

Simultaneously Photographing of the Moon*

Udo Backhaus, Universität Koblenz

Im Rahmen eines internationalen Projektes wird durch gleichzeitiges Fotografieren des Mondes und des Nachthimmels von weit entfernten Positionen der Erde aus didaktisches Material gesammelt, anhand dessen die Kugelgestalt der Erde und die endliche Entfernung des Mondes visualisiert und, in einem zweiten Schritt, auch quantitativ bestimmt werden kann.

1 Einleitung

Wagenschein hat sich immer wieder und in eindrucksvoller Weise mit astronomischen Phänomenen auseinandergesetzt. Dabei versuchte er, seine Schüler und Studenten dazu zu bringen, ihr eigenes „Wissen“ zu hinterfragen und der Frage nachzugehen, „woher die Menschheit so etwas (wie z.B. die ungeheuren Entfernungen im Weltall) wissen kann“:

Der Mond übertrifft in der Kunst des Mitlaufens alle irdischen Dinge. Jeder noch so ferne Horizont ist noch nahe, verglichen mit ihm, noch ganz vorn vor dem riesigen Abgrund (die Breite des Neckartales ist nichts dagegen), der ihn von und trennt. (Richtiger: Dass sein Abstand so riesig ist, erkennen wir daran, daß er so perfekt mitläuft wie nichts Irdisches.) (Kinder und der Mond, [5], S.275)

Wagenschein macht hier darauf aufmerksam, dass alle Entfernungen am Himmel so groß sind, dass alle alltäglichen Methoden zur Abstandsmessung oder -abschätzung versagen. Das unbeobachtbare Zurückbleiben aller himmlischen Objekte, sogar des Mondes, hinter der eigenen Bewegung, die fehlende *Parallaxe* also, lässt sich nur im Falle des Mondes doch noch sichtbar machen, indem man die eigene Bewegung auf der Erde durch gleichzeitige Beobachtung des Himmels von verschiedenen Stellen der Erde aus ersetzt. Anhand zweier Zeichnungen (Abb. 1) erläuterte Wagenschein, dass für einen Beobachter in Kapstadt nicht nur der ganze Himmel auf dem Kopf steht (weil er selbst „auf dem Kopf steht“), sondern dass für ihn der Mond dichter an nördliche Nach-

barsterne herangerückt ist als für einen Beobachter in Berlin: Der Mond ist bei der fiktiven Reise nach Süden *nach Norden zurückgeblieben*.

Als Wagenschein diesen Effekt 1962 beschrieb, gab es noch keine einfache Möglichkeit, das Gedankenspiel in die Tat umzusetzen. Meines Wissens gibt es bis heute – von Sonnenfinsternisfotos vielleicht abgesehen – keine Abbildung 1 entsprechenden Bilder, die die Parallaxe des Mondes, seine endliche Entfernung also, dem aufmerksamen, aber unvoreingenommenen Betrachter *sichtbar* machen.

2 Ziele des Projektes

Im November 2000 verabredeten sich mehrere Gruppen von Schülern, Physiklehrern und Studenten aus Europa (Portugal, Teneriffa, Bulgarien, Schweden, Finnland und Deutschland) und Afrika (Namibia), den Mond gleichzeitig zu fotografieren. Die Idee zu diesem Projekt entstand im November 2000 auf dem europäischen Physikfestival „Physics On Stage“ ([3]) in Genf, an dem einige der Teilnehmer als Delegierte verschiedener Länder teilnahmen.

Neben der Bildung und Pflege internationaler Kontakte und dem Einüben weltweiter Kooperation via Internet haben sich die Projektpartner zunächst die folgenden Ziele gesetzt:

1. Mit Hilfe gleichzeitig aufgenommener Fotos markanter Sternbilder über dem Horizont soll die unterschiedliche Orientierung der Fotografen „sichtbar“ gemacht und auf diese Weise ein direkter Eindruck von der Kugelgestalt der Erde *von innen heraus* vermittelt werden.

