

Abbildung 1: Von Namibia und Essen aus betrachtet hat Venus eine etwas unterschiedliche Position vor der Sonne.

Forschen und forschendes Lernen beim Venustransit 2004

Udo Backhaus
Universität Duisburg-Essen

1. Dezember 2004

Der Venustransit am 8. Juni 2004 bot eine einmalige Gelegenheit, mit Schülern und Studenten historische Probleme bei der Bestimmung der Entfernung zur Sonne nachzuvollziehen, sich mit modernen Methoden der Mess- und Auswertungstechnik und der weltweiten Kommunikation vertraut zu machen und sich forschend in ein zusammenhängendes Gebiet der Astronomie einzuarbeiten.

1 Einleitung

Die Entfernung zur Sonne ist so schwierig zu messen, dass noch zu Beginn des 17. Jahrhunderts ein um den Faktor 20 zu kleiner Wert angenommen wurde. Erst 1672 wurde, allerdings mit einer noch großen Unsicherheit, eine Entfernung gemessen, die in der Nähe des modernen Wertes lag ([8]). In Folge einer Anregung von E. Halley wurden bei den Venustransits 1761, 1769, 1874 und 1882 große Anstrengungen unternommen, durch genaue Beobachtung dieser seltenen Ereignisse zu einem genauen Wert für den Abstand Erde - Sonne, die so genannte Astronomische Einheit, zu gelangen. Bei den Messungen tauchten zahlreiche, z.T. unerwartete, Schwierigkeiten auf. Trotzdem ergab sich aus der sorgfältigen Auswertung aller Beobachtungsdaten für etwa hundert Jahre der genaueste Wert für die Sonnenentfernung.

Um einen Venustransit zur Bestimmung der Sonnenentfernung nutzen zu können, muss er von möglichst vielen weit von einander entfernten Orten auf der Erde aus beobachtet werden, deren geografische Positionen genau bekannt sein müssen. Dabei müssen die von den verschiedenen Orten aus gleichzeitig beobachteten Positionen der Venus vor der Sonne oder die genauen Zeitpunkte des Eintritts und/oder des Austritts der Venus miteinander verglichen werden.

Historisch war die genaue Zeitmessung ein großes Problem. Bei den Durchgängen des 18. Jahrhunderts waren darüber hinaus die geografischen Koordinaten der Beobachtungsorte noch schwierig zu bestimmen. Die astronomische Fotografie steckte Ende des 19. Jahrhunderts noch in den Kinderschuhen. Hinzu kam das unerwartete Phänomen des „schwarzen Tropfens“ (siehe z.B. [8]), das es unmöglich machte, die Kontaktzeiten auf die Sekunde genau zu bestimmen. Aus diesen Gründen konnte nicht die erhoffte Genauigkeit erzielt werden.

Der Vergleich weltweit gewonnener Daten ist heute durch die Möglichkeiten der elektronischen Kommunikation per Telefon, Email oder Internet kein Problem mehr, und die Beobachtungsmöglichkeiten (erst recht die Möglichkeiten zu Fotografie oder Filmaufnahmen) selbst von Schulen und Amateuren sind den historischen wissenschaftlichen ebenbürtig oder überlegen.

Deshalb entstand die Idee, den Venustransit am 8. Juni 2004 zu nutzen, um Schulen, Amateure, Planetarien und wissenschaftliche Institutionen weltweit zur Kooperation anzuregen mit dem Ziel, aus Beobachtungsdaten, die mit relativ einfachen Mitteln selbst gewonnen wurden, zu einem eigenen Wert für die Astronomische Einheit zu gelangen. Dabei sollte im Vordergrund stehen, die Teilnehmer zu gemeinsamen Forschungsaktivitäten zu animieren, internationale Kommunikation (auf Englisch) einzuüben, die historischen Schwierigkeiten bei Messung und Auswertung nachzuvollziehen und ein intensives Einarbeiten in einen größeren zusammenhängenden Problemkreis der Astronomie zu motivieren.

