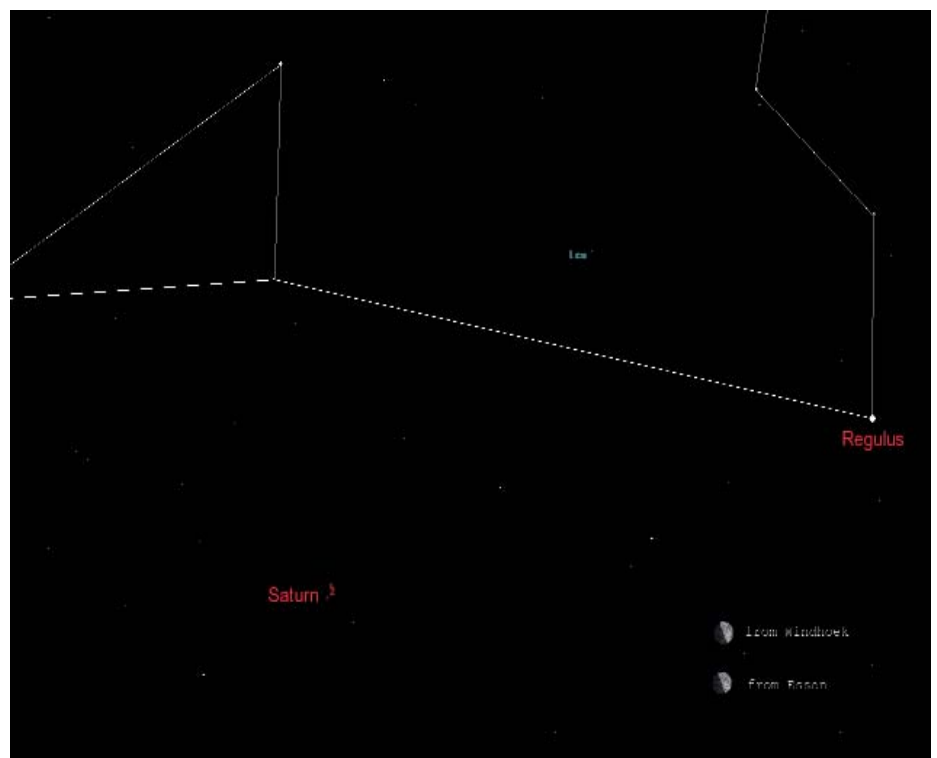
Abb. 10: Verallgemeinerung der Parallaxenmethode auf beliebige Beobachtungsorte

zu bemerken sind. Erst die schmale Sichel des Mondes zeigt, dass der Mond der Erde viel näher ist als die Sonne (Wagenschein: „Die Himmelskugel löst sich im Raum auf.“ [14]).

4.2 Die Entfernung zum Mond

Schon dem Griechen *Hipparch* gelang es, durch genaue Beobachtung von Mondfinsternissen die Entfernung des Mondes recht genau zu bestimmen. Die von ihm angewendete Methode ist jedoch nicht einfach zu durchschauen [15]. Und sie unterscheidet sich grundsätzlich von der Methode, mit der im Alltag unterschiedliche Entfernungen abgeschätzt werden können, – der Parallaxenmethode. Dabei wird, mehr oder weniger bewusst, ausgenutzt, dass sich die Blickrichtung zu den Gegenständen der Umgebung ändert, wenn man sich bewegt und sich dadurch ihre Positionen relativ zueinander verändern.

Abb. 11: Am 30. Mai 2009 stand der Mond zwischen dem Planeten Saturn und dem hellen Stern Regulus. Eingezeichnet ist außerdem der Parallaxeneffekt, der bei Beobachtung von Deutschland und Namibia aus zu erwarten war (erzeugt mit dem Programm Guide).



Die Mondparallaxe

Wagenschein beschreibt in seinem Aufsatz „Wie weit ist der Mond entfernt?“ [16] eindrucksvoll, wie man mit Schülern der Frage nach der Mondentfernung nachgehen kann. Ausgangspunkt ist dabei die Erfahrung, dass der Mond bei alltäglichen Fahrten perfekt „mitwandert“. Er muss also sehr weit entfernt sein, weil sich die Blickrichtung zu ihm nicht ändert. Erst bei einer (gedachten) sehr weiten Fahrt macht sich bei genauer Beobachtung das Zurückbleiben des Mondes bemerkbar (Abb. 9).

Weil sich der Mond während der Dauer einer weiten Reise am Himmel bewegt, kann man seine Parallaxe nicht allein messen. Man braucht stattdessen zwei Beobachter, die von weit entfernten Orten aus die Blickrichtung zum Mond gleichzeitig bestimmen, z. B. indem sie die Höhe des Mondes über dem Horizont oder die Position des Mondes relativ zu benachbarten Sternen messen.

