

„Ist die Erde wirklich eine Kugel?“

Udo Backhaus



Abbildung 1: Wie passen Erfahrung und Weltraumfotos zusammen?

„Fritzchen, sagt der Lehrer, nenne mir drei Beweise dafür, daß die Erde eine Kugel ist! - Fritzchen, anfangs verdüstert über die Zumutung, gleich drei Argumente bereit zu haben, leuchtet plötzlich auf: Mein Papa sagt es, meine Mutti sagt es, und nun sagen Sie es auch!“ [15]

Wenn auch heutige Kinder und Jugendliche schnellere und bessere Antworten geben können als in der von Martin Wagenschein 1967 erzählten Anekdote, so ist doch die Diskrepanz zwischen der eigenen unmittelbaren Wahrnehmung und den zahlreichen Fotos, die die Erdkugel aus der Sicht von Raumstationen oder Raumsonden zeigen, heute fast ebenso groß wie vor 50 Jahren.

Die Frage wurde kürzlich für den Autor wieder aktuell, als ein Vater sich per E-Mail mit der Bitte an ihn wandte, ihm bei der Argumentation seinen widerspruchsfreudigen Kindern gegenüber behilflich zu sein. Diese Anfrage war der Anlass, die Argumente noch einmal zusammenzutragen und zu durchdenken.

1. Die Anfrage

Ausgangspunkt dieses Aufsatzes war eine E-Mail im Februar 2017:

Sehr geehrter Herr Backhaus,

Ich habe über den Artikel "Zwei Methoden zur Messung der Entfernung Erde-Sonne" von 2012 von Ihnen erfahren. Daber wende ich mich nun an Sie mit einer Frage. Es geht um die Kugelform der Erde. Meine wissbegierigen Kinder stellen mir nämlich folgende Frage: "Woher wissen wir eigentlich, dass die Erde eine Kugelform hat? Welche Nachweise gibt es dazu?"

Nun, wir kennen natürlich die Fotos der Erde, Globen und das Allgemeinwissen, dass die Erde eine Kugel ist. Aber echte „Nachweise“

sind das ja tatsächlich nicht. Als verantwortungsvoller Vater wollte ich meinen Kindern da auch eine vernünftige, nachvollziehbare Antwort geben und vor allem zeigen, dass es da keine Zweifel gibt. Ich schaute also zur Sicherheit im Internet nach seriösen Quellen und fand eine erschöpfende Erläuterung auf den Seiten von Wissenschaft im Dialog [13].

Dort ist nachvollziehbar erklärt, warum die Erde eine Kugel ist. Ich diskutierte es mit meinen Kindern und dachte, die Sache sei damit erledigt. Die Kugelform der Erde ist ja unbestritten, auch bei den Jüngsten! Womit ich aber nicht gerechnet hatte war, dass die Kinder mit Freunden ein paar Tage intensiv nachdachten und recherchierten und behaupteten, dass die dort angegebenen Erklärungen nicht eindeutig seien und als „Beweise“ nicht ausreichen.

Naiv und unbefangen wie die Kinder nun mal sind, haben sie mir folgende Einwände vorgetragen:

1. **Schiffe tauchen am Horizont zuerst mit der Mastspitze auf, sei ein Beleg für die Erdkrümmung (=Kugel).**

Kinder: Durch empirische Versuche wäre dies widerlegt. In weiter Entfernung wäre ein Schiffsrumpf mit bloßem Auge im Gegensatz zum Mast zwar nicht mehr sichtbar, mit hochauflösenden „Digital-Zoom-Kameras“ aber doch noch. Der Effekt habe optische Gründe, keine geologischen. D. h. die Krümmung der Erde könne damit nicht nachgewiesen werden. Im Internet könne man Experimente dazu finden.

2. **Krümmung der Erde (=Kugel) und Radius berechnet in Ägypten mit Hilfe von Sonnenstrahlenschatten durch Eratosthenes um 200 v. Chr.**

Kinder: Die Beobachtungen aus dem Experiment von Eratosthenes könnten nicht korrekt gedeutet worden sein. Es gäbe auch andere Deutungsmöglichkeiten (z. B. dass die Sonne eine andere als die vorausgesetzte Entfernung zur Erde habe und so die Schattenverschiebung verursache) und wäre somit kein zweifelsfreier Beweis.

3. **Weltumsegelung Magellans belege, dass die Erde eine Kugel ist.**

Kinder: *Die Umseglung als solche sei kein Beweis. Es fehle die wissenschaftliche Dokumentation. Auch auf einer anders geformten Erde wäre eine „Umseglung“ möglich.*

4. Fotos der Erdkugel von Astronauten im Weltall

Kinder: *Fotos gelten heutzutage nicht mehr als zweifelsfreier Beweis, da sie manipuliert oder konstruiert sein können oder einer optischen Täuschung unterliegen. In der Tat gibt die NASA offen zu, dass die Erdfotos vergangener Jahrzehnte mittels einer Software*

Erstmal war ich baff, denn es ist teilweise nachvollziehbar für mich, und ich habe kein weiteres Argument, das ich den Kindern noch vorlegen könnte. Ich möchte aber auch nicht, dass sich die Kinder in der Schule und bei Freunden lächerlich machen.

Ich kann mir allerdings auch nicht vorstellen, dass die korrekte Antwort auf die Frage der Kugelform der Erde bis heute auf Überlieferungen aus der Vergangenheit in Form antiker Experimente, ohne Berücksichtigung konkreter Erkenntnisse der modernen Wissenschaft, beruht.