2 Das Projekt

Das Projekt, von dem hier berichtet werden soll ([9]), wurde durch einen Aufruf von U. Uffrecht ([11]) angestoßen und vom Autor zunächst von Koblenz und schließlich von

Essen aus koordiniert. Im Gegensatz zu anderen weltweiten Projekten (siehe insbesondere [5] und [10]), die sich auf die Messung und Auswertung der Kontaktzeiten konzentrierten, zielten unsere Vorbereitungen und Aktivitäten darauf, an verschiedenen Orten der Erde zu *exakt gleichen Zeitpunkten* aufgenommene Fotos zu gewinnen. Wenn man solche Fotos mit gleicher Größe und Orientierung übereinander legt, machen sie den Parallaxeneffekt der Venus direkt sichtbar und erlauben eine mathematisch einfache Auswertung. Die Auswertung gewinnt zusätzlich dadurch an Anschaulichkeit, dass auf genau analoge Weise die Entfernung zum Mond gemessen werden kann ([4]).

Die (einfache) Theorie ist ausführlich in [1] und [2] dargestellt worden. Die eigentliche Messgröße bei diesem Verfahren ist der Abstand $\Delta\beta$ zweier Venusscheibchen, die von verschiedenen Orten aus aufgenommen wurden, genauer: das Verhältnis $f = \frac{\Delta\beta}{\rho_S}$ dieses Abstandes zum Winkelradius ρ_S der Sonne. Der Zusammenhang mit der gesuchten Entfernung d_S zur Sonne wird durch die folgenden beiden Gleichungen hergestellt:

$$d_S = \frac{R_E}{\pi_S} \quad (1)$$

$$\pi_S = \frac{R_E}{\Delta} \frac{1}{\sin w} \left(\frac{r_E}{r_V} - 1 \right) \rho_S f \quad (2)$$

Offensichtlich kann man durch Messung der parallaktischen Verschiebung von Venus nur dann die Entfernung zur Sonne bestimmen, wenn man zusätzlich den Wert der folgenden Parameter kennt:

- den Erdradius R_E ,
- den Abstand der beiden Beobachter als Vielfaches des Erdradius $\frac{\Delta}{R_E}$,
- die Projektion dieses Abstandes in Richtung zur Sonne $\frac{\Delta \sin w}{R_E}$,
- den Bahnradius der Venus als Bruchteil des Erdbahnradius $\frac{r_V}{r_E}$ und
- den Winkelradius der Sonne ρ_S .

Ziel des Projektes war, nicht nur die parallaktische Verschiebung von Venus zu messen, sondern auch alle Größen selbst zu bestimmen, die zur Ableitung der Sonnenentfernung erforderlich sind. Dabei machte nicht nur die Messung von f , sondern auch die Bestimmung des Erdradius und die Messung des Abstandes zweier Beobachtungsorte internationale Kooperationen erforderlich.

An dem Projekt beteiligten sich etwa 100 Personen und Gruppen, die zwar auf Deutschland konzentriert waren, sich aber über die ganze Welt (von Sri Lanka bis Peru und von Schweden bis Südafrika) verteilten. Die meisten Teilnehmer waren Schüler(gruppen) und Lehrer und Amateurastronomen. Es beteiligten sich aber auch einige Planetarien und universitäre Institute.



Abbildung 2: Die Projektgruppe in Isfahan

3 Beispiele für Projektaktivitäten

Der Aufbau eines Netzwerkes, die Messung der zusätzlichen Parameter, die „Generalprobe“ des Merkurtransits im Mai 2003¹ und die Erprobung unterschiedlicher fotografischer Verfahren erforderten eine mehr als zweijährige Vorbereitungszeit. In dieser Zeit entwickelten sich besonders enge Kontakte zwischen Essen (Arbeitsgruppe Didaktik der Physik der Universität und ihre StudentInnen, Don-Bosco-Gymnasium), dem Städtischen Gymnasium Fürstenwalde, der Deutschen Schule in Kairo, einer Schülerinnengruppe der Farzanegan-e Amin High School und dem Hedayat Research Center (HRC) in Isfahan (Abb. 2), Iran, und der Internationalen Amateursternwarte (IAS) auf der Hakos-Farm in Namibia².