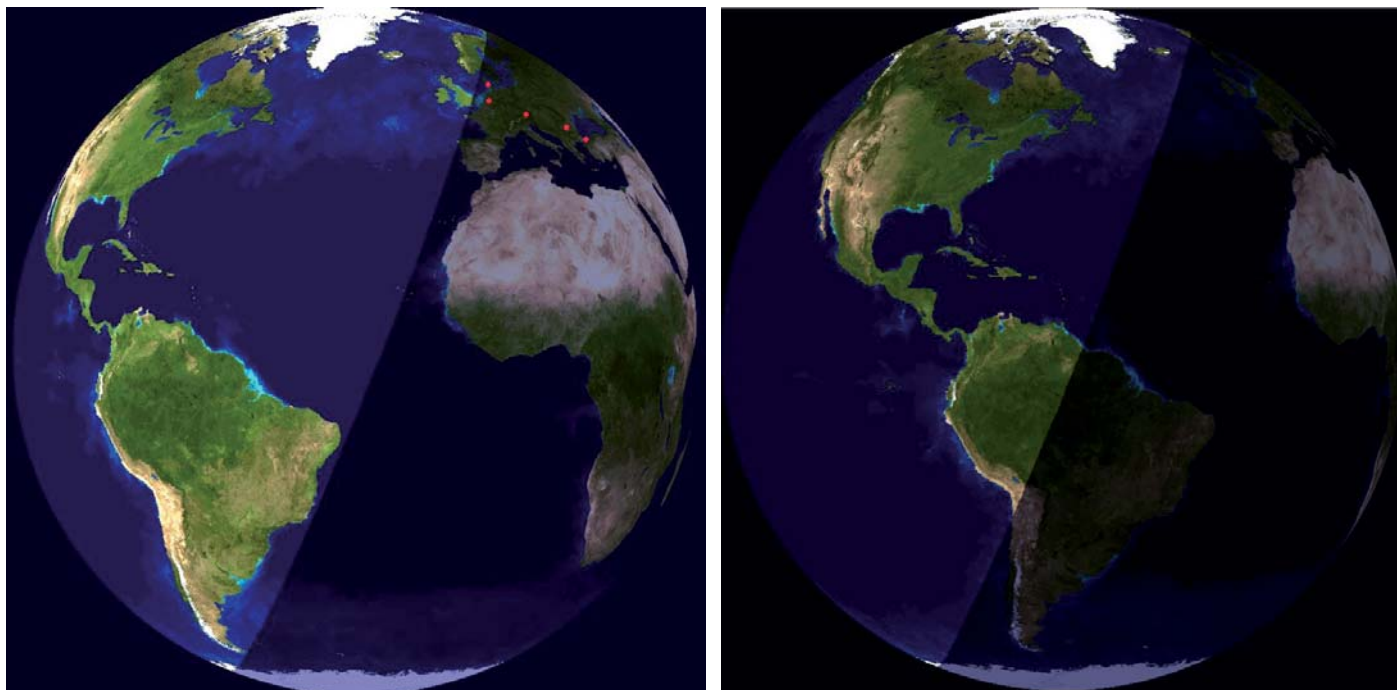


Abb. 12: Die Erde am 30. Mai 2009 um 20.00 Uhr UT (links) und um 22.00 Uhr UT vom Mond aus gesehen (erzeugt mit dem Programm HomePlanet)

4.3 Das IYA2009-Projekt „The distance to the Moon“

Wie die Methode von Eratosthenes zur Messung des Erdradius hat die von Wagenstein beschriebene einfache Messung der Mondparallaxe den Nachteil, nur von Orten aus anwendbar zu sein, die auf demselben Längengrad liegen, und nur durchgeführt werden kann, wenn der Mond gerade im Süden (bzw. Norden) steht. Die Idee des auch im Internationalen Jahr der Astronomie durchgeführten Internetprojektes [17] war, diese Methode so zu verallgemeinern, dass sich Menschen auf der ganzen Erde an der Messung beteiligen konnten (Abb. 10).

Dazu sollten alle Teilnehmer den Mond zu einer fest verabredeten Zeit gleichzeitig vor dem Sternenhintergrund fotografieren und auf diesen Fotos die Position des Mondes messen. Die Fotos konnten auf die Projektseite hochgeladen und die gemessenen Positionen direkt in eine Datenbank eingetragen werden. Dadurch war es für alle Teilnehmer möglich, die eigenen Bilder und Messergebnisse mit denen anderer Gruppen zu vergleichen und zu versuchen, daraus die Mondentfernung abzuleiten. Der verallgemeinerte Algorithmus (Kasten 2) wurde ausführlich beschrieben und in Form eines kleinen Programms und einer Exceltabelle zur Verfügung gestellt.

Bei der Planung einer solchen weltweiten Zusammenarbeit muss Folgendes beachtet werden: Der Mond ist so hell, dass auf den meisten Fotos entweder der Mond richtig belichtet ist oder die Hintergrundobjekte. Im ersten Fall sind auf dem Foto meist keine Hintergrundobjekte zu erken-

nen, und es ist unmöglich, die Position des Mondes zu messen. Im zweiten Fall ist oft der Mond so überbelichtet, dass es sehr schwierig ist, die Position seines Mittelpunktes zu bestimmen. Diese Schwierigkeit kann dadurch verringert werden, dass Zeitpunkte verabredet werden, an denen der Mond in der Nähe heller Sterne oder Planeten steht. Außerdem ist der Mond umso weniger hell, je weniger von seiner beleuchteten Seite zu sehen ist. Allerdings kann eine schmale Mondsichel nur von einem kleinen Teil der Erde aus – dem vom Mond aus sichtbaren Teil der Nachtseite der Erde – gleichzeitig bei Dunkelheit beobachtet und fotografiert werden: Vom Mond aus gesehen ist dann fast Vollerde.

Die Wahl fiel auf den 30. Mai 2009. An diesem Tag stand der Mond am Himmel zwischen Saturn und Regulus, dem hellsten Stern im Sternbild Löwe (Abb. 11). Außerdem konnte der Mond, einen Tag vor dem ersten Viertel, jeweils von einem Viertel der Erdoberfläche aus gleichzeitig am Nachthimmel gesehen werden. Um möglichst vielen Menschen die Teilnahme zu ermöglichen, wurden fünf Zeitpunkte verabredet, von denen allerdings nur zwei genutzt wurden (Abb. 12).

Abb. 13 zeigt eine der besten Fotografien, die bei diesem Projekt aufgenommen wurden. Sie verdeutlicht die Problematik der korrekten Belichtung: Der Mond ist bereits etwas überbelichtet;

Abb. 13: Der Mond zwischen Saturn und Regulus (G. Dangl, Nonndorf, Österreich)



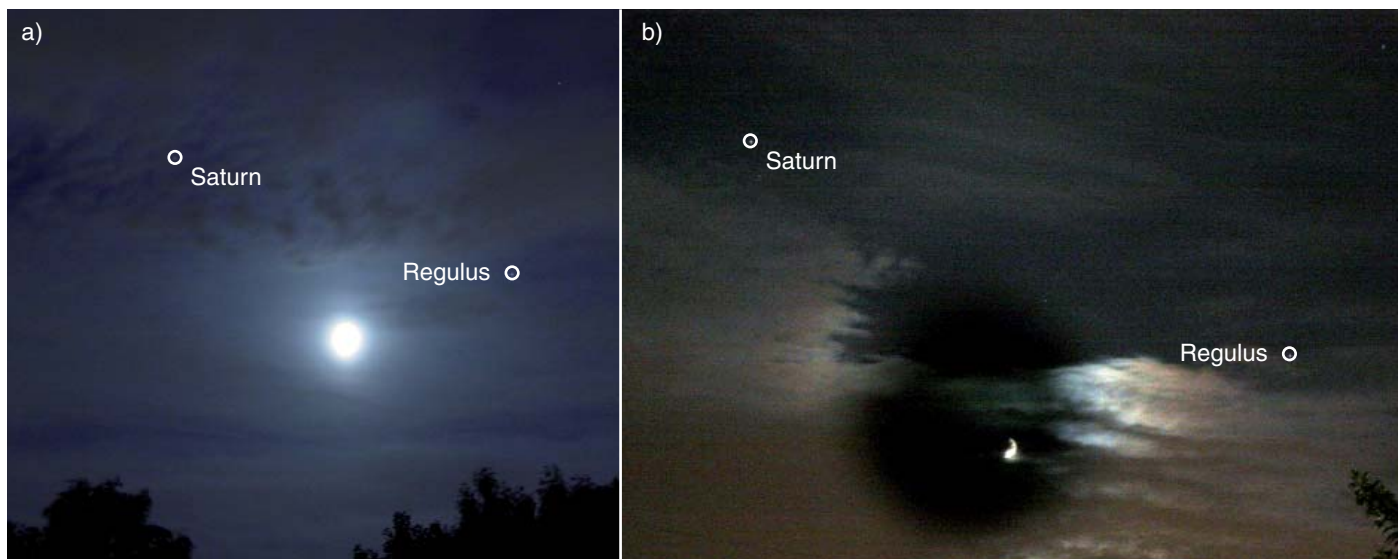


Abb. 14: Der Mond um 22.00 Uhr UT, von Essen (U. Backhaus, (a)) und Bochum aus fotografiert (A. Knülle-Wenzel, (b), mit Graufilter)