Ich möchte gerne Kenntnis erhalten über exakte wissenschaftliche Fakten und Beweise von astronomischen Experten. Nun dachte ich mir, dass Sie mir ggf. Auskunft geben könnten, welche neuzeitlichen, wissenschaftlichen Nachweise es gibt, die über fotografische Dokumentationen aus dem Weltall hinausgehen. Ich selber bin nicht fündig geworden. Nachdem die Kinder diese Frage aufgebracht haben, sind wir Erwachsenen ihnen eine seriöse Antwort schuldig.

Es wäre toll, wenn Sie mir in dieser Angelegenheit mit Ihrem Hintergrundwissen weiterhelfen könnten.

Die Fragen in dieser E-Mail beziehen sich auf folgende Aussagen im Internet [13]:

Welches sind die vier stichhaltigsten Beweise dafür, dass die Erde eine Kugel ist?

Es gibt eine Vielzahl von Beweisen für die Kugelgestalt der Erde. Die augenscheinlichsten sind sicherlich der Blick der Astronauten und die vielen Fotos, die aus dem Weltraum von unserem Planeten aufgenommen wurden.

Doch bereits vor rund 2300 Jahren war Aristoteles von der Kugelgestalt der Erde überzeugt. Seine Argumente: Schiffe tauchen am Horizont zuerst mit der Mastspitze auf, in südlichen Ländern erscheinen südliche Sternbilder höher über dem Horizont, und der Erdschatten bei einer Mondfinsternis ist immer rund.

Etwa hundert Jahre später bestimmte erstmals Eratosthenes den Umfang der Erdkugel recht exakt. Er nutzte die Beobachtung, dass die Sonne in Syene im Süden Ägyptens mittags im Zenit steht und gleichzeitig in Alexandria in Nordägypten unter einem Winkel einfällt. Basierend auf einfachen geometrischen Überlegungen berechnete er aus dem Abstand zwischen Syene und Alexandria und dem Einfallswinkel den Erdumfang. Kein Zweifel an der Kugelgestalt der Erde konnte schließlich nach der Weltumseglung von Magellan im 16. Jahrhundert mehr bestehen.

Genau genommen ist die Erde aber gar keine exakte Kugel. Unregelmäßigkeiten der Erdoberfläche durch Berge und die ungleiche Verteilung der Landmassen lassen sie eher wie eine riesige Kartoffel aussehen. Das belegen Daten, die Wissenschaftler des GeoForschungsZentrums (GFZ) in Potsdam mit Hilfe von Satelliten gewonnen haben. Daraus haben sie das Modell der „Potsdamer Schwerekartoffel“ entwickelt.

Wegen meiner jahrzehntelangen Beschäftigung mit diesen Fragen im Rahmen der Ausbildung zukünftiger Physiklehrer hat mich die Anfrage angeregt, meine diesbezüglichen Aktivitäten und Papiere zu sichten und zusammenzufassen. Die Antwort war anschließend die Grundlage öffentlicher Vorträge.

2. Beobachtungen und Erfahrungen

Die Kugelform der Erde, oder zumindest die Krümmung ihrer Oberfläche, lässt sich bei aufmerksamer Beobachtung mit bloßen Augen wahrnehmen.

2.1 Der Horizont am Meer

Der Versuch, mich selbst per Augenschein von der Krümmung der Erdoberfläche zu überzeugen und sie meiner Familie und im Freundeskreis vor Augen zu führen, droht mich immer mal wieder am Strand lächerlich zu machen (Abb. 2, oben): Wenn man am Meer seine Augen dicht über die Wasseroberfläche bringt, am besten indem man ins Wasser geht, und weit entfernte Gegenstände z. B. an einem gegenüber liegenden Ufer beobachtet, dann sieht man mit überzeugender Deutlichkeit, je näher man der Oberfläche mit den Augen kommt, umso eindrucksvoller, dass sie „von dem Wasserberg, der sich dazwischen erhebt“ ([15], S. 3) verdeckt werden. Allerdings ist dazu ein klarer Blick zum Horizont Voraussetzung. Ich beobachte den Effekt immer wieder beim Blick von der dänischen Nordseeinsel Röm nach Sylt oder vom Strand in Cuxhaven-Salenburg zur Insel Neuwerk.

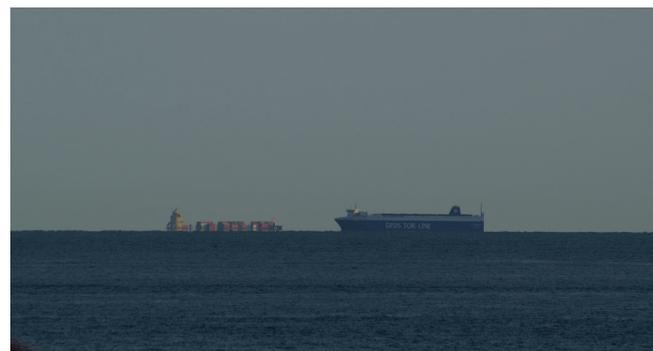


Abbildung 2: U. B. bei der Beobachtung der Erdwölbung (oben). Schiffe verschwinden unter dem Horizont, wenn sie sich entfernen (unten).

Für Seefahrer, Seefahrerinnen und für Menschen, die nahe an einer Küste leben, ist es eine alltäglich mit bloßen Augen zu machende Erfahrung, dass sich nähernde Schiffe am Horizont zunächst mit den Masten bzw. ihren Aufbauten auftauchen, bevor auch der Rumpf sichtbar wird. Mit Digitalkameras großer Brennweite oder mit einem Teleskop lässt sich der Effekt auch überzeugend fotografieren (Abb. 2, unten). Allerdings ist dazu wieder gute Horizontsicht Voraussetzung.

Ich selbst erinnere mich aus meiner Kindheit an Filme, in denen gezeigt wurde, wie beim Blick durch ein gutes Fernglas von einem entfernten Schiff zunächst die Rauchfahne sichtbar wurde, deutlich bevor die Aufbauten des Schiffes auftauchen.