Die Schülerinnen und Schüler in Fürstenwalde übersetzten die englischen Projektseiten ins Deutsche und ins Russische, ihre Lehrer Rainer Willer und Enno Hoffmann bauten ein Internetforum auf und ermöglichten so direkte Diskussionen zwischen den Teilnehmern und einen einfachen Austausch von Messdaten, Bildern und Dokumenten. Die Amateure und Lehrer der Sternwarte in Namibia, insbesondere E. v. Grumbkow und K.-L. Bath, beteiligten sich, bereits beim Merkurtransit 2003, intensiv an der Verbesserung der fotografischen Methode und lieferten die besten Vergleichsfotos. Besonders faszinierend war die Zusammenarbeit mit den iranischen Schülerinnen, die intensiv vom HRC, insbesondere M. Akoochekian, betreut wurden und ihrerseits selbstständig mit Indien, Spanien und Mauritius kooperierten. Welche Bedeutung die Möglichkeit zur internationalen Zusammenarbeit für diese Gruppe hatte, kann nur erahnt werden.

¹<http://didaktik.physik.uni-essen.de/~backhaus/Venusproject/mercury2003.htm>

²<http://ias.org>

4 Die parallaktische Verschiebung von Venus

Weil Sonne und Venus am Tage des Transits unterschiedlich weit von der Erde entfernt sind, haben sie relativ zueinander etwas unterschiedliche Positionen, wenn sie von weit entfernten Orten auf der Erde aus gleichzeitig fotografiert werden (s. Abb. 1). Diesen so genannten *Parallaxeneffekt* nutzen wir im täglichen Leben, z.B. beim Zufahren, um die Entfernung unterschiedlicher Objekte der Umgebung miteinander zu vergleichen.

Der Effekt kann aber nur sichtbar gemacht und ausgemessen werden, wenn die Vergleichsbilder exakt denselben Abbildungsmaßstab aufweisen und die Bilder der Sonne genau gleich orientiert sind. Insbesondere die zweite Erfordernis stellt für Amateure ein schwieriges Problem dar, weil die Orientierung der Sonne relativ zum Horizont von Ort auf der Erde abhängt und dem Bild der Sonne die Ausrichtung nicht angesehen werden kann, wenn nicht auffällige Gruppen von Sonnenflecken sichtbar sind. Die Idee zur Überwindung dieses Problems bestand darin, die Fotos im Abstand von 90 oder 120 Sekunden bei feststehender Kamera zweimal zu belichten. Aufgrund der durch die Erddrehung hervorgerufenen Bewegung der Sonne kann dann den Bildern die Richtung zum Himmelsnordpol angesehen werden: Sie muss genau senkrecht zur Verschiebung der beiden Sonnenbilder sein!

Die parallaktische Verschiebung von Venus kann dann mit Hilfe eines Grafikprogrammes am Computer sichtbar gemacht werden. Abbildung 3 zeigt die Bearbeitungsschritte am Beispiel der um 8.00 Uhr UT in Essen und Namibia aufgenommenen Fotos:

oben: Die Negative der Originalfotos werden hochauflösend eingescannt (oben). Die Verschiebungsrichtung der Sonnenbilder ist in Essen um 42.3° , in Namibia um 3.6° gegen die Horizontale geneigt.

2. Zeile: Die Bilder werden so gedreht, dass die Sonnenbilder auf beiden Fotos genau horizontal verschoben sind. Die Radien der Sonnenbilder betragen 424 Pixel (Essen) und 1012 Pixel (Namibia).

3. Zeile: Das Bild aus Namibia wird so verkleinert, dass die Sonnenscheiben auf beiden Bildern denselben Durchmesser haben.

4. Zeile: Beide Bilder werden so beschnitten, dass das linke Sonnenabbild pixelgenau an derselben Stelle auf den Fotos ist.

unten: Durch abschließende Addition der Pixelwerte werden die beiden Bilder zu einem kombiniert. Dabei macht sich leider störend bemerkbar, dass in Essen 120 s, auf Hakos 90 s Zeitdifferenz gewählt wurden.