Abb. 15: Überlagerung der 20.00UT-Bilder aus Essen (U. Backhaus) und Istanbul (R. Schell)

trotzdem sind Saturn und Regulus nur schwach erkennbar. Diese Schwierigkeit wurde durch Schleierbewölkung vergrößert, die über großen Teilen Europas den Himmel bedeckte und es zusätzlich erschwerte, die beiden Bezugsobjekte auf den Bildern zu finden (Abb. 14a). Eine Verbesserung konnte dadurch erreicht werden, dass der Mond mit einem Grau- oder Polarisationsfilter abgeschwächt wurde (Abb. 14b).

Auswertung

Von verschiedenen Orten aus aufgenommene Bilder können mit einfachen Bildbearbeitungsprogrammen (z.B. ImageJ) so skaliert, gedreht und verschoben werden, dass die Bezugsobjekte exakt dieselben Bildpositionen einnehmen. Werden die so bearbeiteten Bilder überlagert, wird die parallaktische Verschiebung des Mondes sichtbar. Abb. 15 zeigt als Beispiel die Überlagerung zweier Bilder aus Essen und Istanbul. Leider ist der „Istanbuler Mond“ deutlich überbelichtet, sodass nur anhand der in der Kamera entstandenen Reflexion der Halbmond erkennbar ist.

Der Winkelmaßstab der Bilder lässt sich anhand der Referenzobjekte bestimmen, deren Positionen am Projekttag bekannt waren. Damit lassen sich zunächst die Abstände des Mondes von Saturn und Regulus und dann der Abstand der beiden Mondbilder, d.h. der Parallaxenwinkel, geometrisch oder rechnerisch bestimmen. Für die genaue Methode (Kasten 2) genügt es nicht, diesen Abstand zu kennen. Man muss vielmehr die genauen „Blickrichtungen“ zum Mond kennen, d. h. seine Koordinaten (Rektaszension und Deklination), die sich aus den Koordinaten der Referenzobjekte berechnen lassen.

Die Teilnehmer konnten durch eigene Auswertungen versuchen, die Mondentfernung zu bestimmen. Nach Abschluss des Projektes wurden eine Tabelle mit den vollständigen Messergebnissen und Beispiele überlagerter Bilder (wie Abb. 15) ins Internet gestellt. Abb. 16 zeigt die Zusammenfassung der Auswertungen der um 20 Uhr UT aufgenommenen Fotos. Angesichts der problematischen Wetterbedingungen und der Schwierigkeit, Mond und Referenzobjekte gleichzeitig richtig abzubilden, ist es

nicht überraschend, dass es bei Entfernungen zwischen den Beobachtungsorten unterhalb von 1000 km fast keine Übereinstimmung mit dem korrekten Wert für die Mondentfernung, sie betrug am Projekttag 58,7 Erdradien, gibt. Die für größere Abstände zwischen den Beobachtern gewonnenen Ergebnisse sind wesentlich besser, im Mittel aber zu klein.

Dass mit der verwendeten Methode bei guten Sichtbedingungen und großer Basislänge sehr gute Ergebnisse erzielt werden können, zeigt Abb. 17. Es wurde bei einem ähnlichen Projekt im Jahr 2000 [18,19] gewonnen. Die Entfernung zwischen den Beobachtungsorten in Deutschland und Namibia betrug 8100 km, und das Ergebnis der Auswertung (57,8 Erdradien) stimmte fast perfekt mit dem aktuellen Wert für die Mondentfernung (57,74 Erdradien) überein.

6 Fazit

Für alle Beteiligten war die Teilnahme an den Projekten ein großes Erlebnis. Zahlreiche Emails und Nachfragen bestätigen das. Über die Vorbereitung und die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurde leider nur wenig mitgeteilt. Dadurch bleibt ungewiss, inwieweit das Ziel, viele Menschen auf Vorgänge am Himmel aufmerksam zu machen und zu aufmerksamen Beobachtungen anzuregen, erreicht worden ist. Sicher dagegen ist, dass die Teilnehmer viel über den Reiz, aber auch über die Schwierigkeit wissenschaftlicher Forschung und genauer Messungen erfahren und gelernt haben. Einige Gruppen haben erst bei der Durchführung oder bei der späteren Auswertung bemerkt, dass die eigenen Vorbereitungen nicht sorgfältig genug waren. Bei beiden Projekten kam es darauf an, Winkel sehr genau zu messen. Die damit

Messung des Erdradius

Grundidee: Zu zwei Orten auf der Erde, deren Entfernung Δ voneinander bekannt ist, wird der zugehörige Zentralwinkel d im Erdmittelpunkt bestimmt. Der Erdradius R_E ergibt sich dann folgendermaßen:

$$d = \frac{\Delta}{R_E} \Rightarrow R_E = \frac{\Delta}{d} \quad (d \text{ in Bogenmaß})$$

Die Messung besteht also aus zwei Teilen:

1. Die Entfernung zwischen den Orten wird gemessen, z. B. indem der kürzest mögliche Weg zwischen ihnen abgefahren oder geflogen wird.
2. Für die Bestimmung des Zentralwinkels wird der Stand der Sonne über dem Horizont der beiden Orte verglichen. Dabei wird benutzt, dass das Sonnenlicht parallel auf die Erde trifft.

Die Notwendigkeit der ersten dieser beiden Messungen wird meistens übergangen.

Für die Messung des Zentralwinkels gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- An zwei Orten, die auf demselben Längengrad liegen, werden am selben Tag die Sonnenhöchststände h_1 und h_2 gemessen. Dabei werden Kulminationshöhen auf der Südhalbkugel negativ gezählt. Mit diesen Messwerten lässt sich der Zentralwinkel leicht berechnen: $d = |h_2 - h_1|$.

Dieses Verfahren, das auf Erathostenes zurück geht und in vielen Schulbüchern erwähnt wird, hat zwei wesentliche Vorteile: Es handelt sich um ein ebenes Problem, weil Erdmittelpunkt, Sonne und die beiden Orte zu diesem Zeitpunkt in derselben Ebene liegen. Und es sind keine genau gehenden Uhren erforderlich, weil der kürzeste Schatten auch ohne Uhr bestimmt werden kann. Das Verfahren unterliegt aber zwei starken Einschränkungen – der Bedingung gleicher geografischer Länge und der Voraussetzung einer Mittagmessung.