Übrigens: Wenn man am Meer unmittelbar nach Sonnen- oder Monduntergang schnell auf eine hohe Düne oder einen Turm klettert, kann man den Untergang ein zweites Mal beobachten. Abbildung 3 veranschaulicht diese Erfahrung am Beispiel des Feuers eines 28 km entfernten Leuchtturms: Am Strand, in etwa 2 m Höhe über der Wasseroberfläche, ist sein Licht „schon untergegangen“, auf einer Düne, in etwa 4 m Höhe, jedoch noch nicht.



Abbildung 3: Das Licht eines Leuchtturmes - aus unterschiedlichen Höhen (von einer Düne, $h \approx 4\text{m}$) und vom Strand ($h \approx 2\text{m}$) aus fotografiert

2.2 Reisen

2.2.1 Zeitverschiebungen bei Ost-West-Reisen

Wäre die Erde eine flache Scheibe, hätten alle Orte dieselbe Uhrzeit. Zu einem bestimmten Zeitpunkt unterscheiden sich jedoch die Uhrzeiten auf der Erde um bis zu ± 12 Stunden (Abb. 4). Dieser Umstand ist heute durch Weltreisen und Nachrichten aus aller Welt allgemein bekannt. Nachrichten über Geschehnisse in weit entfernten Ländern oder Gespräche und Chats mit Freundinnen, Freunden oder Geschäftspartnern in anderen Ländern machen täglich deutlich, dass sich die Tageszeiten „rund um den Globus“ unterscheiden: So kann man Bekannte in den USA noch wecken, wenn in Europa schon Mittag ist, und am Silvesterabend wird bereits in der 20-Uhr-Tagesschau gezeigt, wie die Australierinnen und Australier das neue Jahr mit einem Feuerwerk begrüßt haben (Abb. 5).

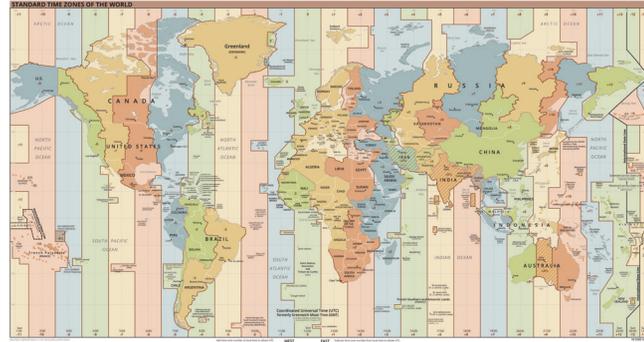


Abbildung 4: Die Erde ist in 24 Zeitzonen eingeteilt, die jeweils ungefähr 15° geografische Länge überdecken.



Abbildung 5: In der 20-Uhr-Tagesschau wird am 31. Dezember gezeigt, wie Australien den Jahreswechsel schon gefeiert hat.

Die Messung des Zeitunterschiedes zwischen Orten ist die Grundlage astronomischer Navigation, genauer: der Messung der geografischen Länge. Die Geschichte dieser Entwicklung parallel zur Ausweitung des Welthandels ab dem 16. Jahrhundert wird von Dava Sobel anschaulich und interessant erzählt [14].

Zeitverschiebungen bei Weltreisen in O-W-Richtung über mehrere Zeitzonen hinweg sind heute eine weit verbreitete Erfahrung („Jetlag“): Bei Reisen nach Osten vergeht die (Sonnen-) Zeit schneller, und man muss bei Ankunft seine Uhr vorstellen, wenn man die Zeitzone gewechselt hat. Bei Reisen nach Westen vergeht die Zeit entsprechend langsamer, und man muss seine Uhr zurückstellen. Innerhalb von Europa kann man diese Erfahrung nur machen, wenn man an den westlichen (Portugal oder England) oder den östlichen Rand (z. B. Griechenland) reist. Das liegt daran, dass hier aus politischen Gründen zwei Zeitzonen zu einer zusammengefasst worden sind.

Auch wenn man die Zeitzone nicht wechselt, kann man die Verschiebung der (Sonnen-) Zeit bemerken: Beispielsweise geht die Sonne bei einer Reise, die immer weiter nach Osten führt, immer früher auf, und sie steht zu einer immer früheren Uhrzeit genau im Süden. Dabei zeigt der Sternenhimmel immer früher dieselbe Stellung. Für die erste Feststellung braucht man einen Kompass zur Bestimmung der Südrichtung. Für die zweite muss man etwas mit dem Sternenhimmel vertraut sein,

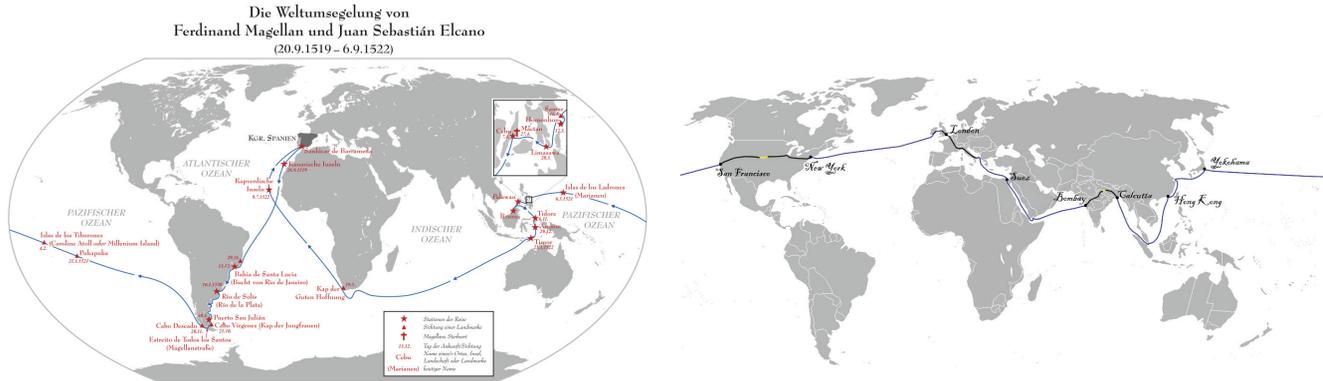


Abbildung 6: Magellans Mannschaft umsegelte die Erde in ost-westlicher Richtung (links). Die Reise „In 80 Tagen um die Welt“ führte von Westen nach Osten (rechts).

um mindestens ein Sternbild unabhängig von seiner Stellung am Himmel wiedererkennen zu können.

