

# Zwei Methoden zur Messung der Entfernung Erde-Sonne

– aus Anlass des Venustransits 2012 erfolgreich nachvollzogen –

UDO BACKHAUS – PATRIK GABRIEL – THOMAS KERSTING

Der Venustransit im Jahre 2012 bot noch einmal Gelegenheiten, im Rahmen internationaler Zusammenarbeit zwischen Schülern, Amateuren und Profis historische Verfahren zur Beobachtung und Auswertung eines Venustransits mit modernen Mitteln nachzuvollziehen und dabei den Reiz, aber auch die Schwierigkeiten wissenschaftlicher Forschung zu erfahren. Es wurden Projekte zur fotografischen Verfolgung des Transits und zur Messung der so genannten Kontaktzeiten initiiert (BACKHAUS, 2013 a), über die hier berichtet werden soll. Obwohl die Bedingungen schlechter als im Jahr 2004 waren – ganz Europa konnte nur das Ende des Transits beobachten, und dort war das Wetter großräumig schlecht! – und sich deshalb deutlich weniger Menschen beteiligten, führte der Vergleich der Beobachtungsergebnisse zu sehr befriedigenden Werten für die Astronomische Einheit.

## 1 Einleitung

Venustransits gehören zu den seltensten exakt vorhersagbaren astronomischen Ereignissen (BUCHER, 2011, MOKLER, 2012, WOLF, 2012). Im Jahr 2012 fand nach 2004 der zweite in diesem Jahrhundert statt. Der nächste wird sich erst in über 100 Jahren ereignen.

Beobachtung und Vermessung von Venustransits spielten historisch eine zentrale Rolle bei der Messung des Abstands zwischen Erde und Sonne – und damit bei der Bestimmung

1. der Größe unseres Sonnensystems,
2. der Masse der Sonne und ihrer anderen physikalischen Eigenschaften und
3. der Dimension des Universums.

Im Jahr 2004 waren zahlreiche internationale Projekte zur Beschäftigung mit der Geschichte der Venustransite und zur Beobachtung des aktuellen Transits organisiert worden, u. a. durch die europäische astronomische Vereinigung ESO (European Southern Observatory), die eine Kampagne zur Ableitung der Entfernung zwischen Erde und Sonne aus den weltweit gemessenen Kontaktzeiten koordiniert hatte (ESO 2004). Von Essen aus hatten wir eine internationale Zusammenarbeit zur Fotografie des Transits initiiert (BACKHAUS, 2004 b), um durch den Vergleich zeitgleich aufgenommener Fotos die Venusparallaxe sichtbar und die Entfernung der Sonne messbar zu machen (BACKHAUS, 2004 a, BACKHAUS, 2005).

Im Jahr 2012 haben wir dieses Projekt wiederholt und durch ein Kontaktzeit-Projekt erweitert, das 2004 bei uns nur nebenbei verfolgt worden war. Die Organisation von Europa aus war jedoch 2012 schwieriger, weil sich der Venustransit in voller Länge (ca. 6 Stunden) nur von Australien und dem Fernen Osten (Sibirien, Japan) aus beobachten ließ (Abb. 1). Vom amerikanischen Kontinent aus konnten nur der Beginn, von Europa aus nur das Ende verfolgt werden. Es gelang deshalb trotz verschiedener Aufruf-

fe in Zeitschriften (BACKHAUS, 2012 a, 2012 b) und im Internet nicht, ebenso viel Teilnehmer zu gewinnen wie 2004.

## 2 Messung der Sonnenentfernung bei einem Venustransit

Durch Beobachtungen am Himmel können Winkel und Winkelgeschwindigkeiten gemessen und damit – unter Voraussetzung des heliozentrischen Weltbildes – alle Entfernungsverhältnisse im Sonnensystem bestimmt werden. Um daraus die Größe des Sonnensystems berechnen zu können, braucht man jedoch eine Abstandsmessung, einen Maßstab. Anders ausgedrückt: Man braucht für einen messbaren Winkel die zugehörige Basislänge.

Bei einem Venustransit gibt es dazu drei unterschiedliche Möglichkeiten:

1. Der ursprüngliche Vorschlag von HALLEY bestand darin, an verschiedenen Orten der Erde die Dauer des gesamten Transits zu messen, um daraus auf verschieden lange »Wege« der Venus über die Sonnenscheibe schließen zu können (Abb. 2).
2. Die (synodische) Winkelgeschwindigkeit, mit der Venus relativ zur Erde die Sonne umläuft, ist bekannt. Wenn man deshalb, wieder von möglichst weit entfernten Or-