Die Vergrößerung der überlagerten Sonnenbilder (Abb. 1) zeigt deutlich den Parallaxeneffekt: Von der Südhalbkugel der Erde aus war die Position von Venus auf der Sonnenscheibe weiter nördlich als von der Nordhalbkugel aus.

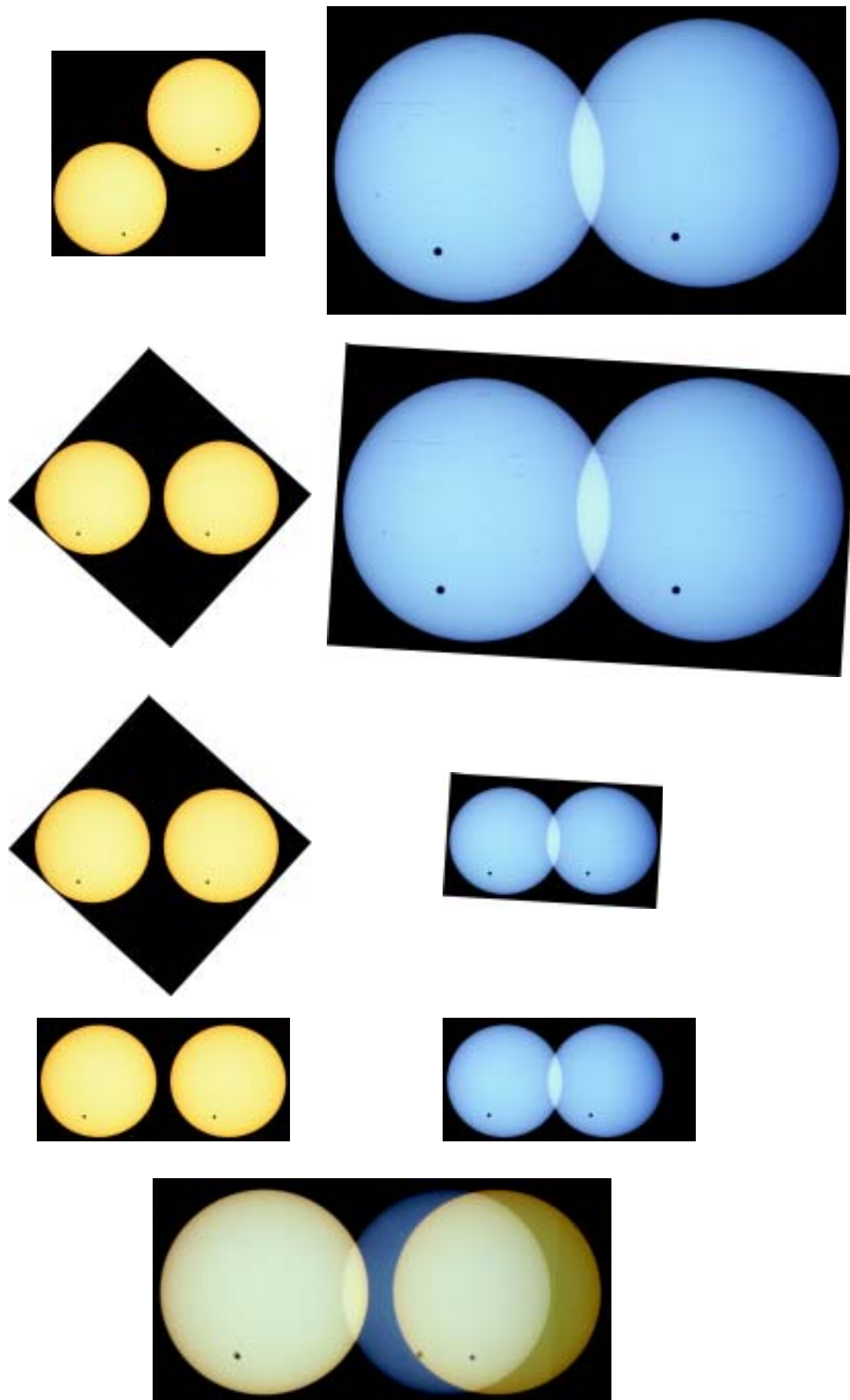


Abbildung 3: Bearbeitungsschritte bei der Kombination von Fotos aus Essen und Namibia

