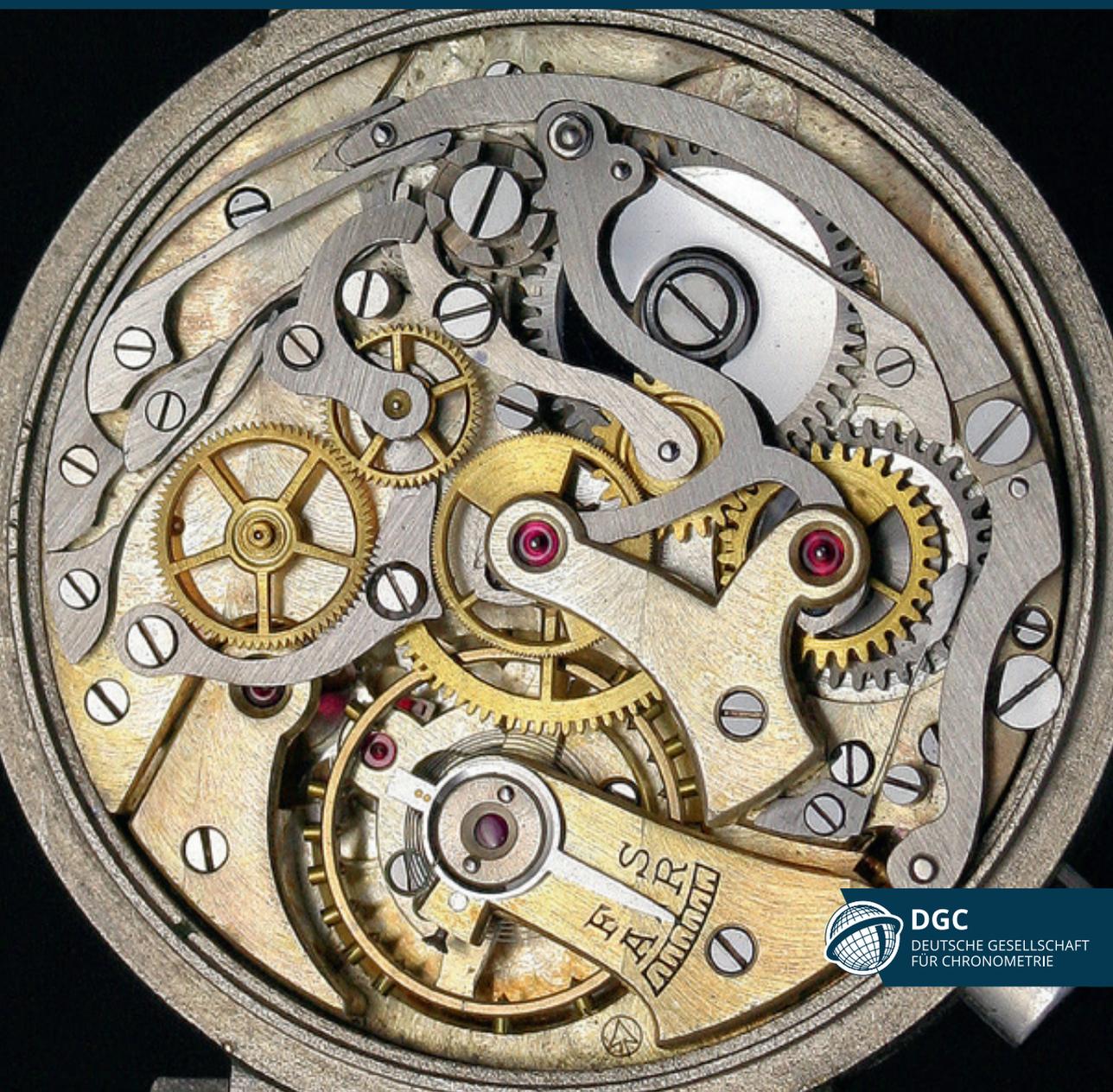


DEUTSCHE GESELLSCHAFT
FÜR CHRONOMETRIE

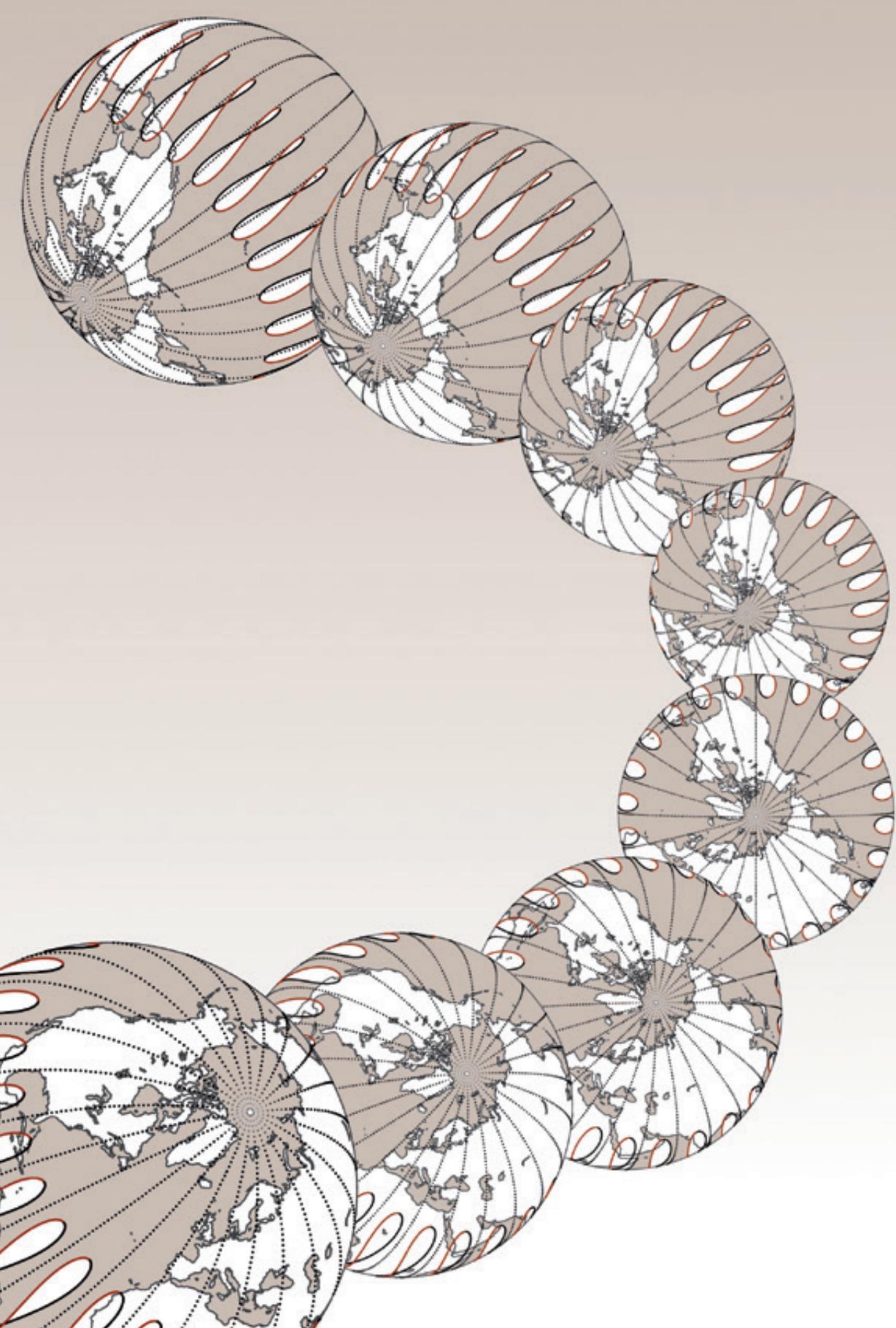
JAHRESSCHRIFT 2020

Band 59



DGC

DEUTSCHE GESELLSCHAFT
FÜR CHRONOMETRIE



JOACHIM HEIERLI

Eine Sonnenuhr mit Stundenlinien in Erdgestalt

Der Bau von Sonnenuhren ist eine uralte Disziplin der Wissenschaft. Die bekanntesten Entdeckungen wurden in der Antike und im Mittelalter gemacht, aber auch moderne Forscher trugen ihren Teil bei. Um 1956 baute Heinz Schilt, ein Schüler von Wolfgang Pauli, eine Unterwassersonnenuhr im Badeweiher seines Gartens. Durch die Brechung des Lichts an der Wasseroberfläche erschienen ihre Stundenlinien gekrümmt. Schilts Befund führt zu der gestalterischen Möglichkeit, die Stundenlinien der Sonnenuhr durch Auswahl der Brechzahl umzuformen. Dieser Ansatz wird in der vorliegenden Arbeit weiterentwickelt und mit Thales Konzept der gnomonischen Erdprojektion kombiniert, was zu einem attraktiven Ergebnis führt: Mittels Lichtbrechung kann