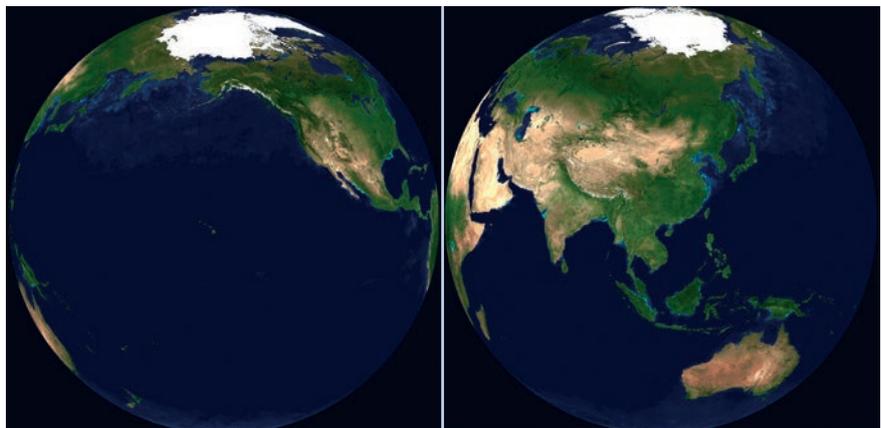


Abb. 1. Die der Sonne (und Venus) zugewandte Seite der Erde zu Beginn und Ende des Transits

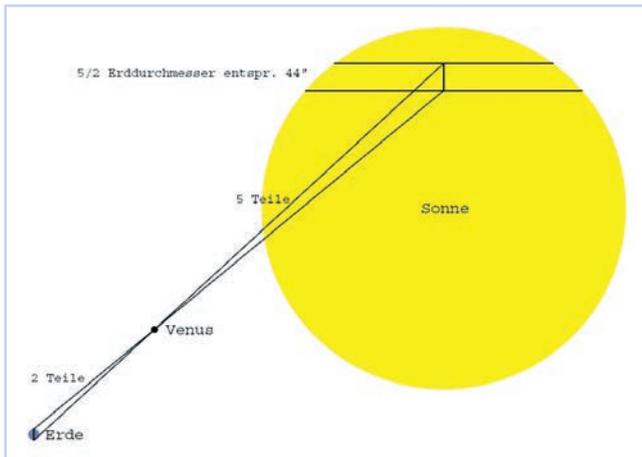


Abb. 2. »Projektion« der Bewegung von Venus auf die Sonne (nach HERRMANN, 1977)

ten aus, die Zeit misst, zu der Venus (z. B.) vor der Sonne auftaucht, dann kann man den Winkel bestimmen, den Venus in der Zwischenzeit überstrichen hat (in Abbildung 3 rot hervorgehoben). Zusammen mit der (projizierten) Entfernung zwischen den Beobachtungsorten, ergibt sich daraus die Sonnenentfernung.

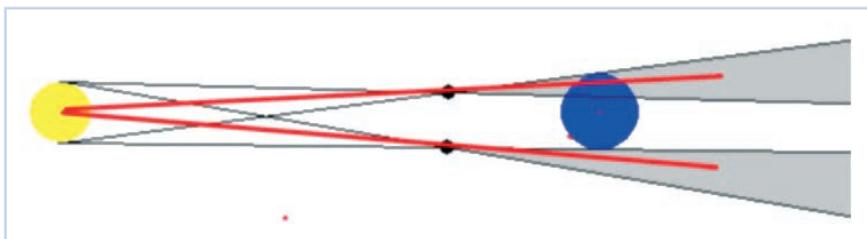


Abb. 3. Der »Venusschatten« überholt die Erde (blau). Hervorgehoben ist der Winkel, den Venus auf ihrer Bahn um die Sonne (gelb) zwischen Beginn und Ende des Transits überstreicht. (Erzeugt mit dem Programm Venusschatten (BACKHAUS, 2013 c))

Die Auswertung der von verschiedenen Orten auf der Erde aus gemessenen Kontaktzeiten wird ausführlich beschrieben bei BACKHAUS (2013 b) und in einer entsprechenden Praktikumsaufgabe (BACKHAUS, 2013 c).

3. Wenn Venus von verschiedenen Orten der Erde aus gleichzeitig vor der Sonne fotografiert wird, ergibt sich aus dem Unterschied ihrer beiden Positionen der (Parallaxen-)Winkel der Venus, dessen Basislänge der Abstand zwischen den beiden Beobachtungsorten ist.

Die Auswertung der der Abbildung 4 zugrunde liegenden Fotos wird ausführlich bei BACKHAUS (2008) und in einer Praktikumsaufgabe (BACKHAUS, 2013 c) beschrieben.

### 3 Das Projekt »Measuring and Evaluating the Contact Times of Venus«

Die Grundidee der Kontaktzeitmethode (Möglichkeit 2) besteht darin, die Zeit zu messen, die der »Schattenzeiger« der Venus benötigt, die Erde zu überstreichen. Dadurch erhält man zu einem bekannten Winkel  $\omega(t_2 - t_1)$  den Durchmesser  $2R_E$  der Erde als Basiswinkel und kann dadurch die Höhe des Dreiecks – die Entfernung Erde-Sonne – berechnen. (s. Abb. 3).

$$d_{\text{Erde-Sonne}} = \frac{2R_E}{\omega(t_2 - t_1)}$$

Den ersten Kontakt des Schattens mit der Erde und das Ende des vollständigen Überstreichens derselben Schattenkante, d. h. Messung desselben Kontakts an den entsprechenden Orten der Erde kann man nicht direkt messen, weil die Orte in der Regel unzugänglich sein werden und an diesen Orten in diesem Moment die Sonne gerade aufgeht oder untergeht. Deshalb müssen die Kontaktzeiten an anderen Orten gemessen werden und daraus muss auf die Gesamtzeit des Schattendurchgangs geschlossen werden.