- Das Verfahren lässt sich auf Orte mit unterschiedlichen geografischen Längen λ_1 und λ_2 verallgemeinern, wenn mit genau gehenden Uhren zusätzlich die Zeitpunkte t_1 und t_2 der Mittagmessungen registriert werden. Dann lassen sich zunächst die Differenzen in den geografischen Positionen bestimmen:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = h_1 - h_2, \quad \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{t_1 - t_2}{24 \text{ h}} 360^\circ$$

Der gesuchte Zentralwinkel d ergibt sich aus dem Seitenkosinussatz der sphärischen Geometrie (Abb. 18):

$$\cos d = \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos (\lambda_2 - \lambda_1)$$

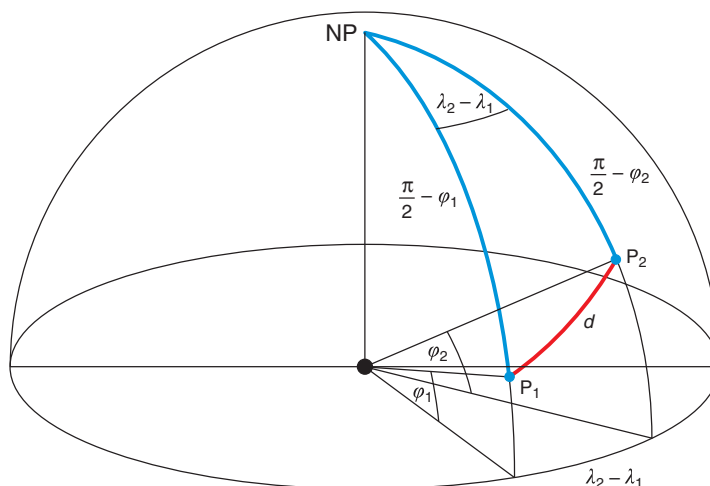


Abb. 18: Zur Berechnung des von zwei Punkten auf der Erde aufgespannten Mittelpunktswinkels d

Um ihn anwenden zu können, muss allerdings die geografische Breite eines der Beobachtungsorte zuvor bestimmt worden sein. Sie ergibt sich aus der Mittagshöhe der Sonne, wenn die Deklination δ_s der Sonne bekannt ist.

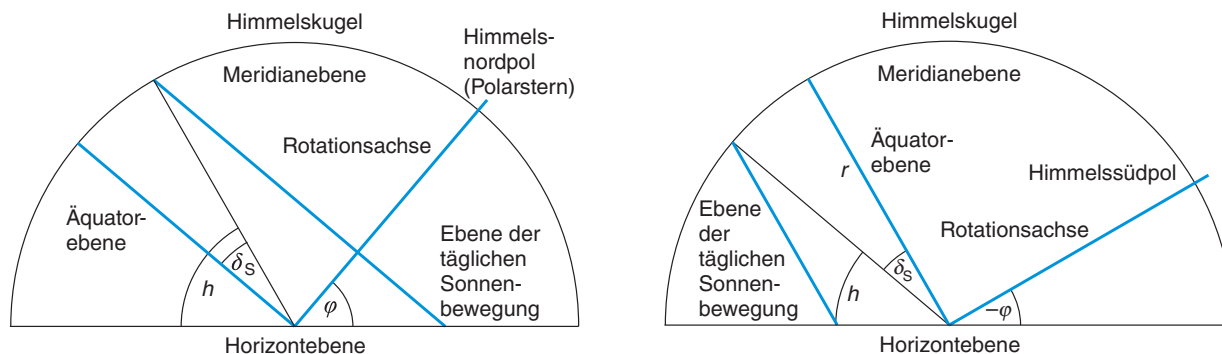


Abb. 19: Zusammenhang zwischen Mittagshöhe h , geografischer Breite φ und Sonnendeklination δ_s

$$\varphi = \delta_s \mp (h - 90^\circ)$$

Dabei gilt das negative Vorzeichen auf der Nordhalbkugel (Abb. 19).

Kasten 1: Die Messung des Erdradius

- Die Sonnenpositionen (A, h) über dem Horizont können auch zu beliebigen Uhrzeiten gleichzeitig gemessen werden. Dann muss neben der Höhe h auch die Richtung gegen Süden, das Azimut A der Sonne gemessen werden. Die Deklination δ_s der Sonne muss bekannt sein, nicht aber die geografischen Koordinaten der Beobachtungsorte.

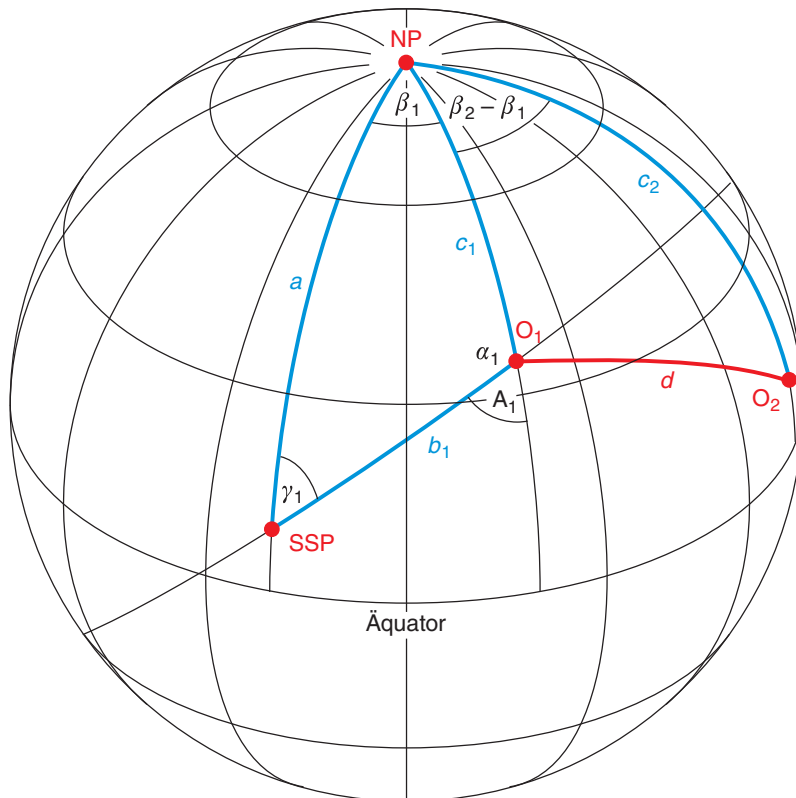


Abb. 20: Zur Berechnung der geografischen Koordinaten aus den Messungen der Sonnenposition

Auf der Erdoberfläche bilden der Nordpol NP, der subsolare Punkt SSP und einer der Beobachtungsorte O_i ein sphärisches Dreieck, in dem die zwei „Seiten“ (d. h. die zugehörigen Zentralwinkel)

$$a = \frac{\pi}{2} - \delta_s \quad \text{und} \quad b_i = \frac{\pi}{2} - h_i \quad \text{der Winkel } \alpha_i = \pi - A_i \quad \text{bekannt sind (Abb. 20).}$$