Bei einer Weltumrundung von Ost nach West wird ein ganzer Tag verloren, weil sich Zeitverschiebungen im Verlauf der Reise aufsummieren. Die erste Erdumrundung gelang Magellan und seiner Mannschaft in den Jahren 1519-1522 (Abb. 6, links). Über diese Reise gibt es Dokumentationen, z. B. bei Koelliker [11]. Dort sind die Zeiten auf See und in den Häfen genau aufgezeichnet, die sich zu einer Reisezeit von insgesamt 1124 Tagen addieren. Berechnet man jedoch, zum Beispiel mit Hilfe des Julianischen Datums, die Anzahl der Kalendertage vom Start am 10. August 1519 in Sevilla bis zur Heimkehr am 8. September 1522 nach Sevilla, dann ergeben sich 1125 Tage! Eindeutig dokumentiert wurde dieser Effekt auch von Darwin in der Beschreibung seiner Weltumrundung mit der „Beagle“.

Literarisch eindrucksvoll wird der entgegengesetzte Effekt in Jules Vernes „In 80 Tagen um die Welt“ beschrieben. Bei seiner Reise in west-östlicher Richtung um die Erde (Abb. 6, rechts) gewinnt Mr. Fogg einen Tag und gewinnt die schon verloren geglaubte Wette zum Schluss doch noch.

2.2.2 Kippen des Himmels bei Nord-Süd-Reisen

Bei Reisen nach Süden oder Norden ändert sich die Höhe des Polarsterns über dem Horizont. Diese Veränderung lässt sich leicht messen (s. u.), bei weiten Reisen aber auch mit bloßen Augen beobachten. Die Seefahrer, die an den ersten Versuchen beteiligt waren, Afrika auf der Suche nach dem Seeweg nach Indien zu umrunden, fürchteten sich vor der Überquerung des Äquators, weil ihnen dabei der Polarstern „verloren ging“ – und damit die Nordrichtung.

Nicht nur ändert der Polarstern bei diesen Reisen seine Höhe über dem Horizont. Vielmehr verkippt dabei der ganze Himmel. Das ist bei weiten Reisen eindrucksvoll mit bloßen Augen zu beobachten, wenn man ein paar Sternbilder am Himmel erkennen kann – z. B. wenn man das Sternbild Orion auf Feuerland und in Deutschland beobachtet (Abb. 7). Ein anderes auffälliges Beispiel ist der Große Wagen. Seine hinteren

Kastensterne, die die Richtung zum Polarstern zeigen, weisen in Deutschland hoch an den Himmel, in Namibia dagegen unter den Horizont (Abb. 8).



Abbildung 7: Das Sternbild Orion in Hannover (links) und auf Feuerland (aus [7])



Abbildung 8: Die hinteren Kastensterne des Großen Wagens weisen in Deutschland zum Polarstern hoch am Himmel (links), in Namibia dagegen unter den Horizont (rechts).



Abbildung 9: In Deutschland und Namibia gleichzeitig aufgenommene Fotos des Mondes (überbelichtet) und des Sternenhimmels

Abbildung 9 veranschaulicht, wie der Himmel zwischen Deutschland und Namibia verkippt: Zwei Fotos des Mondes und des Sternenhimmels wurden in den beiden Ländern gleichzeitig aufgenommen und anschließend so überlagert, dass die identifizierbaren Sterne übereinander liegen ([19]). Die Beschriftungen, die auf beiden Fotos parallel zum Horizont angebracht wurden, zeigen auf dem kombinierten Bild, dass die Horizonte der beiden Beobachtungsorte um etwa 70° gegeneinander verdreht sind.

2.3 Weltraumfotos

Es gibt zahllose Fotos, die die Erdkugel - oder einen Teil von ihr - vom Weltraum aus zeigen (Abb. 10). Viele von ihnen sind sicher bearbeitet, z. B. kontrastverstärkt oder farbverstärkt. Solche Bearbeitungen dienen oft dazu, den visuellen Eindruck von Menschen wiederzugeben – entweder den der Menschen, die die Bilder aufgenommen haben (wie bei Abbildung 10, links), oder den, den Menschen gehabt hätten, wenn sie zum Zeitpunkt der Aufnahme an Bord der entsprechenden Raumsonde gewesen wären (wie bei Abbildung 10, rechts). Viele Bilder sind aus mehreren Einzelfotos zusammengesetzt – zwar nicht die berühmte „Blue Marble“ (Abb. 1, rechts), wie von den Kindern behauptet, aber die Bilder der ganzen Erde, die nach Ende des Apollo-Programms bis 2015 von der NASA veröffentlicht wurden [12]. Solche Zusammensetzungen sind sicher keine Fälschungen, insbesondere dann, wenn die Bearbeitung nicht verheimlicht wird. Auch bei der optischen Wahrnehmung der Menschen werden vom Gehirn viele von den bewegten Augen empfangene Bilder zu einem Gesamteindruck zusammengesetzt.