eine Sonnenuhr gebaut werden, deren Stundenlinien die Erde und ihre Längengrade bildlich darstellen. Zur Demonstration der Idee wurde ein Prototyp erstellt.

Einleitung

Seit babylonischer Zeit sind Sonnenuhren ein fester Bestandteil von Wissenschaft und Zivilisation. Kaum ein anderes Messinstrument hatte eine so lang andauernde und tiefgreifende Wirkung auf das öffentliche Leben und auf die persönlichen Gewohnheiten der Leute. Die Sonnenuhren der Antike und des frühen Mittelalters zeigten noch Stunden ungleicher Länge, bis ein findiger Kopf ersann, den Stundenwinkel der Sonne als neues Zeitmaß zu verwenden. Wer diese Idee hervorbrachte, ist unbekannt (Bilfinger 1892; Drecker 1925; Turner 1989). Das neue Zeitmaß war ein bedeutsamer Fortschritt in der Zeitmesskunst und löste ein allgegenwärtiges Problem der damaligen Zeit: die Synchronisation der driftenden mechanischen Uhren. Der Stundenwinkel war ein weitaus besseres Zeitsignal als die zuvor verwendeten Maße. Die Stunden des Jahres waren fortan von nahezu gleicher Dauer, mit Schwankungen von weniger als 1.3 s pro Stunde, was ihnen die Bezeichnung *horae aequales* bescherte. Weitere Vorteile waren, dass der Stundenwinkel bei Sonnenschein überall beobachtet werden konnte und immer in Phase mit dem Tageslicht blieb. Die wahre Ortszeit, wie der Stundenwinkel der Sonne heute heißt, blieb für mehrere Jahrhunderte der unbestrittene Zeitstandard, bis sie im 19. Jahrhundert durch die mittlere Ortszeit ersetzt wurde (Hennig 1976). Wenige Jahrzehnte später wurden weit genauere Zeitsignale in Form von Quarzuhren und Atomuhren entwickelt (Brouwer 1951; Bauch 2018; Audoin u. a. 2001).

Die meisten heutigen Sonnenuhren verwenden eine gnomonische Projektion (Snyder 1987) zur Anzeige der wahren Ortszeit. Auf solchen Sonnenuhren werden die Stundenlinien durch Geraden dargestellt. In diesem Beitrag werden

Abb. links: Sonnenuhren in Erdgestalt für Orte zwischen Buenos Aires und Honolulu. Berechnet für eine Brechzahl von 1.5 (siehe Text).