Um die geografischen Koordinaten (φ_i, λ_i) der Beobachtungsorte zu bestimmen, müssen die folgenden Schritte für beide Beobachtungsorte durchgeführt werden:

- Berechnung der Winkel β_i mit dem Sinussatz der sphärischen Geometrie:

$$\sin \beta_i = \frac{\sin \alpha_i \sin b_i}{\sin a}$$

Damit sind dann die geografischen Längen relativ zum subsolaren Punkt bekannt:

$$\lambda_i = \lambda_{\text{SSP}} + \beta_i$$

- Berechnung der Seiten c_i mit einer der neperischen Analogien:

$$\tan \frac{c_i}{2} \cos \frac{\alpha_i - \beta_i}{2} = \tan \frac{a + b_i}{2} \cos \frac{\alpha_i + \beta_i}{2}$$

Damit sind auch die geografischen Breiten der Beobachtungsorte bekannt:

$$\varphi_i = \frac{\pi}{2} - c_i$$

Zur Berechnung des gesuchten Zentralwinkels d wird schließlich noch das sphärische Dreieck NP- O_1 - O_2 betrachtet. Da in diesem Dreieck die beiden Seiten c_1 und c_2 und der von ihnen eingeschlossene Winkel $\beta_2 - \beta_1$ bekannt sind, kann die dritte Seite – und das ist der gesuchte Zentralwinkel! – mit dem Seitenkosinussatz berechnet werden:

$$\begin{aligned} \cos d &= \cos c_1 \cos c_2 + \sin c_1 \sin c_2 \cos(\beta_2 - \beta_1) \\ &= \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos(\lambda_2 - \lambda_1) \end{aligned}$$

Die Messung der Mondentfernung

Der Parallaxenwinkel des Mondes wird bestimmt, indem der Mond von möglichst weit voneinander entfernten Orten aus gleichzeitig vor dem Hintergrund des Sternenhimmels fotografiert wird. Auf den Fotos müssen mindestens zwei weitere Himmelsobjekte zu sehen sein, deren Himmelskoordinaten bekannt sind.

Auf den Fotos werden die Positionen des Mondes relativ zu den Referenzobjekten gemessen und ihr Unterschied bestimmt, z. B. indem man die beiden Bilder mit Hilfe der Referenzobjekte „übereinander gelegt“ hat.

Dieser Unterschied ist der gesuchte Parallaxenwinkel p . Die zu diesem Winkel gehörende Basislänge kann nach einer der drei folgenden Methoden bestimmt werden:

1. Der lineare Abstand Δ_{lin} der beiden Orte wird berechnet, indem zunächst ihr Winkelabstand d mit dem Seitenkosinussatz aus ihren geografischen Koordinaten bestimmt wird (s. Kasten 1).

Der lineare Abstand ergibt sich dann folgendermaßen:

$$\sin \frac{d}{2} = \frac{\Delta_{\text{lin}}}{2R_E} \Rightarrow \Delta_{\text{lin}} = 2R_E \sin \frac{d}{2}$$

Nimmt man vereinfachend an, dass die Verbindungsstrecke senkrecht auf der Richtung zum Mond steht, $\Delta_{\perp} = \Delta_{\text{lin}}$, kann die Mondentfernung d_M gemäß

$$\sin \frac{p}{2} = \frac{\Delta_{\perp}}{d_M}$$

berechnet werden. Da p ein kleiner Winkel ist, vereinfacht sich diese Beziehung zu

$$d_M = \frac{\Delta_{\perp}}{p},$$

wenn der Parallaxenwinkel im Bogenmaß angegeben wird.

2. Die in 1. gemachte Annahme trifft im Allgemeinen nicht zu (Abb. 21). Die Richtung der Verbindungsline kann am einfachsten dadurch berücksichtigen, dass man die beiden Orte in ein Bild einträgt, das die Erde aus der Sicht des Mondes zum interessierenden Augenblick darstellt (vgl. Abb. 12). Die Länge der Verbindungsstrecke auf diesem Bild entspricht gerade Δ_{\perp} .

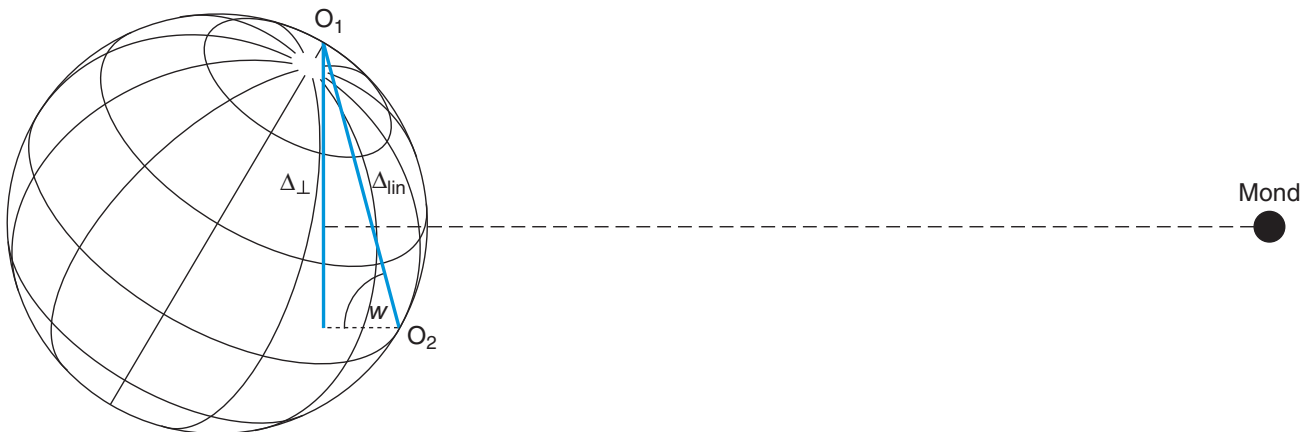


Abb. 21: Die Basislänge einer Parallaxenmessung am Mond

3. Zur exakten Berechnung der Mondentfernung aus den Messdaten ist ein wenig Vektorrechnung erforderlich (Abb. 22):
 - a) Bestimme die Ortsvektoren der Beobachtungsorte und des Mondes in demselben Koordinatensystem. Dazu sind Rektaszension α und Deklination δ geeignet, die in kartesische Koordinaten umgewandelt werden:

$$\text{Ort } i: (\alpha_i, \delta_i) \rightarrow \vec{r}_i = R_E(x_i, y_i, z_i)$$

$$\text{Mond } i: (\alpha_{M_i}, \delta_{M_i}) \rightarrow \vec{e}_{M_i} = (x_{M_i}, y_{M_i}, z_{M_i})$$