Da die Kontaktzeiten nicht sehr genau gemessen werden können, wird sich im Allgemeinen aus dem Vergleich von nur zwei Messwerten nur ein ungenauer Wert für die Durchgangszeit ergeben. Zur Verringerung des Fehlers müssen deshalb die Kontaktzeiten von möglichst vielen Orten der Erde aus gemessen werden.

Die Berechnung der Durchgangszeit aus diesen Messwerten ist im Detail nicht einfach. Das Prinzip kann man jedoch folgendermaßen verstehen: Abbildung 5 zeigt links das Fortschreiten des Schattens in Minutenabständen. Wenn man dieses Bild so dreht, dass der Schatten horizontal von rechts nach links über die Erde wandert (Abb. 5, rechts), dann besteht wegen der konstanten Geschwindigkeit des Schattens ein linearer Zusammenhang zwischen den gemessenen Kontaktzeiten und den  $x$ -Koordinaten der zugehörigen Beobachtungsorte auf diesem Bild. Dabei werden die Drehung der Erde und die Krümmung des Venusschattens vernachlässigt. Trägt man also die Kontaktzeiten über den  $x$ -Koordinaten auf,

muss sich eine Gerade ergeben, deren Extrapolation auf  $x = R_E$  und  $x = -R_E$  auf Beginn und Ende des Durchgangs führt. Die Internetseite des Projekts stellte eine Maske zur Verfügung, in die die Teilnehmer ihre Messergebnisse eintragen konnten, die dadurch unmittelbar für alle anderen Teilnehmer sichtbar – und auswertbar – wurden. Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Auswertung der bei Kontakt 3 gemessenen Kontaktzeiten. Die Messwerte liegen recht überzeugend auf einer Geraden (Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,982$ ), und die Auswertung mit

der den Teilnehmern zur Verfügung gestellten Excel-Tabelle ergibt eine Sonnenparallaxe von  $\pi = 8,8''$ , d. h. für die mittlere Entfernung zwischen Erde und Sonne, die so genannte Astronomische Einheit, den Wert  $1 \text{ AE} = 149000000 \text{ km}$ . Auch die Auswertungen der anderen Kontakte, die auf der Projektseite angesehen werden können, lieferten ähnlich befriedigende Ergebnisse.

Auf dieses Ergebnis sind wir ein wenig stolz, da die Auswertung der ESO-Ergebnisse von 2004 (Abb. 7) gezeigt hat, wie



Abb. 4. Kombination zweier gleichzeitig aufgenommener Transitfotos aus Namibia und Deutschland (BACKHAUS, 2005)

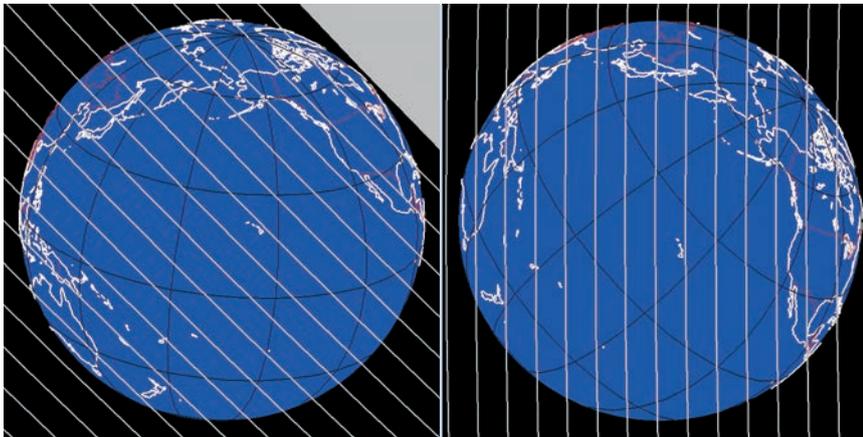


Abb. 5. Die Grenze des Venusschattens auf der Erde in Minutenabständen (erzeugt mit dem Programm ErdeundVenusschattenGrafisch (BACKHAUS, 2013 c)

wurden auf der Projekt-Homepage detaillierte Anleitungen gegeben.

Leider gelang es nicht, ebenso viele Teilnehmer zu gewinnen und geeignete Fotos zu erhalten wie 2004. Eine wesentliche Ursache dafür sehen wir in dem Umstand, dass von Europa aus nur der letzte Teil des Transits früh am Morgen beobachtet werden konnte, der Himmel aber in großen Teilen Europas bedeckt war. Weitere Probleme ergaben sich dadurch, dass der Vorschlag, die Orientierung der Sonnenbilder durch Doppelbelichtungen sehr genau zu bestimmen, fast nicht befolgt wurde und dass die vorgeschlagenen Aufnahmezeitpunkte nicht oder nicht genau genug eingehalten wurden.