5 Ergänzungen

5.1 Der Radius der Erde

Die Messung des Erdradius³ folgt der Grundidee von Eratosthenes: Misst man in zwei Orten gleicher geografischer Länge λ am selben Tag den Mittagshöchststand der Sonne, dann zeigen die unterschiedlichen Sonnenhöhen h_{M_1} und h_{M_2} an, um wie viel sich die geografischen Breiten der beiden Orte unterscheiden: $\Delta\varphi = \Delta h_M$. Kennt man dann noch die Entfernung d zwischen den Orten, dann lässt sich der Erdradius berechnen:

$$\lambda_1 = \lambda_2 : \quad d = R_E \Delta\varphi = R_E \Delta h_M \quad \Longrightarrow \quad R_E = \frac{d}{\Delta h_M} \quad (3)$$

Das Verfahren lässt sich leicht auf Orte gleicher geografischer Breite übertragen, wenn man am selben Tag die genauen Zeitpunkte des lokalen Mittags misst. Da einer Zeitdifferenz von einer Stunde ein Längenunterschied von 15° entspricht, ergibt sich in dieser Situation der Erdradius folgendermaßen:

$$\varphi_1 = \varphi_2 : \quad d = R_E \cos \varphi \Delta\lambda = R_E \cos \varphi \Delta t_M \frac{2\pi}{T} \quad \Longrightarrow \quad R_E = \frac{d}{\cos \varphi \Delta t_M} \frac{T}{2\pi} \quad (4)$$

Der Faktor $\cos \varphi$ ergibt sich, weil der Breitenkreis um diesen Faktor kürzer als der Äquator ist.

Das Verfahren lässt sich auch auf den Fall erweitern, dass sich die beiden Beobachtungsorte sowohl in der geografischen Breite, als auch in ihrer geografischen Länge unterscheiden. In diesem Fall müssen sowohl der Mittagszeitpunkt, als auch die Mittagshöhe der Sonne gemessen werden. Der Erdradius ergibt sich dann aus dem Seitencosinussatz der sphärischen Geometrie, wenn die geografische Breite eines der Orte bereits bekannt ist.

Auf diese Weise wurde am Tage des Transits der Winkelabstand zwischen Isfahan und Essen gemessen und daraus der Erdradius bestimmt (s. Abb. 4):

- In Essen erreichte die Sonne ihren Höchststand um 11:31:00 Uhr UT. Ihre Mittagshöhe betrug $h_M = 61.22^\circ$.
- In Isfahan kulminierte die Sonne um 8:26:57 Uhr UT mit einer Höhe von $h_M = 78.48^\circ$.
- Folgerungen:
 - Die unterschiedliche Kulminationshöhe ergibt direkt den Unterschied in den geografischen Breiten der Beobachtungsorte:

$$\Delta\varphi = 78.48^\circ - 61.22^\circ = 17.26^\circ \quad (5)$$

³<http://didaktik.physik.uni-essen.de/~backhaus/Venusproject/earthsradius.htm>



Abbildung 4: Bestimmung des lokalen Mittagszeitpunktes am 8. Juni 2004 in Essen (links) und in Isfahan

- Aus den um 3:04:03h verschiedenen Mittagszeitpunkten ergibt sich eine Längendifferenz von

$$\Delta\lambda = \Delta t \cdot \frac{15^\circ}{h} = 46.0^\circ \quad (6)$$

- Die geografische Position von Essen hatten wir, ebenfalls durch Messungen mit dem Schattenstab, bereits in der Vorbereitungszeit sorgfältig bestimmt:

Essen: $\varphi = 51.5^\circ$ n.B., $\lambda = 7.0^\circ$ ö.L.

Mit den Mittagsmessungen haben wir deshalb auch die geografische Position von Isfahan bestimmt – in sehr guter Übereinstimmung mit dem wahren Wert⁴:

Isfahan: $\varphi = 32.8^\circ$ n.B., $\lambda = 52.87^\circ$ ö.L.