*VortrÄage der DPG 2001 in Bremen

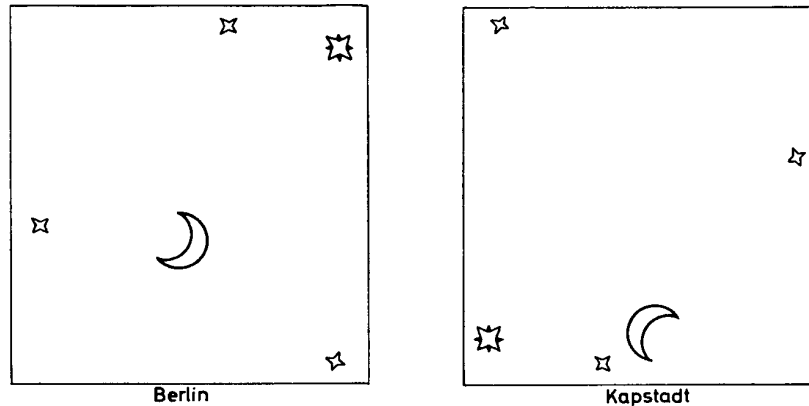


Abbildung 1: Der Mond, gleichzeitig von Berlin und Kapstadt aus beobachtet (Wagenschein, „Wie weit ist der Mond von uns entfernt?“, S. 302ff)

2. Gleichzeitig aufgenommene Fotos des Mondes in der Nähe heller Planeten oder Sterne sollen die parallaktische Verschiebung des Mondes sichtbar machen und auf diese Weise einen visuellen Nachweis dafür liefern, dass der Mond, der „viel weiter als alles Irdische“ entfernt ist, doch eine endliche Entfernung hat.
3. Die Fotos sollen mit dem Ziel, den Radius der Erde und die Entfernung des Mondes zu bestimmen, ausgehend von einfachen, auch Schülern der Sekundarstufe I zugänglichen, Verfahren mit zunehmend exakten Methoden quantitativ ausgewertet werden.
4. Die entstandenen Materialien sollen allen Teilnehmern an dem Projekt der Öffentlichkeit als Material für eigene Auswertungsversuche zugänglich gemacht werden.

Die Aktivitäten werden von Koblenz aus koordiniert. Dort werden auch die Ergebnisse ins Internet gestellt ([2]).

3 Das Verfahren

Um das „Zurückbleiben“ des Mondes sichtbar zu machen, soll der Mond gleichzeitig so fotografiert werden, dass seine Positionsveränderung relativ zum (als unendlich fern angenommenen) Stern- oder Planetenhintergrund erkennbar wird. Um die Position eindeutig erkennen zu können, müssen mindestens zwei Bezugspunkte sichtbar

sein. Dabei entsteht das Problem, dass der Mond nur selten an hellen Sternen vorbeikommt. Fotos zeigen dann entweder den Mond richtig belichtet, dafür aber keine Sterne, oder einige erkenn- und identifizierbare Sterne, dann aber den Mond stark überbelichtet.

Die Idee war deshalb, die enge Nachbarschaft von Jupiter und Saturn am Himmel in den Jahren 2000/20001 auszunutzen, um die Stellung des Mondes zu fotografieren, wenn er an den beiden Planeten vorüberwandert. Nach der Tagung in Genf boten sich dafür die Termine 9. Dezember 2000, 6. Januar, 2. Februar und 1. März 2001 an, von denen wir nur den 2. Februar ausgelassen haben. Zusätzlich ergab sich eine günstige Gelegenheit bei der Mondfinsternis am 9. Januar, bei der die Helligkeit des total verfinsterten Mondes so stark herabgesetzt war, dass die Sterne der Umgebung leicht gleichzeitig abzubilden sein sollten.