Das Problem der unbekanntenen Bildorientierung konnte dadurch gelöst werden,

dass es, anders als 2004, prominente Gruppen von Sonnenflecken auf der Sonnenoberfläche gab, die eine (allerdings nicht ganz so genaue) Bestimmung der Orientierung der Fotos ermöglichten.

Durch die ungenaue Einhaltung der Zeitvorgaben gab es insgesamt nur wenige, in den ersten Tagen nach dem Transit sogar gar keine zeitgleichen – und damit auswertbaren – Fotos. Eine Lösung dieses Problems ergab sich dadurch, dass wir auf die Fotos des Solar Dynamics Observatory, eines Satelliten der NASA (NASA, 2013), stießen, der den Transit im Abstand weniger Sekunden auf perfekten Fotos festgehalten hatte. Unter diesen Bildern können nun zu allen Fotos der Projektteilnehmer fast zeitgleiche SDO-Fotos gefunden werden. Um durch Vergleich mit diesen Fotos die Sonnenparallaxe sichtbar und auswertbar zu machen, mussten allerdings zunächst die genauen Aufnahmezeitpunkte und die Bahndaten des Satelliten bei der NASA in Erfahrung gebracht werden. Daraus mussten seine Positionen zu den entsprechenden Zeitpunkten berechnet und die Auswertungsalgorithmen auf Aufnahmeorte im erdnahen Weltraum erweitert werden. Der Vergleich der ersten Projektfotos mit SDO-Bildern machte einen zunächst überraschend großen Parallaxeneffekt sichtbar (Abb. 8). Er beruht darauf, dass sich der SDO-Satellit auf einer geosynchronen Umlaufbahn befindet (Abb. 9). Sein Bahnradius beträgt deshalb etwa 36000 km, sodass die Basislänge bis zu sechsmal so groß sein kann wie bei erdgebundenen Beobachtungen. Mehrere Wochen nach dem Transit erreichten uns doch noch komplette Aufnahmeserien von verschiedenen Orten der Erde,

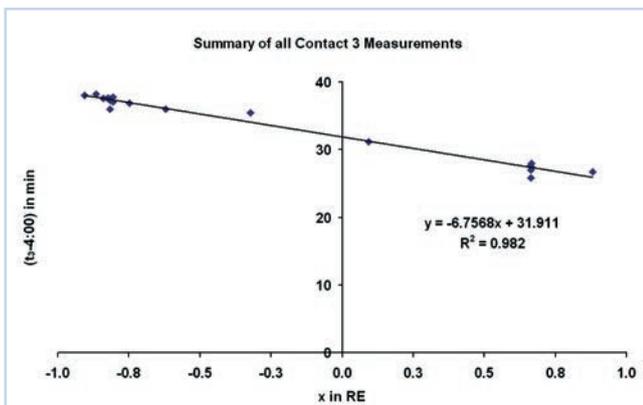


Abb. 6. Auswertung der Kontaktzeiten beim 3. Kontakt

schwierig die Kontaktzeiten zu messen sind, wie groß deshalb die Streuung der Messwerte ist, die erwartet werden muss. Die nicht sehr zahlreichen Teilnehmer an dem Projekt – in die Diagramme sind alle Messwerte eingetragen! – haben offensichtlich sehr gut gemessen!

#### 4 Das Projekt »Simultaneously Photographing Venus in Front of the Sun«

Knapp ein Jahr vor dem Transit veröffentlichten wir auf der Projektseite einen Aufruf, zu mehreren exakt vereinbarten Zeitpunkten die Sonne während des Transits zu fotografieren, um anhand der Fotos nach der oben skizzierten 3. Möglichkeit die Entfernung zur Sonne bestimmen zu können. Dabei nannten wir als Ziele:

- Durch Vergleich simultan aufgenommener Fotos soll die Parallaxe der Venus sichtbar und messbar gemacht werden.
- Durch Interpolation und evtl. Extrapolation gemessener Venuspositionen auf der Sonne sollen nicht gemessene simultane Positionen berechnet werden können und durch Ausgleichsrechnung die Genauigkeit der Einzelmessungen erhöht werden.

Da die Sonne auf den Fotos der Teilnehmer unterschiedlich orientiert ist, sollten wie 2004 Doppelbelichtungen durchgeführt werden, die es ermöglichen sollten, alle Bilder in Ost-West-Richtung zu drehen und durch Überlagerung die paralaktische Verschiebung von Venus sichtbar zu machen. Dazu

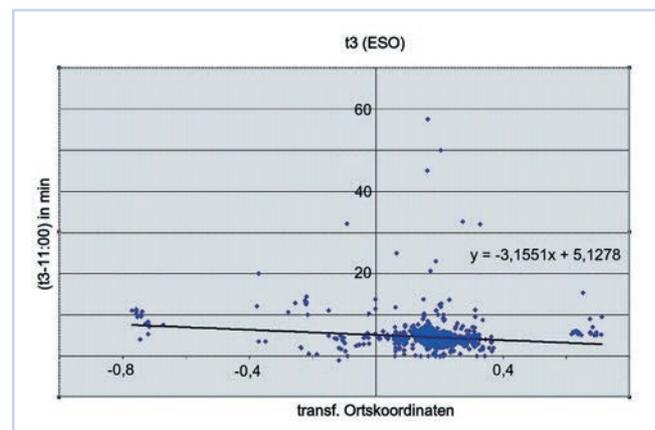


Abb. 7. Auswertung der beim ESO-Projekt 2004 gemessenen Kontakt-3-Zeiten, die nur kurzzeitig online verfügbar waren