- Mit dem Seitencosinussatz

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

lässt sich daraus die Winkeldistanz η zwischen Essen und Isfahan berechnen:

$$\eta = 37.9^\circ \quad (7)$$

- Die Entfernung zwischen Essen und Isfahan konnten wir leider nicht selbst „erfahren“, sondern mussten sie uns im Internet ⁵ berechnen lassen. Sie beträgt danach 4215 km.

Damit ergibt sich für Umfang U_E und Radius R_E der Erde⁶:

$$U_E = \frac{4215km}{37.94^\circ} 360^\circ \implies R_E = \frac{U_E}{2\pi} = 6365km$$

⁴Die Schülerinnen der Farzanegan-e Amin High School hatten ihre geografische Breite auch bereits im Vorfeld gemessen: $\varphi = 32.85^\circ$. Die korrekte, mit GPS bestimmte Position des K1-Observatoriums ist $\varphi = 32.85^\circ$, $\lambda = 52.78^\circ$.

⁵<http://dxing.de/entfernungen.de> Vermutlich werden dort aber die Entfernungen mit dem bekannten Radius der Erde aus den Koordinaten berechnet.

⁶Der Erdradius wurde von den Schülerinnen in Isfahan in Kooperation mit Santa Cruz auf La Palma ein weiteres Mal bestimmt. Das Ergebnis: $R_E = 6288km$ (s. http://www.hrcglobal.net/astro/astro_venus2004_result.asp). Der Versuch der Schüler des Don-Bosco-Gymnasiums in Essen, eine selbst zu fahrende Strecke von nur 100 km Länge als Basis zu benutzen, scheiterte zunächst an der noch nicht ausreichenden Messgenauigkeit.

5.2 Der Bahnradius der Venus

Der Bahnradius der Venus lässt sich am leichtesten messen, indem man den sich ändernden Winkelabstand zwischen Sonne und Venus verfolgt und sein Maximum bestimmt⁷. In Fürstenwalde und in Essen haben wir diesen Maximalabstand im Januar 2003 und im März 2004 gemessen: Beide Male fanden wir einen Wert von etwa 47° und damit einen Venusbahnradius von

$$\frac{r_V}{r_E} = \sin 47^\circ \implies r_V = 0.73AE.$$

Die Schülerinnen der Farzanegan-e Amin High School in Isfahan sind durch Positionsmessungen an Venus am 22. Mai und am 12. Juni 2004 zu demselben Ergebnis gekommen ([7]).

6 Die Entfernung zur Sonne

Die Ausmessung des überlagerten Bildes 1 ergibt, dass die beiden Venusscheibchen um 13 Pixel gegeneinander verschoben sind. Der Radius der Sonnenscheibe beträgt 423 Pixel, der Parallaxeneffekt also $f = \frac{13}{423} = 0.031$ Sonnenradien.

Der Winkelradius der Sonne kann aus der Verschiebung der beiden Sonnenbilder bestimmt werden, wenn die genaue Zeitdifferenz bekannt ist⁸. Als Mittelwert aus allen unseren Doppelbelichtungen ergab er sich zu $\rho_S = 15.8'$. Damit beträgt die parallaktische Verschiebung der Venus $\Delta\beta = \rho_S f = 29.2''$.

Zur schnelleren und genaueren Ausmessung der Bilder wurde den Teilnehmern ein kleines Computerprogramm zur Verfügung gestellt. Es ermöglicht, durch Anpassen von Kreisen an die Sonnen- und Venusbilder am Bildschirm die Positionen und Radien der Sonnen- und Venusbilder, den Winkelradius der Sonne und die Ost-West-Richtung zu bestimmen (s. Abb. 5).