Die genaue Synchronisation der Aufnahmen ist heute per email und mit Funkuhren kein Problem mehr. Um trotz der Unwägbarkeiten des Wetters die Chance für simultane Aufnahmen so groß wie möglich zu machen, verabredeten wir, in einem Zeitraum von 1-2 Stunden jede Viertelstunde drei Aufnahmen mit unterschiedlichen Belichtungszeiten zu machen. Als geeignete Brennweiten wurden $f = 100\text{mm} - 150\text{mm}$ vorgeschlagen¹.

¹Der genaue Wert der Brennweite ist nicht entscheidend, weil die Aufnahmen beim späteren Vergleich ohnehin auf gleichen Maßstab skaliert werden.

4 Erste Ergebnisse

Das europäische Wetter erwies sich als sehr ungünstig für unser Vorhaben. Am 9. Dezember lagen ganz Skandinavien und Portugal unter dichten Wolken, und in Deutschland war die Sicht auf den Mond durch hohe Schleierbewölkung stark beeinträchtigt. Trotzdem entstanden an diesem Tag die meisten Vergleichsaufnahmen. Das Wetter an den anderen Terminen erwies sich als noch ungünstiger², und auch die Mondfinsternis fand nur für wenige Orte an einem Himmel statt, der es erlaubte, den Mond mit seinem Sternumfeld zu fotografieren.

Die Versuche, die unterschiedliche Orientierung der verschiedenen Beobachter durch Fotos von Orion über dem lokalen Horizont zu dokumentieren, hat bisher noch zu keinen überzeugenden Ergebnissen geführt.

Am 9. Dezember entstanden jedoch zum Vergleich geeignete Aufnahmen mit großer nord-südlicher Basis (Koblenz/Süderdeich und Namibia) und großer ost-westlicher Basis (Bulgarien/Teneriffa).

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen den Mond am 9. Dezember um 21.00 UT, wie er sich den Fotografen in Koblenz und Namibia darstellte. Auf beiden Bildern sind Jupiter und Saturn als helle Punkte deutlich zu erkennen. Auf den ersten Blick fällt auf, dass sich der Mond einmal unterhalb der Verbindungslinie und ein mal oberhalb davon befindet: Der Fotograf in Namibia stand auf dem Kopf – oder war es der Beobachter in Koblenz (vgl. Abb. 1)? Eins der Bilder muss also um ungefähr 180° gedreht werden, damit sich Norden im Bild ungefähr oben befindet³.

Deutlich ist die unterschiedliche Konstellation Jupiter-Mond-Saturn ist zu erkennen: Ist das Dreieck von Koblenz aus betrachtet nahezu rechtwinklig, weist es von Namibia aus deutlich einen stumpfen Winkel auf: *Der Mond reagiert auf die Ortsveränderung auf der Erde nach Süden mit einem nördlichen Zurückbleiben!* Noch deutlicher wird diese parallaktische Bewegung des Mondes, wenn man die beiden Bilder so übereinanderlegt, dass Jupiter und Saturn jeweils zur Deckung kommen (Abb. 4)⁴: Die Verrückung ist etwa doppelt so groß wie der Monddurchmesser! Diese

Positionsänderung entspricht gerade dem parallaktischen Winkel, dessen Zustandekommen in Abbildung 5 veranschaulicht wird.

Noch größer – und wegen des besseren Wetters deutlicher – ist der Effekt beim Vergleich zwischen Schleswig-Holstein und Namibia (Abb. 6). Eine Kombination von Bildern aus Namibia und Nordschweden ($65^\circ n.B.!$) ist leider bisher nicht gelungen. Ein Vergleich zwischen Bildern aus Bulgarien und Teneriffa (Abb. 7) zeigt eine deutliche ost-westliche Bewegung des Mondes.