auf diese Weise gebildete Sonnenuhren als ›klassische‹ Sonnenuhren bezeichnet. Ihre Stundenlinien werden aus der gnomonischen Projektion der Stundenebenen des äquatorialen Bezugssystems gebildet. Die Haupttrichtung dieses Bezugssystems ist die geografische Polachse der Erde. Wann die klassischen Sonnenuhren erfunden wurden, ist bis heute unklar. Im 15. Jahrhundert verbreiteten sie sich rasch in ganz Europa (Turner 1989, Philipp u. a. 1994). Sie waren leicht abzulesen und ihre Stundenlinien waren einfach zu konstruieren. Einige gingen gar soweit, die klassische Sonnenuhr als die vollkommene, endgültige Form der Sonnenuhr zu betrachten, die keine weitere Entwicklung zuließ (Rohr 1996, S. 15 – 16). Das rein geometrische Konzept der gnomonischen Projektion, worauf die klassische Sonnenuhr beruht, wurde bereits viel früher entdeckt, wahrscheinlich von Thales (580 v. Chr.).

Die wahre Ortszeit t ist definiert als der Stundenwinkel der Sonne h plus eine halbe Umdrehung (bzw. einen halben Tag). Das heißt, es ist $t = h + 12 \text{ h}$ (Meyer 2008; Waught 1973). Dies gilt für jeden Punkt auf der Erdoberfläche mit Ausnahme der geografischen Pole. Der Stundenwinkel der Sonne ist der Winkel zwischen dem Längengrad der Sonne und dem Längengrad des Beobachters, gemessen in Vierundzwanzigstel der vollen Umdrehung. Das terrestrische Gegenstück des Stundenwinkels ist die geographische Länge, gemessen in Bezug auf Greenwich. Obwohl der Stundenwinkel und die geographische Länge dazu dienen, verschiedene Dinge zu orten (die Position eines Himmelsobjekts beim ersten, eines terrestrischen Objekts beim zweiten), unterscheiden sie sich nur durch eine additive Konstante, die durch die Differenz der Länge des Beobachters zu Greenwich gegeben ist (Bensky 2010).

Die Stundenlinien einer Sonnenuhr (Linien gleichen Stundenwinkels) stellen demnach eine Abbildung der Erde und ihrer Längengrade dar (Linien gleicher geografischer Länge). Auf klassischen Sonnenuhren ist dieser Zusammenhang wenig ersichtlich, da die Abbildung gnomonisch verzerrt ist: Kaum ein Betrachter der klassischen Sonnenuhr erkennt die Längen- und Breitengradlinien der Erde in der Zeichnung ihrer Stunden- und Deklinationslinien (Abb. 1). Eine

Herausforderung besteht demnach darin, eine Sonnenuhr zu entwerfen, welche die Beziehung zwischen Stundenlinien und Längennetz auf natürliche Weise sichtbar macht. Eine geometrische Lösung für dieses Problem ist seit der Antike bekannt. Sie beruht darauf, die Auffangfläche des Schattens kugelförmig auszugestalten, entweder massiv (Schumacher 1978) oder hohl (Flück u. a. 2016; Feustel 2018). Die auf diese Weise erhaltene Kugel Sonnenuhr stellt ein (fast) kongruentes Modell der Erde dar. Interessanterweise gibt es noch eine weitere Lösung für die-