Abbildung 10: links: Die Erde über der Mondoberfläche aus der Sicht von Apollo 8, rechts: Erde und Mond, von der Sonde Mars Express aus dem Weltraum fotografiert

Nur Verschwörungstheoretiker und -innen können an der Echtheit dieser Fotos *in ihrer Gesamtheit* zweifeln, die nicht nur von „den Amerikanern“, sondern durch Astronautinnen und Astronauten und Raumkapseln vieler raumfahrender Nationen aufgenommen wurden.

Ernster als die Einwände gegen die Echtheit aller Bilder sind meines Erachtens die Zweifel von unverbildeten Kindern, die keinen Zusammenhang erkennen können zwischen ihrer Erfahrung einer flachen Erde (Abb. 1, links) und der als Kreisscheibe abgebildeten Erde: „Das soll die Erde sein, auf der ich lebe? Wo ist denn mein Zuhause? Wie ist es möglich, dass auf der anderen Seite auch Menschen leben?“ ([4], S.

16). Wohl nicht zufällig sind fast alle Bilder der Erdkugel, wie die „Blue Marble“, nachträglich so gedreht worden, dass Norden oben liegt. Den Bewohnern der Nordhalbkugel soll wohl die Zumutung erspart werden, sich vorstellen zu müssen, sie hingen „unter“ der Erde - wie unsere „Antipoden“ oder „Gegenfüßler“ (Abb. 11)!



Abbildung 11: „Hängen“ unsere Antipoden „unter“ der Erde?

Freunde von mir, denen ich die Frage nach den Beweisen für die Kugelform der Erde weitergeleitet hatte, schlugen als „eigenes Experiment“ vor, einen Wetterballon steigen zu lassen, der Höhen erreiche, von denen aus eine Kamera die Krümmung der Erdoberfläche zeigen könne. Im Internet kann man viele solche Projekte finden und sich entsprechende Filme ansehen ¹. Die Filme, die ich dort gefunden habe, sind zwar sehr eindrucksvoll, können aber leider die Frage nach der Erdgestalt nicht befriedigend beantworten: Der abgebildete Horizont ist zwar meist nach unten gekrümmt, manchmal aber auch geradlinig oder sogar in die entgegengesetzte Richtung gebogen (Abb. 12).



Abbildung 12: Die Krümmung der Erdoberfläche bei einem selbst gestarteten Wetterballon wird hier weitgehend durch die Verzeichnung des einfachen Objektivs der Kamera hervorgerufen.



Abbildung 13: Die ISS über der gekrümmten Erdoberfläche Die Erdkrümmung auf NASA-Fotos wie Abbildung 13 wird dagegen nicht durch einen Abbildungsfehler der professionellen

¹ siehe z. B. <https://www.stratoflights.com/education/beispiel-projekte/>

Kamera hervorgerufen: Auf allen ähnlichen Bildern ist die Oberfläche, unabhängig von ihrer Position auf den Fotos, *nach innen* gekrümmt.

2.4 Mondfinsternis

Bei Mondfinsternissen fällt der Erdschatten auf den Mond. Das kann man sich besonders leicht klar machen, wenn der Mond dabei nahe am Horizont steht und die Sonne gerade untergegangen ist bzw. bald aufgehen wird: Der Mond steht am Himmel der Sonne direkt gegenüber. Der Schatten auf dem Mond ist *immer* kreisförmig (Abb. 14) – unabhängig von der Position des Mondes über dem Horizont. Steht der Mond bei der Finsternis hoch am Himmel, könnte es auch der Schatten einer Kreisscheibe sein, aber beim tief stehenden Mond würde eine Scheibe einen geradlinig begrenzten Schatten erzeugen.

Steht der Mond bei der Finsternis nahe am Horizont und der Erdschatten ist zum Horizont hin gekrümmt, wird auf dem Mond der Teil der Erde abgebildet, auf dem man selbst steht ([8], Abb. 15, links). Ist in dieser Situation dagegen der Rand des Schattens nach oben gekrümmt, sieht man den Schatten des Teils der Erde, auf dem unsere „Antipoden“ leben. Die Erde ist also nicht nur oben, sondern auch unten rund. „Die Kugel ist also vollständig; sie schwebt frei, und wenn wir auf die andere Seite gehen, stehen wir kopf.“ (Wagenschein [15]). Bei der partiellen Mondfinsternis am Abend des 16. Juli 2019 hat es nach langer Zeit wieder eine Gelegenheit für eine solche Beobachtung gegeben (Abb. 15, rechts).



Abbildung 14: Der kreisförmige Erdschatten auf dem Mond bei Mondfinsternis

2.5 Sonnenuntergang und Erdkugel

Die Art und Weise, wie wir die Sonne untergehen sehen, beweist die Kugelgestalt der Erde: Bei flacher oder sehr viel größerer Erde würde die Sonne vor ihrem Untergang viel stärker abgeflacht werden und oberhalb des Horizontes verschwinden [6].



Abbildung 15: links: 1985 zeigte der gerade aufgegangene partiell verfinsterte Mond den Schatten des Teils der Erde, auf dem der Beobachter gerade steht. rechts: Bei der partiellen Mondfinsternis am 16. Juli 2019 warf der Boden unserer Antipoden seinen Schatten auf den Mond.

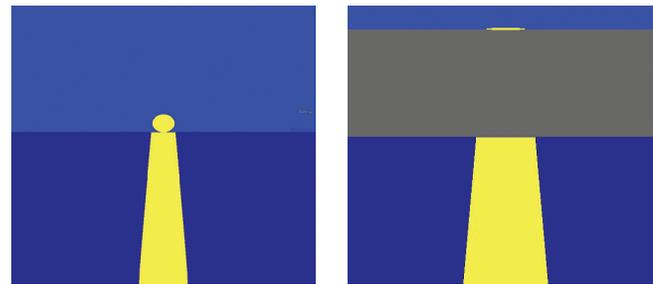


Abbildung 16: Bei einer flachen Erde ($R_E=63700$ km, rechts) sähen Sonnenuntergänge ganz anders aus als bei der Erdkugel (links) [6].