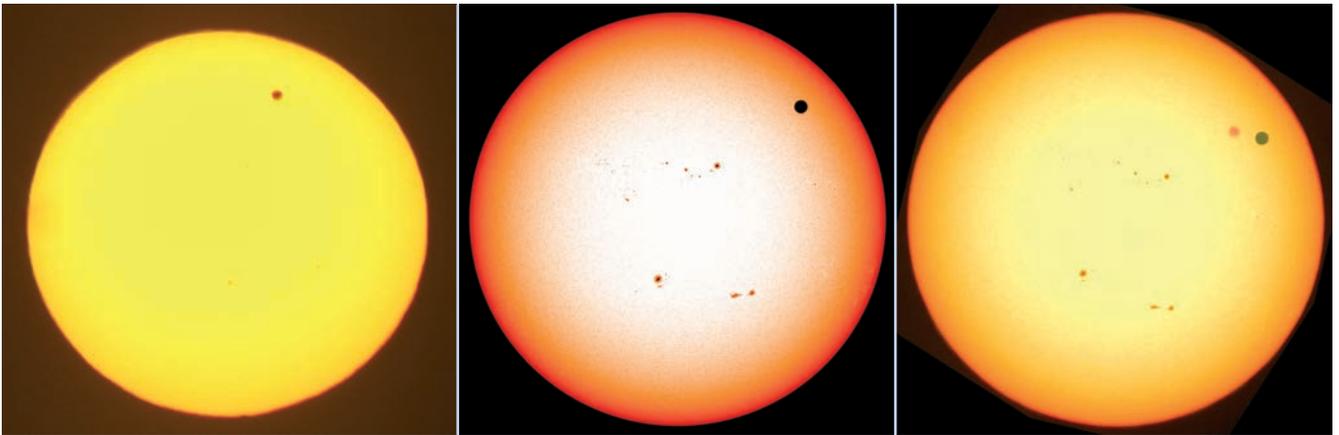


Abb. 8. Transitfotos aus Usedom (links) und des SDO-Satelliten (Mitte) (3:15 UT) und ihre Überlagerung (rechts)

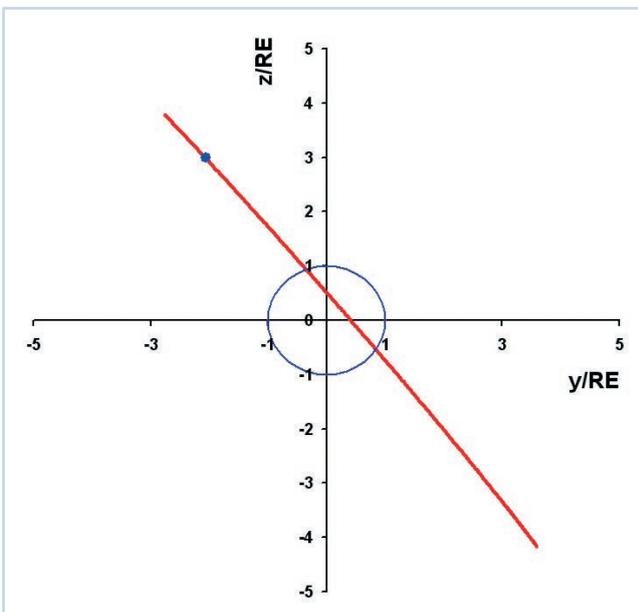


Abb. 9. Die Bahn des SDO-Satelliten und seine Position zum Zeitpunkt der Aufnahmen in Abbildung 8 aus Sicht der Sonne

Die Aufnahmeserien ermöglichten schließlich eine sichere Bestimmung der Astronomischen Einheit: An die auf den Bildern von einem Standort gemessenen Venuspositionen wurden Geraden angepasst. Interpolation ergab dann beliebig viele simultan »gemessene« Positionen und daraus folgende Sonnenparallaxen (Abb. 11). Beim Beispiel des Vergleichs Tromsø-Canberra führt zwar der Vergleich vieler interpolierter Venuspositionen zu einem schlechteren Ergebnis ( $\pi = 9,40'' \pm 0,53''$ ) als der Vergleich zweier Einzelbilder ( $\pi = 8,9''$ ). Jedoch muss ein so gut mit dem theoretischen Wert übereinstimmendes Ergebnis beim Vergleich zweier Einzelbilder als Zufall gewertet werden. Die Serienauswertung führt eher zu einem Gefühl für die (Un-)Sicherheit des Resultats.