5 Vorläufige Auswertung

Als Beispiel einer einfachen Auswertung seien die Bilder aus Koblenz und Namibia vom 9. Dezember, 21.00 UT gewählt:

1. Der Winkelabstand zwischen Jupiter und Saturn betrug 8.79° ⁵.
2. Mit Hilfe dieser Angabe kann der Maßstab der Bilder durch Ausmessen des linearen Abstandes der beiden Planeten, z.B. mit einem Bildbearbeitungsprogramm oder durch Projektion der Dias an die Wand, bestimmt werden. Auf diese Weise ergab sich
 - für Koblenz: $0.0257^\circ/\text{Pixel}$,
 - für Namibia $0.0211^\circ/\text{Pixel}$.
3. Daraus ergibt sich der Winkelabstand zwischen Mond und Jupiter zu 7.76° (Koblenz) bzw. 7.06° (Namibia).
Der Winkelabstand zwischen Mond und Saturn betrug in Koblenz 2.96° und in Namibia 2.30° .
4. Mit diesen Angaben kann eine winkelgetreue Zeichnung der Konstellation Jupiter-Mond-Saturn gezeichnet werden. Wenn man den Mond in derselben Zeichnung zweimal von den beiden Planeten aus „trianguliert“, wird die parallaktische Verschiebung sichtbar und messbar.
Noch eindrucksvoller ist das Verfahren, wenn man die Dias mit zwei Diaprojektoren gleichzeitig an die Wand wirft und

²Für Portugal und Skandinavien blieb der Mond während des ganzen Winterhalbjahres praktisch unsichtbar!

³Bei diesem Termin wurde noch nicht genau darauf geachtet, eine Kante der Kamera parallel zum Horizont auszurichten.

⁴Mit eingescannten Bildern ist das am Computer leicht möglich. Eindrucksvoller aber ist es, wenn es mit zwei Diaprojektoren gelingt.

⁵Dieser Winkel lässt sich recht genau bereits mit einem Jakobsstab, genauer mit einer Sextanten selbst messen. Leider haben wir das bisher nicht zum richtigen Zeitpunkt durchgeführt. Den angegebenen Wert haben wir mit Hilfe des Astronomie-Programmes **Guide 7.0** gewonnen.



Abbildung 2: Der Mond zwischen Jupiter (links) und Saturn, am 9. Dezember 2000 um 21.00 UT von Koblenz aus fotografiert.

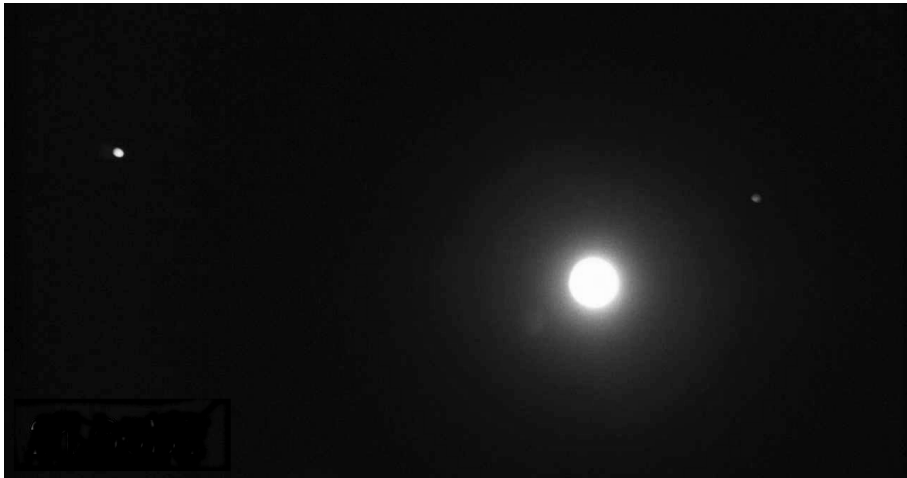


Abbildung 3: Der Mond, zur selben Zeit von Namibia aus beobachtet. Jupiter, der hellere der beiden Planeten, befindet sich auf diesem Bild rechts.