3. Messungen

Es gibt viele Möglichkeiten, die Form der Erde nicht nur zu beobachten, sondern auch ihre Größe zu messen. Einige einfache Verfahren sollen hier kurz vorgestellt werden, um zu ihrer Nachahmung anzuregen. Die Ergebnisse sind in der Regel nicht sehr exakt. Wesentlich aber ist, dass sie alle zu (ungefähr) demselben Ergebnis kommen - unabhängig davon, an welchen Orten der Erde die Messungen durchgeführt werden.

3.1 Die Methode von Erathostenes

Für seine Messung der Erdgröße musste Erathostenes keine Annahme über die Entfernung der Sonne machen. Er nutzte lediglich die Parallelität der Sonnenstrahlen, die er im Alltag beobachten und ausmessen konnte. Die Idee war genial, die Durchführung (über die man nichts Genaues weiß) aber schwierig; denn zusätzlich zur Winkelmessung ist es erforderlich, eine große Entfernung auf der Erde zu messen – auch heute der schwierigere Teil der Messung.

Heute kann die Messung relativ einfach wiederholt werden. Dazu reicht bei sorgfältiger Messung schon die Länge der Insel Sylt [1].

3.1.1 Messungen mit Schattenstab

Sonnenstandsmessungen sind mit einem Schattenstab anschaulich und einfach möglich (siehe z. B. [4], S. 10f). Der Schattenstab kann sogar zu einem hochpräzisen Messinstrument erweitert

werden. Davon haben wir z. B. bei den Messungen auf Sylt [1] und bei der Messung des Erdradius im Rahmen eines Projektes des „Internationalen Jahres der Astronomie 2009“ (IYA 2009) Gebrauch gemacht [3].

Man kann den Schattenstab benutzen, um die genaue Südrichtung zu bestimmen und den Zeitpunkt des lokalen Mittags zu messen, an dem die Sonne genau im Süden steht ([4], S. 23). Werden solche Messungen an verschiedenen Orten der Erde durchgeführt, kann man aus den Zeitdifferenzen die Unterschiede zwischen den jeweiligen geografischen Längen berechnen - und daraus schließlich, bei bekannter Ost-West-Entfernung den Erdumfang ableiten. Bei unseren weltweiten Projekten ist das mehrfach mit Erfolg durchgeführt worden (siehe z. B. [3]).

Es ist sogar möglich, die Messung zu beliebigen Zeiten durchzuführen, wenn an verschiedenen Orten der Erde gleichzeitig die Höhe der Sonne über dem Horizont und ihr Azimut, d. h. ihre Richtung gegen Süden, gemessen wird. Während des IYA2009-Projektes haben wir eine solche Messung für eine Radiosendung innerhalb von Nordrhein-Westfalen live durchgeführt („Die Vermessung der Erde“ [17]). An dem Internet-Projekt haben sich Menschen aus vielen Teilen der Erde beteiligt. Die Visualisierung der gleichzeitig gemessenen Sonnenpositionen der Projektteilnehmer (Abb. 17, oben) veranschaulicht, dass die Horizonte der teilnehmenden Gruppen unterschiedlich gegen die Sonne geneigt sind. Die sich dabei ergebenden Messwerte für den Erdradius werden erwartungsgemäß umso genauer, je weiter die Beobachtungsorte voneinander entfernt sind (Abb. 17, unten).

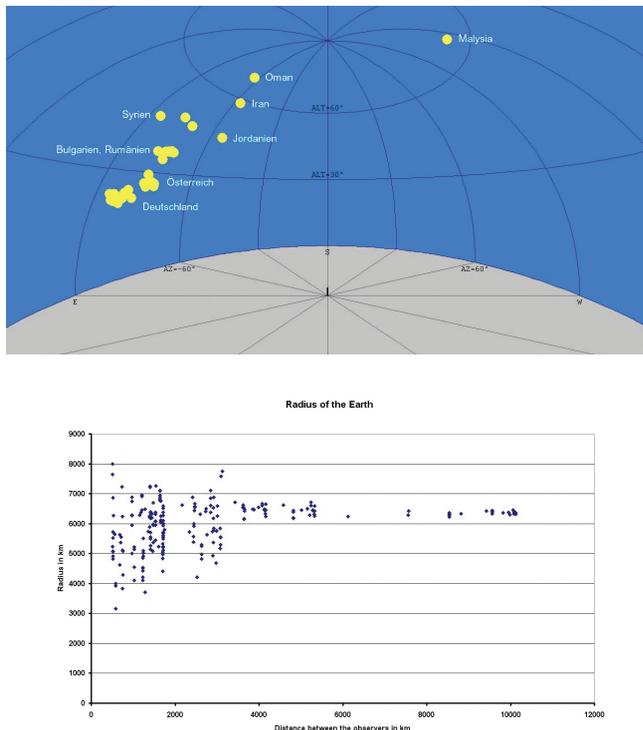


Abbildung 17: Die um 6:47 UT in verschiedenen Ländern gemessenen Positionen der Sonne über ihrem Horizont (oben) und die sich bei solchen Messungen ergebenden Werte für den Erdradius (unten)

3.1.2 Messungen mit Pendelquadrant

Mit einem einfach selbst zu bauenden Messgerät, einem sogenannten Pendelquadranten, kann man die Höhe eines Himmelsobjektes über dem Horizont messen. Durch Messung der Höhe des Polarsternes kann man so die geografische Breite des eigenen Standortes bestimmen und die Messung von Erathostenes wiederholen. Vor vielen Jahren habe ich das bei Reisen nach Südfrankreich und nach Dänemark häufig getan. Die Änderung der Polhöhe entsprach dabei immer im Rahmen der Messgenauigkeit der in N-S-Richtung zurückgelegten Entfernung.