### 5 Fazit

Die Transits boten den Teilnehmern eine hervorragende Gelegenheit, zentrale astronomische Erkenntniswege nachzuvollziehen und dabei die Faszination, aber auch die Probleme naturwissenschaftlicher Forschung zu erfahren. Sie konnten erleben, wie Wissenschaft funktioniert. Es wurden historische Mess- und Auswertungsmethoden mit modernen Mitteln (Digitalfotografie, GPS-Ortung und -Zeitmessung, internationale Kooperation via Internet) wiederholt. Dabei wurde verständlich, warum die Messung der Sonnenentfernung auch heute noch eine anspruchsvolle Aufgabe ist, die sorgfältige Vorbereitung und Durchführung erfordert, und warum die Auswertung der historischen Transitexpeditionen mehrere Jahre dauerte.

unter denen sich mehrere fast simultan aufgenommene Fotos fanden. Abbildung 10 zeigt als Beispiel den Vergleich zweier Aufnahmen aus Tromsø in Nordnorwegen und Canberra in Australien.

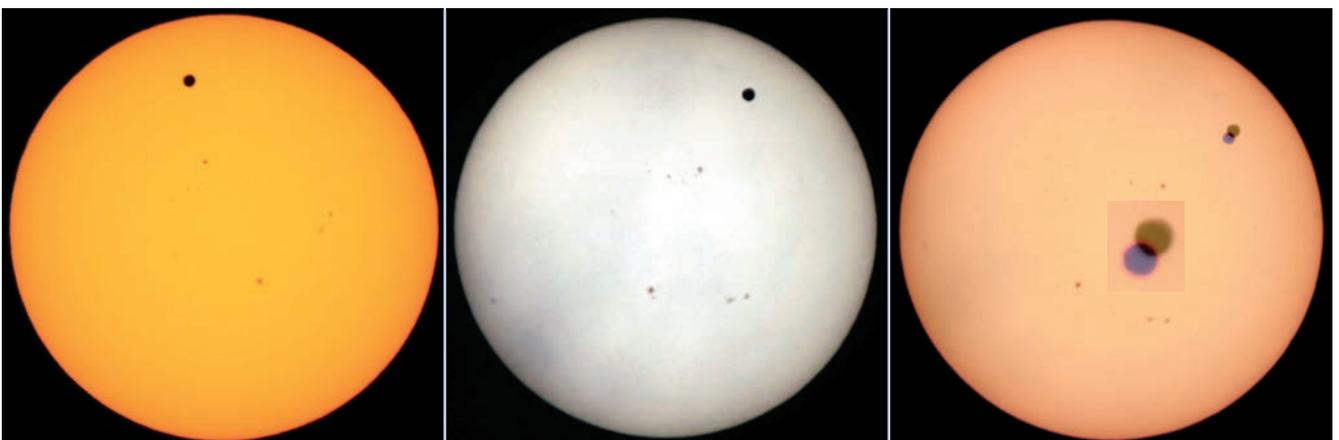


Abb. 10. Zeitgleiche (3:12:15 UT) Fotos aus Tromsø (links) und Canberra (Mitte) und ihre Überlagerung (rechts)

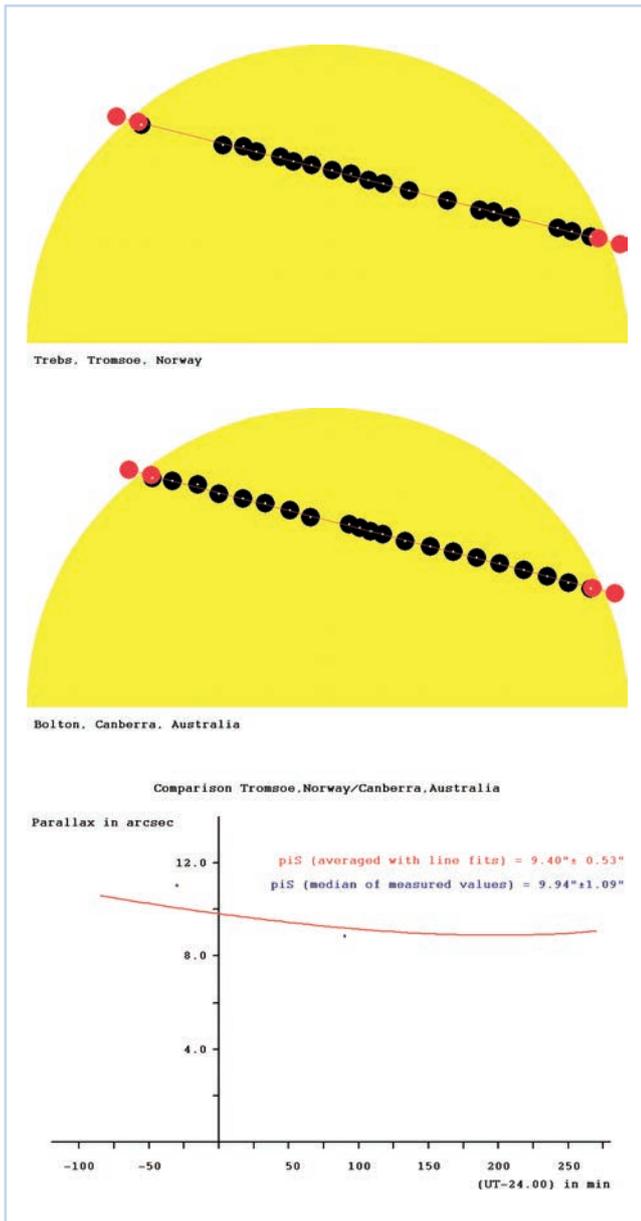


Abb. 11. Die Positionen der Venus auf der Sonnenscheibe, gemessen auf den Bildern aus Tromsø (J. TREBS) und Canberra (S. BOLTON). Aus den linearen Fits ergeben sich die unten gezeigten Werte für die Sonnenparallaxe.