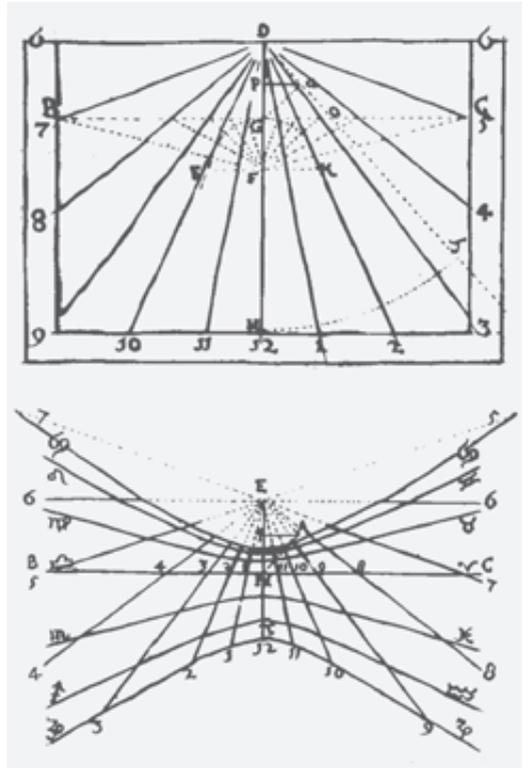


Abb. 1: Lineatur der klassischen Sonnenuhr in Südausrichtung, nach einer Originalzeichnung von Hans Jakob Fäsi (Fäsi 1697). Die obere Zeichnung zeigt die Stundenlinien, die untere zeigt sowohl die Stundenlinien (Geraden) als auch die Deklinationslinien (Kegelschnitte). Die Erdkugel ist in der Lineatur nicht zu erkennen.

ses Problem. Diese Lösung wird im Folgenden entwickelt und behält die ebene Auffangfläche der klassischen Sonnenuhr bei. Ausgangspunkt ist eine Unterwassersonnenuhr, die um 1956 von Heinz Schilt, einem Studenten von Wolfgang Pauli an der ETH Zürich, gebaut wurde. Der Schattenwurf der Schiltschen Sonnenuhr wird durch eine Störung an der Wasseroberfläche gebildet und am Boden des Badeweiher abgebildet, wo auch die Stundenlinien aufgebracht sind (Schilt 1985). Im Gegensatz zu den geraden Stundenlinien der klassischen Sonnenuhr erscheinen die Stundenlinien der Schiltschen Sonnenuhr gebogen. Ihre Gestalt wird durch die Brechzahl des Wassers bestimmt.

Gestaltung der Stundenlinien mit dem Snelliusschen Gesetz

Wie die Schiltsche Sonnenuhr zeigt, bietet die Lichtbrechung die Möglichkeit, die Stundenlinien der Sonnenuhr umzugestalten. Dazu ergänzen wir die übliche Definition der Sonnenuhr »Eine Sonnenuhr besteht aus einem Gegenstand, der einen Schatten auf eine skalierte Oberfläche wirft,« (Turner 1989; Rohr 1996, S. 44) mit dem

Zusatz »und einem lichtbrechenden Medium dazwischen.« Die Lichtbrechung gibt dem Sonnenuhrenbauer einen Freiheitsgrad in die Hand, der ihm oder ihr ermöglicht, die Sonnenstrahlen innerhalb der Möglichkeiten des Snelliusschen Gesetzes umzulenken und damit die Stundenlinien zu verschieben. Das kann auf verschiedene Arten genutzt werden: zum Beispiel, um das Wunder von Ahas nachzubilden (Sadler 1995; Holden 1995) oder, wie wir es hier vorhaben, um Stundenlinien zu erschaffen, welche eindeutig die Erde darstellen. In der Vergangenheit wurden verschiedentlich Sonnenuhren gebaut oder vorgeschlagen welche das Snelliussche Gesetz verwenden, aber kein Vorschlag zielt darauf ab, dieses Naturgesetz zur Darstellung der Erde zu verwenden. Die folgende Analyse basiert auf einem Ergebnis der geometrischen Optik (Abb. 2): das Ensemble aller Lichtstrahlen, die sich in einer Ebene h fortpflanzen und bei O auf eine planparallele Platte mit Brechzahl n einfallen, bildet einen elliptischen Kegel innerhalb der Planplatte. Ein Beweis für die Behauptung ist in Heierli 2019 aufgeführt. Der Beweis ist einfach formuliert und kann als Unterrichtsübung in