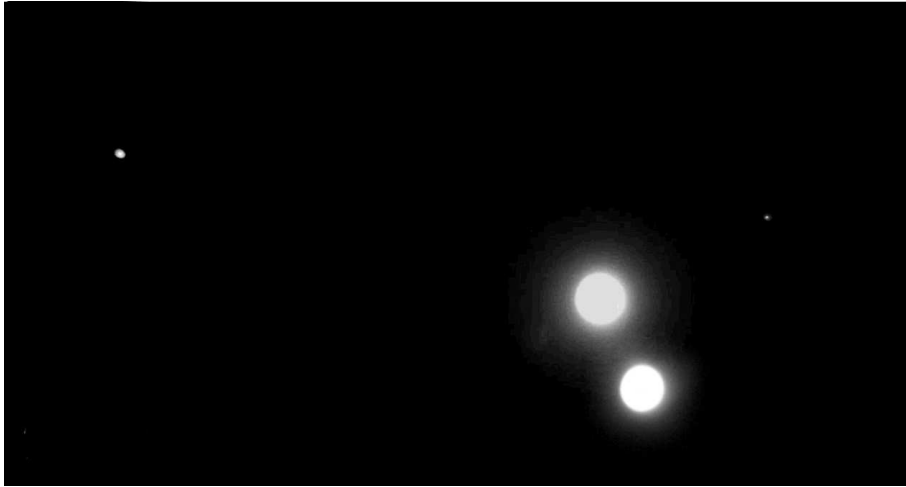


Abbildung 4: Kombination der Abbildungen 2 und 3: Die Bilder wurden so gedreht und skaliert, dass die Bilder von Jupiter und Saturn jeweils zur Deckung kamen und Norden oben ist.