Nach vielen Startschwierigkeiten sind beide Projekte schließlich sehr erfolgreich gewesen. Diese Einschätzung beruht nicht in erster Linie auf den recht befriedigenden Ergebnissen bei der Messung der Sonnenentfernung. Wichtiger erscheinen uns die emotionalen, erlebnishaften und individuellen Erfahrungen, die die Teilnehmer machen konnten: Jeder konnte mit seinen Fotos seine »eigene« Sonnenparallaxe messen oder den Beitrag der eigenen Kontaktzeitmessung zur gemeinsamen Messung der Astronomischen Einheit nachvollziehen. Da die Daten öffentlich sind und die Algorithmen mit nachvollziehbaren Beschreibungen als Excel-Arbeitsblätter zur Verfügung stehen, können die in den Projekten angewendeten Verfahren auch nachträglich angewendet werden, um die Entfernung zur Sonne zu bestimmen.

## 6 Nachtrag

Das Erlebnishaftes des Projektes soll zum Schluss an dem einzigen gerade noch auswertbaren Foto demonstriert werden, das von einem der Autoren bei aufkommender Bewölkung in Hannover aufgenommen wurde (Abb. 12, rechts): Mit massiver Kontrastverstärkung können die Sonnenflecken sichtbar gemacht werden (Abb. 13, links). Das machte zunächst die Überlagerung mit dem zeitgleichen SDO-Satellitenfoto möglich (Abb. 13, Mitte). Sie zeigt eine sehr große parallaktische Verschiebung der Venus entsprechend der großen Entfernung zwischen Hannover und dem Satelliten, dessen Position zum Zeitpunkt der Aufnahmen in Abbildung 9 blau markiert ist. Schließlich ging auch eine fast zeitgleiche Aufnahme aus Canberra/Australien ein, und durch Überlagerung der beiden Bilder wurde die entsprechende parallaktische Verschiebung der Venus sichtbar (Abb. 13, rechts). Dreht man schließlich beide Bilder in äquatoriale Orientierung, entspricht die Richtung der parallaktischen Verschiebung von Venus recht genau der Richtung Canberra-Hannover (Abb. 14). Dabei muss jedoch wegen der entgegengesetzten »Blickrichtung« eins der Bilder vertikal gespiegelt werden.

## Dank

Wir danken allen, die mit Kontaktzeitmessungen und Transitfotos zum Gelingen der Projekte beigetragen haben. Besonders wertvoll waren die Bilder von S. BOLTON (Canberra), A. HÄNEL (Osnabrück), T. HÄUSLER (Aachen), E. MERKER (Arnsdorf), T. KUNZEMANN (Pr. Oldendorf) und J. TREBS (Berlin) und seinen Schülern und Schülerinnen.



Abb. 12. Der Venustransit, von Hannover aus fotografiert, unmittelbar nach Sonnenaufgang (links) und kurz vor dem Verschwinden der Sonne hinter Wolken (rechts)

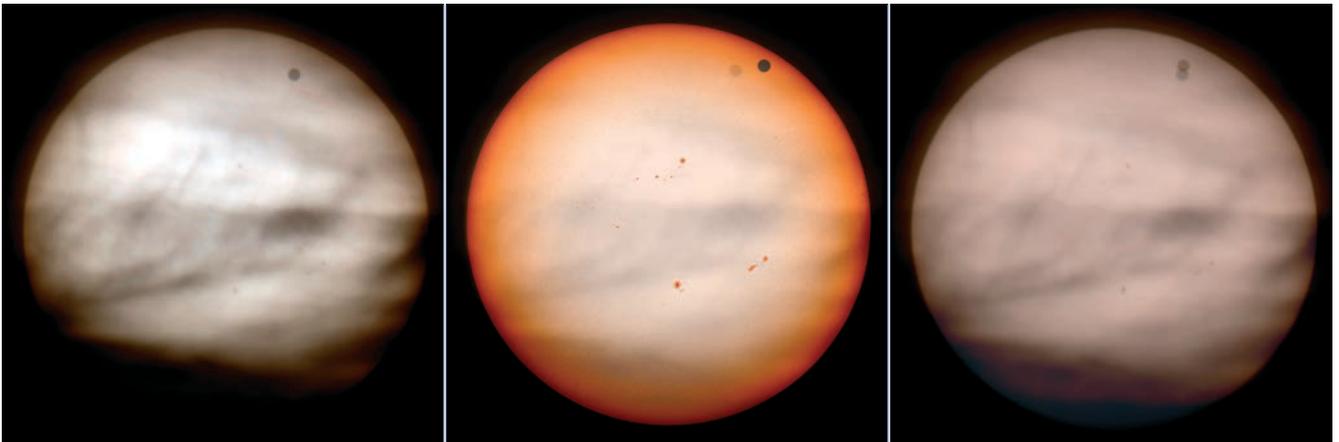


Abb. 13. Überlagerung der kontrastverstärkten Aufnahme (3:57:53 UT, links) aus Hannover mit fast zeitgleichen Bildern des SDO-Satelliten (3:57:55 UT, Mitte) und aus Canberra (4:00:02 UT, rechts)

## Literatur

BACKHAUS, U. (2004 a). Der Venustransit 2004. Eine einmalige Chance zur Vernetzung von Wissen, Erfahrung und Menschen. *MNU* 57(4), 217–222.