Der selbst bestimmte Bahnradius von Venus beträgt $0.73AE$ (s. Abschnitt 5.2). Der lineare Abstand zwischen der IAS und Essen ergibt sich aus den geografischen Koordinaten zu $\Delta = 1.19R_E$, der Projektionswinkel w ist näherungsweise 90° . Damit ergibt sich die Sonnenparallaxe nach (2) zu $\pi_S \approx 9.1''$. Unter Benutzung des selbst gemessenen Erdradius (s. Abschnitt 5.1) ergibt sich also der lineare Abstand zur Sonne zu⁹

$$d_S = \frac{R_E}{\pi_S} \approx 144000000km.$$

Durch Vergleich einzelner Bilder lässt sich keine größere Genauigkeit erzielen. Deshalb wurden an den verschiedenen Standorten ganze Bildserien aufgenommen. Dadurch wird es möglich, an die gemessenen Venuspositionen eine Gerade anzupassen (s. Abb. 6) und durch das Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate den zufälligen Fehler zu verringern. Die Auswertung ist noch nicht abgeschlossen, kann aber unter [3] verfolgt werden.

⁷<http://didaktik.physik.uni-essen.de/~backhaus/Venusproject/venusorbit.htm>

⁸siehe <http://didaktik.physik.uni-essen.de/~backhaus/Venusproject/sunradius.htm>

⁹Bei Ausmessung mit dem Bildauswertungsprogramm ergibt sich ein noch etwas kleinerer Wert: $\Delta\beta = 29.9'' \implies \pi_S = 9.4'' \implies d_S \approx 139000000km$.

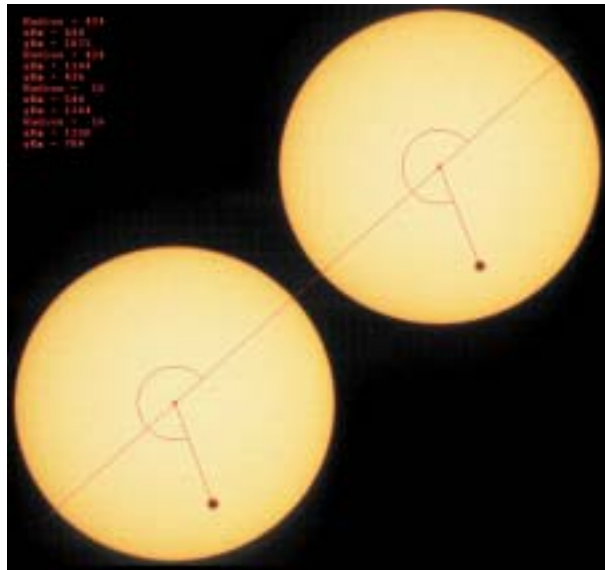


Abbildung 5: Ausmessung der Venusposition auf der Sonnenscheibe

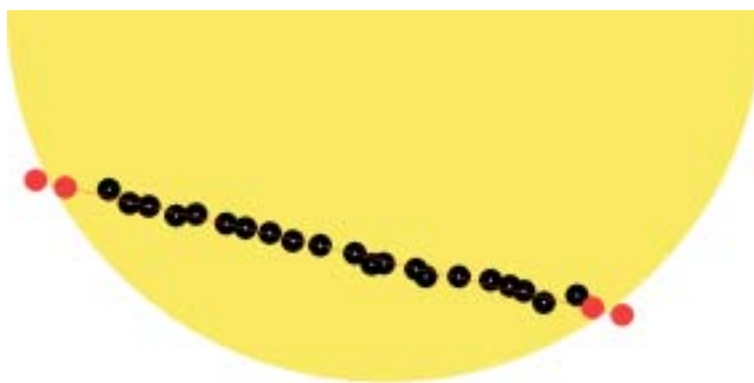


Abbildung 6: Anpassung einer Gerade an die von den Schülern der Deutschen Schule in Kairo gewonnenen Venuspositionen

7 Schlussbemerkungen

Der Nachvollzug der historischen Beobachtungen und der Versuch, eigene Messdaten zu gewinnen, erwiesen sich als schwieriger, als wir erwartet hatten: Die Ansprüche an die Genauigkeit beim Fotografieren hatten wir unterschätzt, mancher Versuch, die eigene Position oder, in Kooperation mit weit entfernten Partnern, den Erdradius mit Hilfe von Messungen mit einem Schattenstab zu bestimmen, scheiterte zunächst an ungenügenden Absprachen oder zu ungenauen Messungen. Die vielen Pannen bei der Beobachtung des Merkurtransits, die dazu führten, dass wir nur sehr wenig vergleichbare Daten erhielten, waren typisch für eine „Generalprobe“, trugen aber wesentlich zum Erfolg des Venusprojektes bei. Es war gerade Ziel unseres Projektes, solche Probleme kennenzulernen und mit ihnen fertig zu werden. Tatsächliche Messungen sind nun einmal viel komplexer als die in Lehrbüchern dargestellten Prinzipien. Aber gerade bei der Auseinandersetzung mit dieser Komplexität, erfährt und lernt man, was es heißt, Wissenschaft zu betreiben.