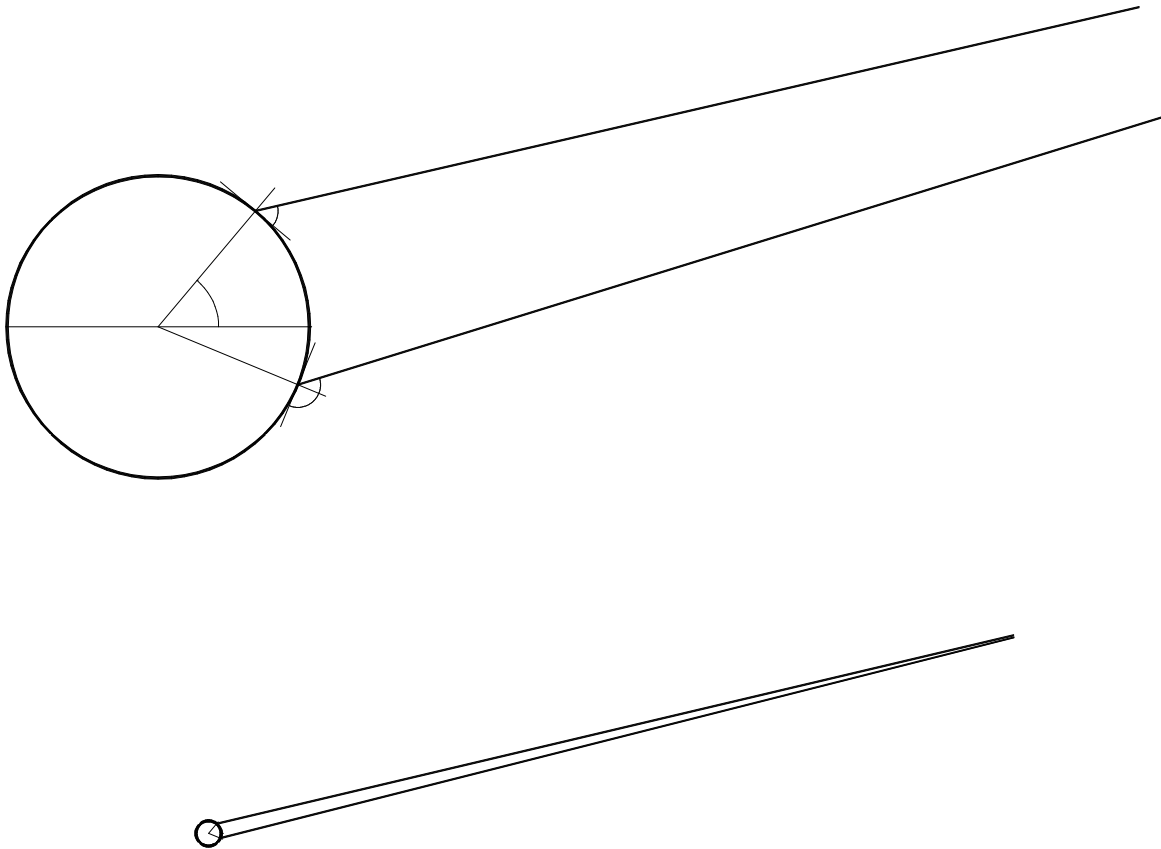


Abbildung 5: Anpeilen des Mondes am 9. Dezember 2000 um 21.00 UT von Koblenz und Namibia aus. Beide Zeichnungen zeigen die Situation maßstabs- und winkelgetreu in verschiedenen Maßstäben.



Abbildung 6: Abbildung 4 entsprechende Kombination zweier simultaner Aufnahmen aus Süderdeich (Schleswig-Holstein) und Namibia



Abbildung 7: Ost-westliche parallaktische Verschiebung des Mondes bezüglich Teneriffa und Bulgarien

durch (etwas mühsame) Drehung und Abstandsänderung die Planeten beider Fotos zur Deckung bringt. Dann entsteht ein Abbildung 4 völlig entsprechender Eindruck.

5. Der parallaktische Winkel ergibt sich durch Ausmessen des kombinierten Bildes zu

$$p = 1.2^\circ. \quad (1)$$

6. Nach einem der folgenden Verfahren berechnet den linearen Abstand Δ zwischen Koblenz und Namibia:

- (a) Man spannt auf einem Globus einen Faden von Koblenz nach Windhoek, setzt seine Länge in Beziehung zum Umfang der Erdkugel und erhält daraus die Winkeldistanz α der beiden Orte.
- (b) Man berechnet die Winkeldistanz der beiden Orte aus ihren geographischen Koordinaten (Koblenz: $\varphi_K = 50.18^\circ$ n.B., $\lambda_K = 7.53^\circ$ ö.L., Windhoek: $\varphi_N = 22.48^\circ$ s.B., $\lambda_N = 14.95^\circ$ ö.L.) mit Hilfe des Seitencosinussatzes der sphärischen Trigonometrie:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \sin \varphi_K \sin \varphi_N \\ &+ \cos \varphi_K \cos \varphi_N \cos(\lambda_K - \lambda_N) \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich die Winkeldistanz zu

$$\alpha = 73.0^\circ. \quad (2)$$

Der *lineare* Abstand Δ , d.h. die Länge der geradlinigen Verbindung der beiden Orte, ergibt sich aus einfachen geometrischen Überlegungen zu

$$\Delta = 2R_E \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (3)$$

7. Betrachtet man das Dreieck Koblenz-Windhoek-Mond als gleichschenkelig, eine Annahme, die sich nach Abbildung 5 als näherungsweise zutreffend erweist⁶, dann ist Δ gleichzeitig der *vom Mond aus beobachtete* Abstand Δ_M der beiden Beobachtungsorte, den man in Abbildung 8 auch direkt ausmessen kann.

Auf diese Weise ergibt sich, dass der Abstand der beiden Beobachtungsorte, vom Mond aus gesehen,

$$\Delta_M = 1.190R_E \quad (4)$$

beträgt.

8. Zwischen Δ_M und der Entfernung d_M des Mondes besteht offensichtlich der folgende Zusammenhang:

$$d_M = \frac{\Delta_M}{\tan \frac{p}{2}} = 56.82R_E. \quad (5)$$

Dieser Wert beschreibt den so genannten *topozentrischen* Abstand des Mondes, seine Entfernung von den beiden Beobachtungsorten⁷ also.