BACKHAUS, U. (2004 b). Observing, Photographing and Evaluating the Transit of Venus, June 8<sup>th</sup>, 2004. Homepage des Internetprojekts. <http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/VenusProject.htm> (15.11.2013).

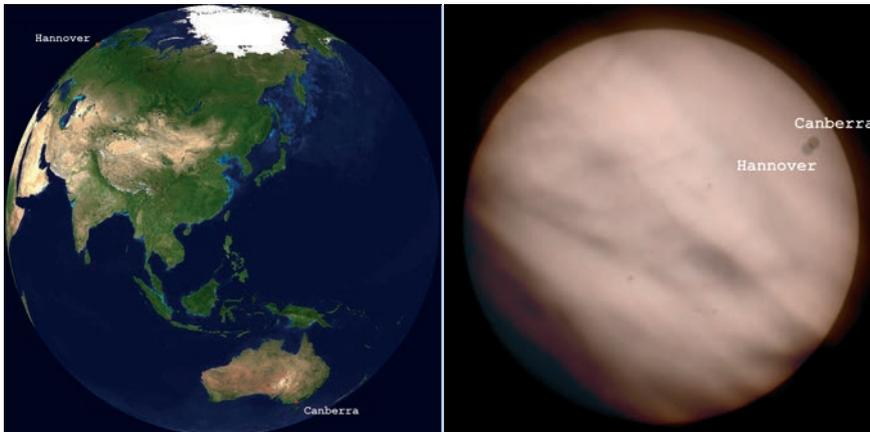


Abb. 14. Die Ansicht der Erde von der Sonne aus und die Ansicht der Venus von Hannover und Canberra aus gesehen

BACKHAUS, U. (2005). Der Venustransit 2004 – Forschendes Lernen in einer internationalen Kooperation. *Computer+Unterricht* 57, 34–37.

BACKHAUS, U. (2008). Das Projekt »Venustransit 2004«. *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 45(2). 23–25.

BACKHAUS, U. (2012 a). Der Venustransit 2012. *MNU* 65(3), 136–138.

BACKHAUS, U. (2012 b). The Transit of Venus: June 5/6, 2012. *American Journal of Physics* 80(5), 361.

BACKHAUS, U. (2013 a). Observing, Photographing and Evaluating the Transit of Venus, June 5/6<sup>th</sup>, 2012. Homepage der Internetprojekte. <http://www.venus2012.de> (15.11.2013).

BACKHAUS, U. (2013 b). Messung der Astronomischen Einheit durch Messung von Kontaktzeiten bei einem Venustransit. *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 50(6), 46–50.

BACKHAUS, U. (2013 c). Astronomische Materialien. Sammlung von Programmen, Literatur, Astronomischen Praktikumsaufgaben usw. <http://www.didaktik.physik.uni-duisburg-essen.de/~backhaus/AstroMaterialien/> (15.11.2013).

BUCHER, G. (2011). *Die Spur des Abendsterns*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

ESO (2004). The Venus Transit 2004. Homepage des ESO-Transitprojektes 2004. <http://www.eso.org/public/outreach/eduoff/ot-2004> (15.11.2013).

HERRMANN, D. B. (1977). *Kosmische Weiten. Geschichte der Entfernungsmessung im Weltall*. Leipzig: Johann Brosius Barth.

MOKLER, F. (2012). Schwarze Venus vor der Sonne. *Sterne und Weltraum* 51(3), 34.

NASA (2013). SDO. Solar Dynamics Observatory. <http://sdo.gsfc.nasa.gov/> (15.11.2013).

WULF, A. *Die Jagd auf die Venus*. München: Bertelsmann.

Prof. i. R. Dr. UDO BACKHAUS war bis zu seiner Pensionierung Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Die Didaktik der Astronomie gehört zu seinen Hauptarbeitsgebieten. E-mail: [udo.backhaus@uni-due.de](mailto:udo.backhaus@uni-due.de)

PATRIK GABRIEL ist seit seinem Zweiten Staatsexamen in Physik, Sport und Kunst wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich der Didaktik der Physik, zunächst an der Universität Duisburg-Essen, jetzt an der Universität zu Köln.

THOMAS KERSTING, Oberstudienrat für Physik und Technik, hat nach einigen Jahren Unterrichtstätigkeit an einem Gymnasium an die Universität gewechselt. Er ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Didaktik der Physik der Universität Duisburg-Essen. ■