Die Schwierigkeiten haben dazu geführt, dass wir weniger Datenmaterial als erhofft gesammelt haben. So fehlen uns Vergleichsbilder aus dem fernen Osten und aus Australien. Trotzdem haben die Teilnehmer des Projektes viel gelernt: Alle haben für sie neue Zusammenhänge entdeckt, die Vorbereitung und Auswertung koordinierter Fotoserien hat intensivste Vorbereitung und Absprachen erforderlich gemacht und erst im Laufe des Projektes ein Gespür für die notwendige Genauigkeit wachsen lassen.

Nicht zu ersetzen sind die Erfahrungen, die alle bei der internationalen Kommunikation und Kooperation sammeln konnten, insbesondere aber das emotionale Erlebnis, maßgeblich an einem weltumspannenden Projekt beteiligt zu sein.

Die Auswertung ist noch nicht abgeschlossen. Auch die didaktische Aufbereitung des Materials, mit dem es möglich sein wird, die Probleme und die Auswertungen nachzuvollziehen, wird uns noch einige Zeit beschäftigen. Trotzdem ist es jetzt schon Zeit, allen aktiven Teilnehmern zu danken – insbesondere der Gruppe des Städtischen Gymnasiums in Fürstenwalde, ohne deren Internetforum und ohne deren Übersetzungen ins Deutsche und Russische der Teilnehmerkreis kleiner und der Informationsaustausch viel schwieriger gewesen wäre.

Literatur

- [1] U. Backhaus, *Der Venustransit 2004 – Beobachtung und Messung der Sonnenparallaxe (vorläufige Version)*,
<http://didaktik.physik.uni-essen.de/~backhaus/VenusProject/Transit.pdf>
- [2] U. Backhaus, *Der Venustransit 2004 – Eine einmalige Chance zur Vernetzung von Wissen, Verfahren und Menschen*, Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht (2004)
- [3] *The Results of our Observations*,
<http://didaktik.physik.uni-essen.de/~backhaus/Venusproject/venusresults.htm>

- [4] U. Backhaus, *Simultaneously Observing and Photographing the Moon*, in: V. Nordmeier (Hrsg.): Beiträge der Frühjahrstagung der DPG Bremen 2001, siehe auch <http://didaktik.physik.uni-essen.de/~backhaus/moonproject.htm>
- [5] *The Venus Transit 2004*, Homepage des Transitprojektes der ESO, <http://www.vt-2004.org>
- [6] M. Akoochekian et al., *Transit of Venus 2004, June 8, 2004, Historical Isfahan, Iran*, http://www.hrcglobal.net/phoenix/phoenix_venusransit2004_about.asp
- [7] M. Akoochekian et al., *Transit of Venus 2004 - Data Analysis*, http://www.hrcglobal.net/astro/astro_venus2004_result.asp
- [8] E. Maor, *June 8th, 2004 - Venus in Transit*, Princeton University Press: Princeton 2000
- [9] *Observing, Photographing and Evaluating the Transit of Venus, June 8th, 2004*, Homepage des Projektes, <http://didaktik.physik.uni-essen.de/~backhaus/VenusProject.htm>
- [10] *School Project Venus Transit*, Homepage des Transitprojektes der WDR-Wissenschaftssendung „Quarks & Co.“, <http://www.quarks.de/dyn/17113.phtml>
- [11] U. Uffrecht, *Aufruf zu einem weltumspannenden Unterrichtsprojekt*, *Astronomie und Raumfahrt* 38/2, 18 (2001)