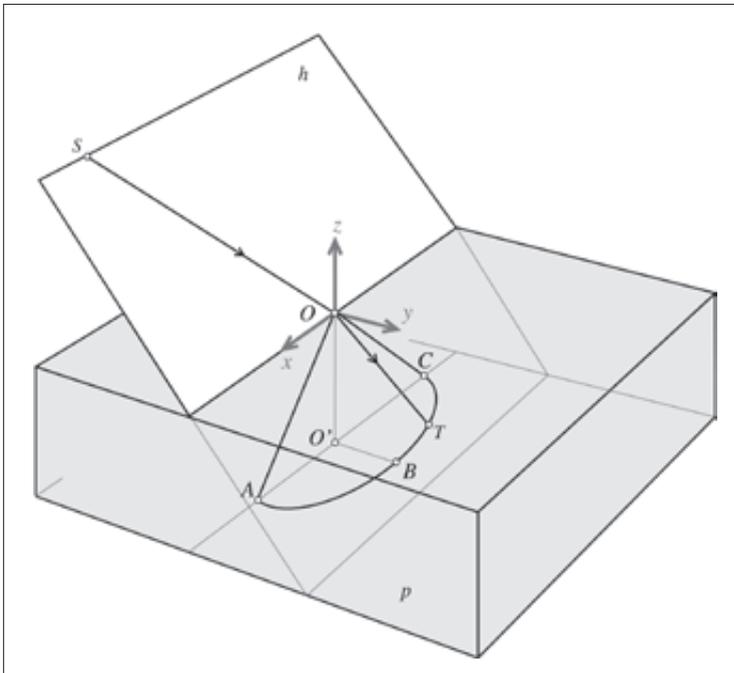
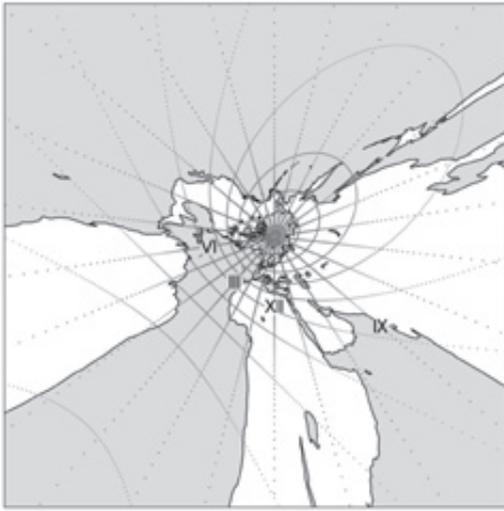


Abb. 2: Refraktion eines sich in der Stundenenebene h fortpflanzenden Lichtstrahls, der am Fixpunkt O auf eine planparallele transparente Platte einfällt. Die Linie $S-O-T$ zeigt einen beispielhaften Lichtweg. Der Kegel markiert den geometrischen Ort aller Lichtwege durch O . Die Punkte A und C entstehen bei streifenförmigem Lichteinfall entlang der x -Achse (siehe Abbildung). Punkt B entsteht bei steilster Inzidenz eines Lichtstrahls in h .

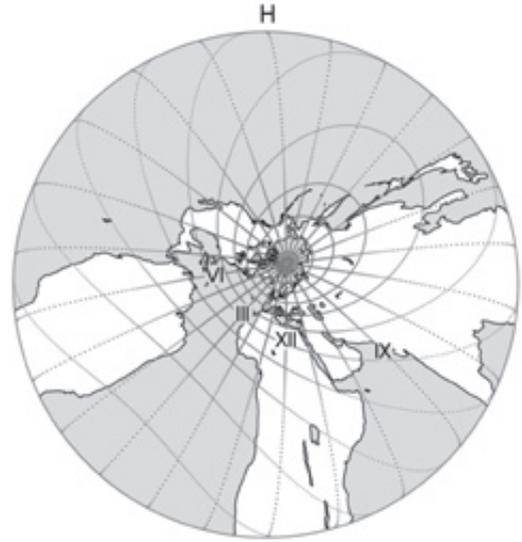
den Fächern Optik oder Astronomie verwendet werden. Er enthält auch die Gleichungen zur Konstruktion der Stundenlinien.