Kasten 2: Die Messung der Mondentfernung

Die Koordinaten des Mondes müssen aus den bekannten Koordinaten der Referenzobjekte abgeleitet werden. Die Rektaszension der Orte ist gleich der lokalen Sternzeit, $\alpha_i = \theta_i$, die Deklination stimmt mit der geografischen Breite überein: $\delta_i = \varphi_i$ [21].

b) Der Mond muss sich am Schnittpunkt der beiden Sichtlinien

$$\vec{r}_{M_1} = \vec{r}_{M_1} + \lambda \vec{e}_{M_1} \text{ mit } \lambda > 0$$

$$\vec{r}_{M_2} = \vec{r}_{M_2} + \mu \vec{e}_{M_2} \text{ mit } \mu > 0$$

befinden. Daraus ergibt sich ein System aus drei Gleichungen, das nur zwei Unbekannte enthält. Es wird im Allgemeinen nicht lösbar sein, weil sich Geraden im dreidimensionalen Raum im Allgemeinen nicht schneiden.

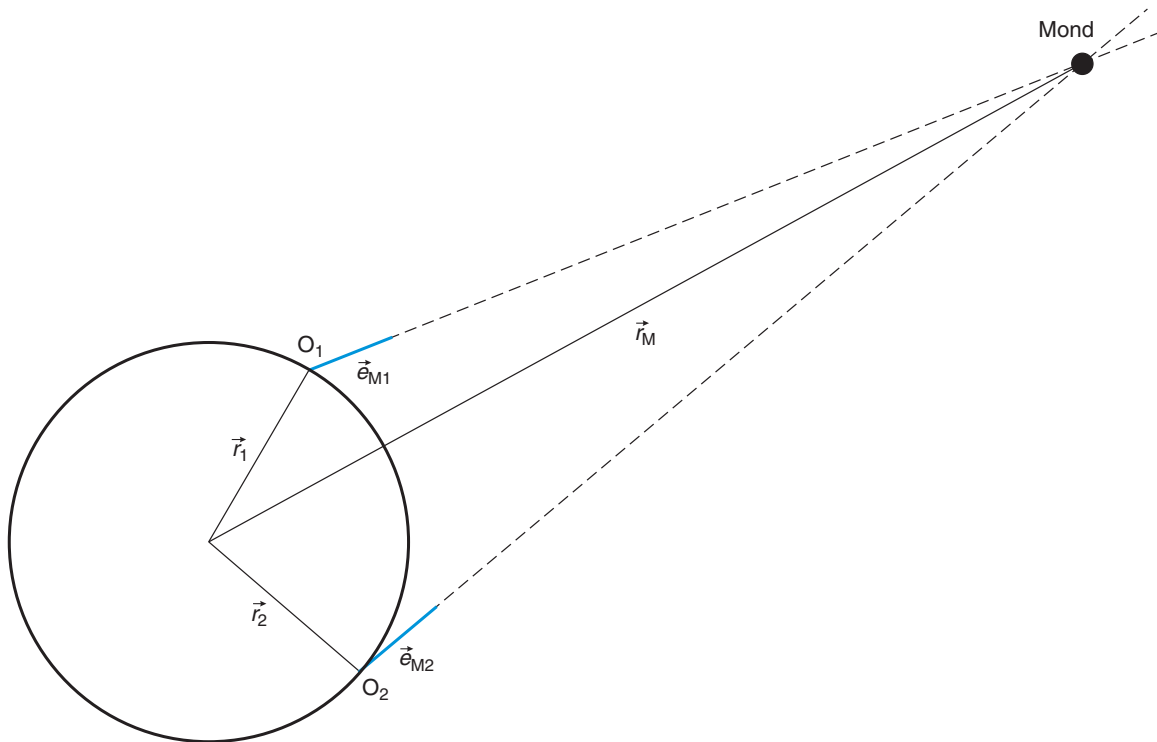


Abb. 22: Zur Bestimmung der Mondentfernung mit Hilfe der Vektorrechnung

c) Ersatzweise wird nach der Stelle gesucht, an der die beiden Sichtlinien ihren minimalen Abstand annehmen, d. h. nach einer Geraden, die beide Sichtlinien senkrecht schneidet. Aus dieser Bedingung ergibt sich ein System aus zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten. Seine Lösungen lassen sich aus den folgenden Gleichungen berechnen:

$$\lambda + \mu = \frac{(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) \cdot (\vec{e}_2 - \vec{e}_1)}{1 - \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2},$$

$$\lambda - \mu = \frac{(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) \cdot (\vec{e}_2 + \vec{e}_1)}{1 + \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2}$$

Die beiden Unbekannten lassen sich damit gemäß $2\lambda = (\lambda + \mu) + (\lambda - \mu)$ und $2\mu = (\lambda + \mu) - (\lambda - \mu)$ berechnen. Die Entfernung zum Mond ergibt sich damit zu