9. Der *geozentrische* Abstand $d_{M_{geoz.}}$ ist etwas größer. Er lässt sich aus

$$d_{M_{geoz.}} = d_M + \sqrt{1 - \left(\frac{1.190}{2}\right)^2} R_E \quad (6)$$

berechnen. Daraus ergibt sich endlich der geozentrische Abstand des Mondes zu

$$d_{M_{geoz.}} = 57.86R_E. \quad (7)$$

Vergleicht man dieses Ergebnis mit dem wahren Wert zum Zeitpunkt der Aufnahmen $d_{geoz.} = 57.74R_E$, den man einem Astronomieprogramm entnehmen kann, dann ergibt sich ein Fehler von

$$\Delta = 0.12R_E = 0.2\% = 809km.$$

⁶Im allgemeinen Fall ist die korrekte Hochrechnung des Parallaxenwinkels p auf die Mondparallaxe, d.h. auf den Winkel unter dem der Erdradius vom Mond aus erscheint, ein kompliziertes dreidimensionales Problem (siehe z.B. [1]). Von Extremsituationen abgesehen führt die Annahme der Gleichschenkligkeit aber auf eine gute (obere) Abschätzung der Mondentfernung.

⁷genauer: der Abstand von der Verbindungsstrecke



Abbildung 8: Die Erde, wie sie sich am 9. Dezember 2000 um 21.00 UT dem Mond darbot.

6 Schlussbemerkungen

Das Ziel, die Kugelgestalt der Erde anhand schöner Aufnahmen des Sternenhimmels über dem Horizont zu veranschaulichen, konnte bisher noch nicht erreicht werden, weil das Wetter immer wieder kurzbreitweitige Fotos verhinderte. Dafür aber haben wir die von Wagenschein geäußerte Idee in die Tat umgesetzt und die endliche Mondentfernung sicht- und messbar gemacht. Für alle Teilnehmer war und ist es ein großes Erlebnis, Teil eines weltumspannenden Projektes zu sein und beim Fotografieren das Gefühl haben zu können, dass im selben Moment Gleichgesinnte an verschiedenen Orten der Erde an demselben Ziel arbeiten.

Es hat sich aber auch gezeigt, dass die Zusammenarbeit noch nicht reibungslos funktioniert: Neben Problemen mit dem Internet-Zugang in einigen Ländern und Sprachschwierigkeiten, die anscheinend mehrere Gruppen veranlassten auszustiegen, ist die größte Herausforderung bei diesem Projekt, trotz vieler Probleme und Rückschläge Motivation und Durchhaltevermögen aufrecht zu erhalten. Diese Aufgabe ist jedoch typisch für alle

langfristigen astronomischen Projekte.

Wir werden versuchen, die Zusammenarbeit im Herbst fortzuführen. Aktuelle Ergebnisse können immer über das WWW erfahren werden ([2]).

Ein weiteres Projekt ist bereits ins Auge gefasst: der Venusdurchgang am 8. Juni 2004!

7 Nachbemerkung

Inzwischen ist ein weiterer günstiger Termin, der 29. März 2001, mit so schlechtem Wetter vorübergegangen, dass noch offen ist, ob überhaupt vergleichbare Aufnahmen zustande gekommen sind.

Literatur

- [1] U. Backhaus, *Measuring the Distance to the Sun*,
<http://www.uni.koblenz.de/~backhaus/aol/finalrep.htm>
- [2] <http://www.uni.koblenz.de/~backhaus/moonproject.htm>⁸

⁸Die Fassung vom 24. April 2001 befindet sich auch auf dieser CD.

- [3] <http://CERN.web.cern.ch/CERN/Announcements/2000/PhysicsOnStage/>
- [4] M. Wagenschein, *Die pädagogische Dimension der Physik*, Westermann: Braunschweig 1971
- [5] M. Wagenschein: *Naturphänomene sehen und verstehen*, Klett: Stuttgart 1988
- [6] M. Wagenschein, *Verstehen lehren*, Beltz: Weinheim 1992