Im Jahr 2016 haben wir die Messung von Bochum und Namibia aus an der gerade kulminierenden Sonne wiederholt. Anders als beim Polarstern muss man bei der Sonne darauf achten, gleichzeitig zu messen. Aus den Messwerten ($h_s=60.5^\circ$ (im Süden) in Bochum und $h_s=45.5^\circ$ (im Norden) in Namibia) berechneten wir, dass die Horizonte der Beobachtungsorte um 74° gegeneinander gekippt sind (siehe [16]). Das stimmt recht genau mit der Differenz der geografischen Breiten überein. Bei bekannter Entfernung zwischen den Orten (z. B. aus der Flugzeit) lässt sich daraus der Umfang der Erde ableiten.

3.2 Messungen am Horizont

Wenn man von einem Berg bei sehr klarem Wetter auf das Meer schaut und, z. B. mit einem Pendelquadranten, den Winkel gegen die Horizontale misst, unter dem man den Horizont sieht, stellt man fest, dass dieser Winkel kleiner als 0° ist. Auf einem 1000 m hohen Berg erhält man bereits einen Winkel von -1° , einen Wert, aus dem man sich bei bekannter Höhe den Erdradius berechnen kann.

Das Verschwinden von Schiffen unter dem Horizont lässt sich anhand von Fotos ebenfalls benutzen, um die Größe der Erde zu bestimmen (siehe die Praktikumsaufgabe [5]).

4. Die heutige Welt

Unsere heutige Welt ist nicht zu verstehen und hätte sich nicht so entwickeln können, wenn die Erde *keine* Kugel wäre: Der weltweite Reiseverkehr (z. B. die über den Pol führenden *Flugrouten* von Europa nach Kanada) wäre ohne die Kugelform unverständlich, und moderne Navigation wäre ohne GPS, das auf die Erde umkreisenden *Satelliten* beruht, nicht möglich. Kommunikation und Fernsehen beruhen auf Satelliten, die zum Teil geostationär sind. Sie sind immer über dem Äquator positioniert und umkreisen die Erde genauso schnell (d. h. mit derselben Frequenz), wie die Erde sich dreht. Deshalb „stehen“ sie immer über demselben Ort auf der Erde. Wie wäre das, ohne die Kugelform und die Drehung der Erde zu verstehen?

5. Schluss

Die Aussagen über die Form der Erde, ihre Drehung und ihre Bewegung um die Sonne sind schwer in Einklang mit

der eigenen unmittelbaren sinnlichen Erfahrung zu bringen². Kritische Fragen („Woher wissen wir ...“, „Ist ... echt oder zwingend?“) zu einzelnen Argumenten sollten deshalb ernst genommen und unterstützt werden. Sie sind Anzeichen von Kritikfähigkeit und wacher Intelligenz.

Einzelne Wahrnehmungen können auf Täuschungen beruhen, Fotos können sich als manipuliert oder gar gefälscht erweisen, und Messungen sind bei genauer Prüfung vielleicht nicht so überzeugend, wie sie dargestellt werden. Überwältigend überzeugend ist jedoch die Vielzahl und Unterschiedlichkeit der Argumente und Messungen:

- Ganz verschiedene Beobachtungen lassen sich zwanglos als Folge der Erdgestalt deuten: die Verkippung des Himmels und die Zeitverschiebung bei Weltreisen, der sich zwischen dem Beobachter bzw. der Beobachterin und einem weit entfernten Ufer oder Schiff „aufwölbende Berg“ der Wasseroberfläche, der immer kreisförmige Erdschatten auf dem Mond bei Mondfinsternis, ...
- Tausende Fotos von der Erde, aufgenommen von vielen Astronauten und Astronautinnen bzw. Raumkapseln vieler Nationalitäten, zeigen ihre Form - selbst wenn sie sich als

² Auf die Drehung der Erde (siehe z. B. [2]) und die Bewegung der Sonne bzw. der Erde um die Sonne, gehe ich hier nicht ein.

zusammengesetzt oder im Einzelfall sogar als Fälschung herausstellen sollten.

- Die Größe der Erde, ihr Radius, kann mit vielen voneinander verschiedenen Methoden gemessen werden. Und das Ergebnis ist immer (fast³) dasselbe. Bei den Messungen nach Erathostenes mit Schattenstäben z. B. ist das Ergebnis unabhängig von den Orten der Messung und der Richtung, in der sie relativ zueinander liegen.

Die Menschheit hätte den Weltraum niemals erreicht, wenn sie nicht lange vorher die Kugelform der Erde erkannt und sie ausgenutzt hätte. Überhaupt ist unsere heutige Welt (Verkehr, Kommunikation, Navigation, ...) ohne Berücksichtigung der Erdgestalt völlig unverständlich.

Wichtig aber ist mir die Frage nach dem Ursprung dieses Wissens: Wie hat es die Menschheit herausgefunden (als sie noch nicht weit reisen konnte), und wie kann man es auch heute noch durch Nachvollzug der damaligen Argumente, Beobachtungen und Messungen und mit den eigenen Augen „einsehen“? Dazu hat Martin Wagenschein vor vielen Jahren einen wunderbaren Aufsatz geschrieben [15].