$$d_M = |\vec{r}_1 + \lambda \vec{e}_1| \\ \approx |\vec{r}_2 + \mu \vec{e}_2|$$

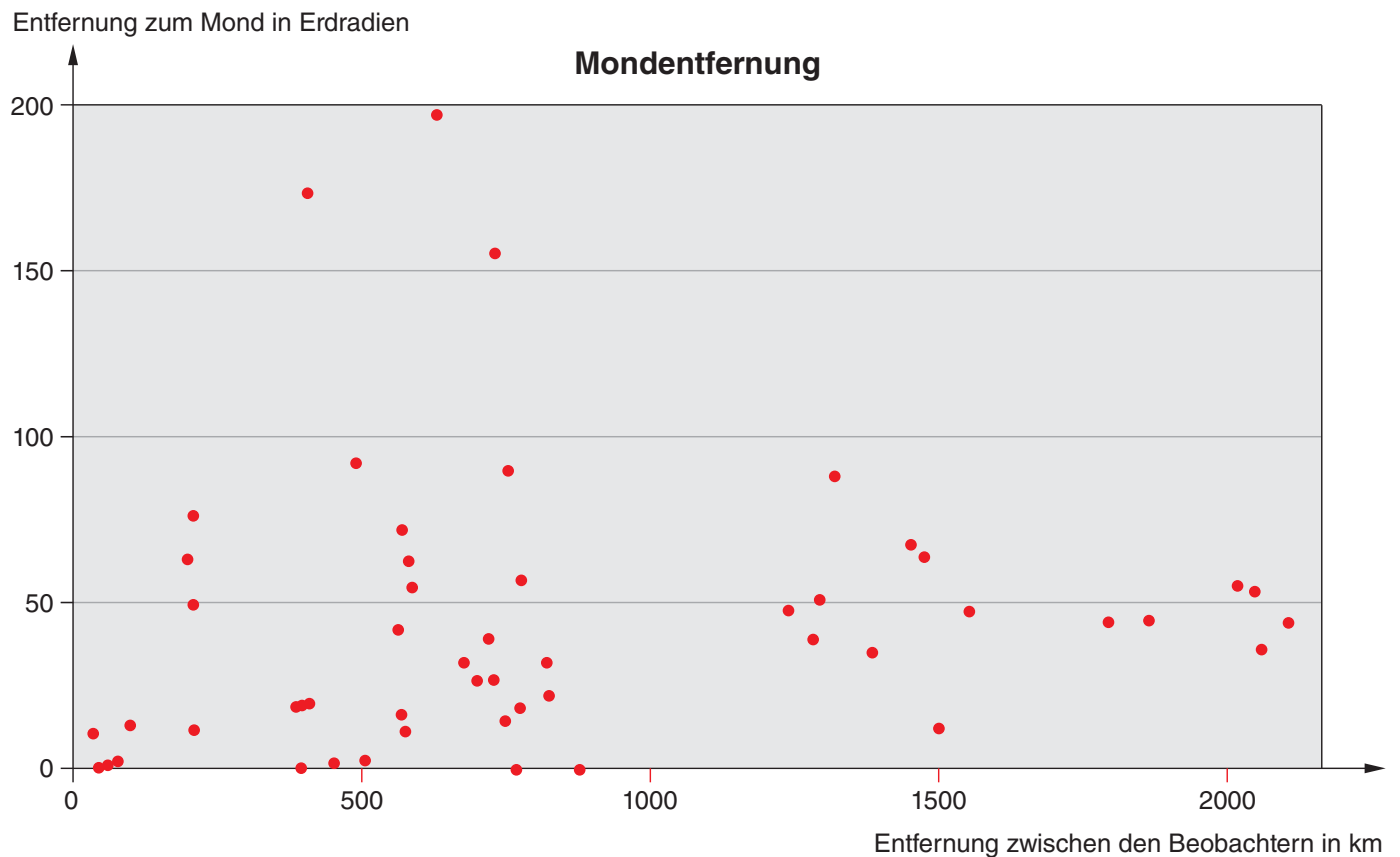


Abb. 16: Grafische Darstellung der Ergebnisse für die Entfernung zum Mond um 20 Uhr UT

verbundenen Schwierigkeiten wurden nicht immer richtig eingeschätzt.

Die Messergebnisse wurden auf den Projektseiten zusammengefasst und auf Tagungen (z. B. [20]) vorgestellt. Trotz der aufgetretenen Probleme sind sie insgesamt so befriedigend ausgefallen, dass sie dazu reizen, ähnliche Messungen zu wiederholen und zu versuchen, zu noch besseren Ergebnissen zu gelangen. Einige der Projektgruppen und Teilnehmer an astronomischen Lehrerfortbildungsveranstaltungen haben sich bereits verabredet, die Projekte in kleinerem Rahmen nachzuvollziehen.

Bei der Messung des Erddurchmessers ist bei der Vorbereitung die sorgfältige Bestimmung der Südrichtung besonders wichtig. Für den Versuch, die Mondentfernung durch Parallaxenmessung zu bestimmen, sollten unbedingt Erfahrungen mit der Fotografie des Mondes und des Sternhimmels gesammelt werden. Die Verabredung geeigneter Zeitpunkte sollte bei weniger Projektpartnern leichter sein als bei der weltweiten Planung für das Internationale Jahr der Astronomie. ■

Literatur

[1] Backhaus, U., Struzyna, S.: *Der Lauf der Sonne über den Himmel. Die Sonne und von ihr erzeugte Schatten gemeinsam beobachten.* *Grundschule Sachunterricht* 51, 6 (2011) (<http://www.didaktik.physik.uni->

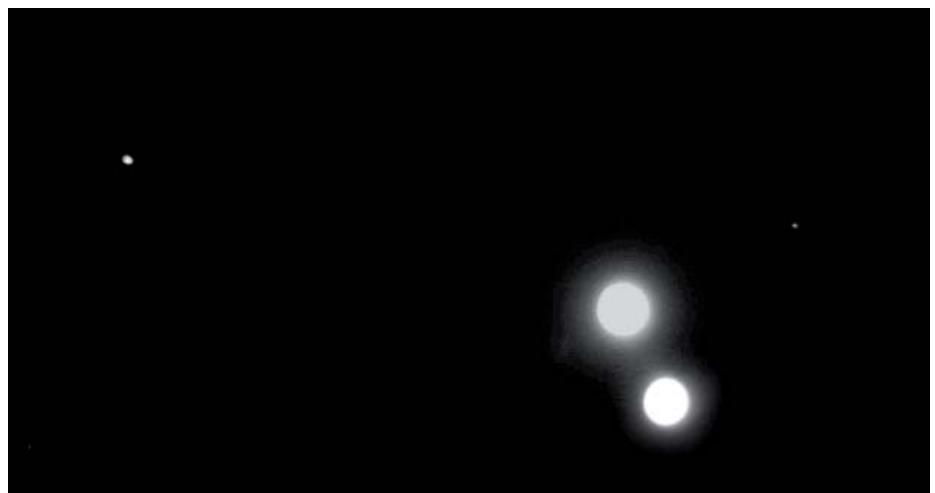


Abb. 17: Der Mond am 9. Dezember 2000 zwischen Jupiter und Saturn, von Koblenz und Namibia aus gleichzeitig fotografiert.

[due.de/~backhaus/publicat/Sonnenartikel.pdf](http://www.backhaus/publicat/Sonnenartikel.pdf)
 [2] *Impressionen vom IYA2009-Sonnenprojekt:* <http://www.didaktik.physik.uni-due.de/IYA2009/IYA2009-Sunimpressions.html>
 [3] *Bilder von der Wanderung des Sonnenuntergangspunktes im Laufe eines Jahres sind zu finden unter* <http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/Sonnenuntergaenge/>
 [4] Wagenschein, M.: *Die Erfahrung des Erdballs,* <http://www.martin-wagenschein.de/Archiv/W-010.pdf>
 [5] Wagenschein, M.: *Mathematik aus der Erde (Geo-metrie)* (<http://www.martin-wagenschein.de/Archiv/W-154.htm>)

[6] Backhaus, U., Lindner, K.: *Astronomie plus,* Comelsen: Berlin 2007
 [7] Backhaus, U.: *Die Entfernung des Mondes und die Gestalt der Erde – Zwei internationale Beobachtungsprojekte im Rahmen des Internationalen Jahres der Astronomie 2009.* *Vorträge der DPG 2009 in Bochum* ([http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/publicat/Mondentfernung\(DD_o8_o2\).pdf](http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/publicat/Mondentfernung(DD_o8_o2).pdf))
 [8] *Homepage des IYA2009-Projektes „The position of the Sun and the shape of the Earth“* <http://www.didaktik.physik.uni-due.de/IYA2009/IYA2009-SunsPosition.html>