³ d. h. abgesehen von Abweichungen von der Kugelform, auf die ich hier nicht eingehen, und von Messungenauigkeiten

Udo Backhaus *Universität Duisburg-Essen*

Literatur

- [1] Backhaus, U.; Vornholz, D.: Wie lang ist Sylt?, *Astronomie und Raumfahrt*, 33/3, 32 (1996) (<http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/AstroMaterialien/Literatur/EratosthenesaufSylt.pdf>)
- [2] Backhaus, U., Draszow, S.: Dreht sich die Erde wirklich?, *Vorträge der DPG 2003 in Augsburg* (<http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/publicat/FallversucheDPG.pdf>)
- [3] Backhaus, U.: Die Größe der Erde und die Entfernung des Mondes. Anregungen zur astronomischen Zusammenarbeit zwischen Schulen. *Praxis der Naturwissenschaften/Physik* 62/8, 18 (2013) (<http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/publicat/ErdgroesseundMondentfernung.pdf>)
- [4] Backhaus, U.; Lindner, K.: *Astronomie plus*, Cornelsen: Berlin 2015
- [5] Backhaus, U.: Das Verschwinden eines Schiffes am Horizont, Aufgabe des Astronomischen Schlechtwetterpraktikums, (<http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/AstroPraktikum/Erdradius/SchiffamHorizont.zip>)
- [6] Backhaus, U.: Gedanken beim Sonnenuntergang, PLUS LUCIS 1-2/2015, 4 (2015) ([http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/publicat/GedankenbeimSonnenuntergang\(PlusLucis_1-2015\).pdf](http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/publicat/GedankenbeimSonnenuntergang(PlusLucis_1-2015).pdf))
- [7] Backhaus, U.: Orion und die Gestalt der Erde, *MNU* 68/2, 89 (2015)
- [8] Backhaus, U.: Gedanken und Beobachtungen beim Betrachten einer Mondfinsternis, *MNU Journal* 70/6, 364(2017) (<http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/publicat/Mofi2015MNUfinal.pdf>)
- [9] Backhaus, U.: Die Mondentfernung selbst messen, *Sterne und Weltraum* 58/1, 78 (2019)
- [10] Falke, T.: www.duene1.de/homepage/weiss11/weiss153.htm
- [11] Koelliker, O.: Die erste Umseglung der Erde, reprint der Originalausgabe von 1908, Reprint-Verlag: Leipzig o. J.
- [12] n-tv (21. 7. 2015): Nasa macht einzigartiges Foto der Erde, (<http://www.n-tv.de/wissen/Nasa-macht-einzigartiges-Foto-der-Erde-article15560691.html>)
- [13] Ossing, F.: Welches sind die vier stichhaltigsten Beweise dafür, dass die Erde eine Kugel ist?, (<https://www.wissenschaft-im-dialog.de/projekte/wieso/artikel/beitrag/welches-sind-die-vier-stichhaltigsten-beweise-dafuer-dass-die-erde-eine-kugel-ist/>)
- [14] Sobel, D.: *Längengrad*, Berlin-Verlag 2003
- [15] Wagenschein, M.: Die Erfahrung des Erdballs, in: "Naturphänomene sehen und verstehen – Genetische Lehrgänge", Klett, Stuttgart 1988 S. 309-342 (<http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/AstroMaterialien/Literatur/Erdball.pdf>)
- [16] Wagenschein, M.: Mathematik aus der Erde (Geo-metrie), in: *Naturphänomene sehen und verstehen. Genetische Lehrgänge*. Stuttgart: Klett 1988, S. 298ff (<http://www.didaktik.physik.uni-due.de/~backhaus/AstroMaterialien/Literatur/WagenscheinMathematikausderErde.pdf>)
- [17] „WDR 5 – LEONARDO“: Die Vermessung der Erde, *WDR 5*, 24. 4. 2009 (<http://www.didaktik.physik.uni-due.de/IYA2009/impressions/Essen/Erdvermessung%im%20Jahr%20der%20A...pdf> und [http://www.didaktik.physik.uni-due.de/IYA2009/SchwerpunktVermessung\(LEONARDOau090425\).mp3](http://www.didaktik.physik.uni-due.de/IYA2009/SchwerpunktVermessung(LEONARDOau090425).mp3)) (Tonaufnahme)

Bildnachweise

Abb. 1 links: Udo Backhaus, rechts: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/97/The_Earth_seen_from_Apollo_17.jpg

Abb. 2 links: Udo Backhaus, rechts: Falke, T. (www.duene1.de/homepage/weiss11/weiss153.htm), Copyright Thorsten Falke, Genehmigung erteilt (Thorsten Falke, Düne, 27498 Helgoland; duene1.aol.com)

Abb. 3 Quelle nicht mehr auffindbar

Abb. 4 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World_Time_Zones_Map.png

Abb. 5 Bild von Patty Jansen auf Pixabay

Abb. 6 links: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Weltumsegelung_von_Ferdinand_Magellan_und_Juan_Sebastian_Elcano.png (Copyright: Lencer),

rechts: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Around_the_World_in_Eighty_Days_map.png#mw-jump-to-license (Copyright: Roke)

Abb. 7 Udo Backhaus

Abb. 8 Udo Backhaus

Abb. 9 Udo Backhaus und Alfred Knülle-Wenzel (Genehmigung erteilt)

Abb. 10 links: <http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/alsj/a410/AS8-14-2383HR.jpg>, <https://www.nasa.gov/multimedia/guidelines/index.html>,

rechts: <http://sci.esa.int/mars-express/33538-earth-and-moon-captured-by-hrsc/> https://planetary.s3.amazonaws.com/assets/images/3-earth/2013/20130613_Mars_Express_Earth-Moon_image.jpg

Abb. 11 aus Backhaus et al. [4]

Abb. 12 <https://www.stratoflights.com/education/beispiel-projekte/>

Abb. 13 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:STS-128_ISS_Separation_01.jpg

Abb. 14 Udo Backhaus

Abb. 15 links: Udo Backhaus (erzeugt mit Guide), rechts: Alfred Knülle-Wenzel (Genehmigung erteilt)

Abb. 16 Simulation von Udo Backhaus

Abb. 17 Udo Backhaus