[9] Zapp, R.: Professor bestimmt Erdradius von Hand, Pflichtlektüre vom 15. 7. 2009

<http://www.pflichtlektuere.com/15/07/2009/professor-bestimmt-erdradius-von-hand/>

[10] <http://www.didaktik.physik.uni-due.de/IYA2009/details.html>

[11] Winkelheide, M.: Die Vermessung der Erde – Live-Experiment vermittelt Erdumfang. Leonardo, WDR5 am 24. 4. 2009,

[http://www.wdr5.de/sendungen/leonardo/s.html?tx_wdr5ppfe_pi1\[showUid\]=3575338&tx_wdr5ppfe_pi1\[beitragsUid\]=19878&cHash=34242f16b1](http://www.wdr5.de/sendungen/leonardo/s.html?tx_wdr5ppfe_pi1[showUid]=3575338&tx_wdr5ppfe_pi1[beitragsUid]=19878&cHash=34242f16b1)

[12] Vornholz, U., Backhaus, U.: Wie lang ist Sylt? Oder: Wie bestimmt man auf Sylt den Erdradius?, *Astronomie und Raumfahrt* 33/3, 32 (1996) <http://www.didaktik.physik.uni-duisburg-essen.de/~backhaus/AstroMaterialien/Literatur/EratosthenesaufSylt.pdf>

[13] Backhaus, U., Struzyna, S.: „Der Mond kommt still gegangen...“. Kinder lernen die verschiedenen Phasengestalten und die Bewegung des Mondes kennen. *Grundschule Sachunterricht* 51, 13 (2011) <http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/publicat/BeobachtungenamMond.pdf>

<http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/publicat/BeobachtungenamMond.pdf>

[14] Wagenschein, M.: Verdunkelndes Wissen <http://www.martin-wagenschein.de/Archiv/W-171.pdf>

[15] Praktikumsversuch „Die Entfernung des Mondes“ (mit Hilfe eines Fotos einer partiellen Mondfinsternis)

(<http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/AstroPraktikum/Mondentfernung/Mondentfernung.pdf>)

[16] Wagenschein, M.: Wie weit ist der Mond von uns entfernt? (1962), in: *Naturphänomene sehen und verstehen*, 2. korrigierte Auflage, Klett: Stuttgart 1988

(<http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/AstroMaterialien/Literatur/WagenscheinWieweitistderMondvonunsentfernt.pdf>)

[17] Homepage des IYA2009-Projektes „The distance to the Moon“

<http://www.didaktik.physik.uni-due.de/IYA2009/IYA2009-MoonsParallax.html>

[18] Homepage des Projektes „Simultaneously

photographing of the Moon and determining its Distance“ (<http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/moonproject.htm>)

[19] Backhaus, U.: Simultaneously Photographing of the Moon. Vorträge der DPG 2001 in Bremen <http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/publicat/moonproject.pdf>

[20] Backhaus, U.: Die Entfernung der Erde und die Größe der Erde. Ergebnisse zweier internationaler Beobachtungsprojekte. Vorträge der DPG 2010 in Hannover

(<http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/download/219/278>).

[21] Die Bestimmung der Ortskoordinaten wird ausführlich erläutert in

<http://www.didaktik.physik.uni-due.de/IYA2009/IYAParallaxe.pdf>

Anschrift des Verfassers

Prof. i. R. Dr. Udo Backhaus, Fakultät für Physik der Universität Duisburg-Essen, 45117 Essen
E-Mail: Udo.backhaus@uni-due.de

Interaktive Forschungssimulationen

Ein simuliertes Labor für molekulare Quantenphysik zur Nutzung im Internet

M. Tomandl, C. M. Losert Valiente-Kroon, M. Hopf, M. Arndt

1 Moderne quantenphysikalische Forschung im Unterricht

Die Einbindung der Quantenphysik und ihrer für unser Weltbild oft verblüffenden Konsequenzen in den schulischen Unterricht bringt mehrere Herausforderungen mit sich. So erfordert die Beschreibung vieler Phänomene der Quantenphysik mathematische Werkzeuge, die üblicherweise über die Schulmathematik hinausgehen; Demonstrationsexperimente sind aufgrund der hohen Anschaffungskosten nur in wenigen Ausnahmefällen an Schulen vorhanden. Da weder der experimentelle noch der mathematische Zugang einfach sind, wird in der Praxis meist der Ausweg über den historischen Kontext gesucht.

Auf diesem Weg werden vorwiegend die Entwicklungen des frühen 20. Jahrhunderts thematisiert und Quantenphysik wird kaum mit aktueller Forschung assoziiert.

Der Sammelbegriff „moderne Physik“ in diesem Kontext suggeriert, dass es seither kaum neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Physik gegeben hätte. Die Quan-

tenphysik ist heute jedoch eine experimentell präzise bestätigte Beschreibung der Natur, auf deren Verständnis unzählige technologische Errungenschaften beruhen, die aus dem Alltag kaum wegzudenken sind. Aufgrund dieser Erfolge ist die quantenphysikalische Forschung heute ein sehr aktives Feld moderner Wissenschaft. Im Schulunterricht ist sie dennoch deutlich unterrepräsentiert.

In der Lehre an Universitäten ist der Bezug zu moderner Forschung naturgemäß stärker, aber auch hier muss man meist auf Illustrationen von Experimenten, Graphen von Messergebnissen oder mathematische Zusammenhänge zurückgreifen, da reale Experimente zu komplex und zu teuer sind.

Problembasiertes, experimentell suchendes Lernen im Kontext moderner Wissenschaft lässt sich in all diesen Ansätzen nicht etablieren. Es ist daher ein wichtiges Ziel, mit neuen computergestützten Methoden die Möglichkeit zu schaffen, Lernende aktiv an quantenphysikalischer Forschung teilhaben zu lassen.

2 Technologiebasierte Methoden zur Vermittlung von Quantenphysik

Das Interesse an interaktiven, technologiebasierten Medien für naturwissenschaftlichen Unterricht ist mit der Verbreitung von Breitbandinternet sowie der Verfügbarkeit von Laptops und mobilen Geräten in den letzten Jahren stark gewachsen. Eine Vielzahl von Beiträgen zur Physik umfasst Simulationen, Applets und interaktive Bildschirmexperimente.

Physik Applets (Physlets) und interaktive Simulationen (SIMS) ermöglichen vorwiegend die abstrahierte Darstellung und virtuelle Interaktion mit naturwissenschaftlichen Phänomenen und einem verknüpften Modell. Eine überschaubare Auswahl an Simulationen behandelt auch Themen der Quantenphysik [1-3].

Interaktive Bildschirmexperimente (IBE) [4] sind virtuelle Repräsentationen von Lehxperimenten, die durch die fotografische Darstellung besonders authentisch sind. Sie erlauben die Interaktion mit einem Experiment, das Variieren von Para-