Die Schnittmenge zwischen dem elliptischen Kegel und der Basis der Planplatte bildet die Stundenlinie für die Stunde h (d.h. ein Sonnenstrahl, der durch O geht, schneidet diese Stundenlinie zur wahren Ortszeit $t = h + 12$,

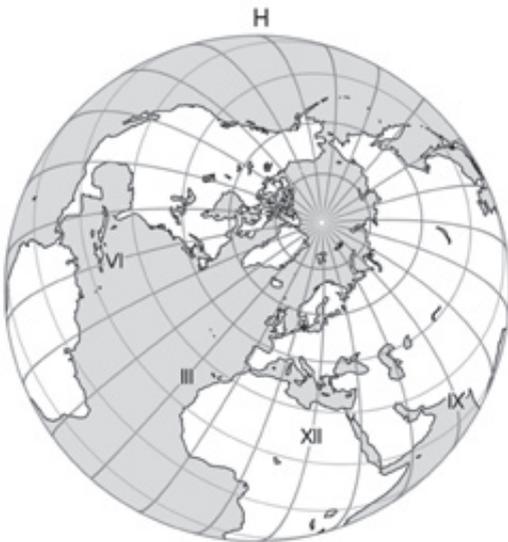
ansonsten geht er an ihr vorbei ohne sie zu schneiden). Werden die Kegel für die restlichen 23 vollen Stunden berechnet, erhält man die 24 Stundenlinien der Sonnenuhr. Rein geometrisch ist der in Abb. 2 gezeigte Aufbau eine einfache Modifikation der gnomonischen Projektion (Snyder 1989). Sie unterscheidet sich dadurch, dass sich die Projektionslinien



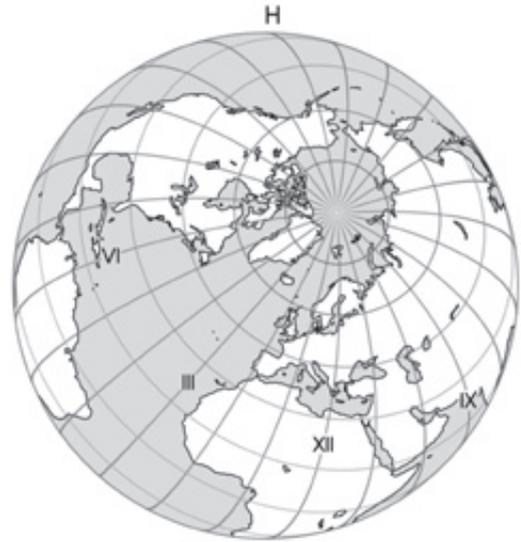
A. $n = 1.0$ (air, gnomonic projection)



B. $n = 1.02$ (silicate aerogel)



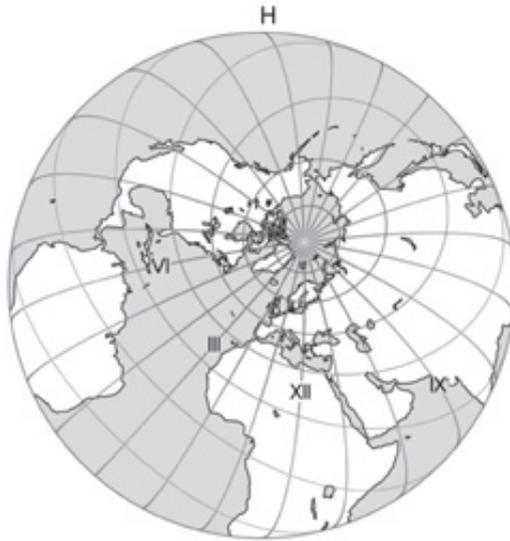
D. $n = 1.33$ (water)



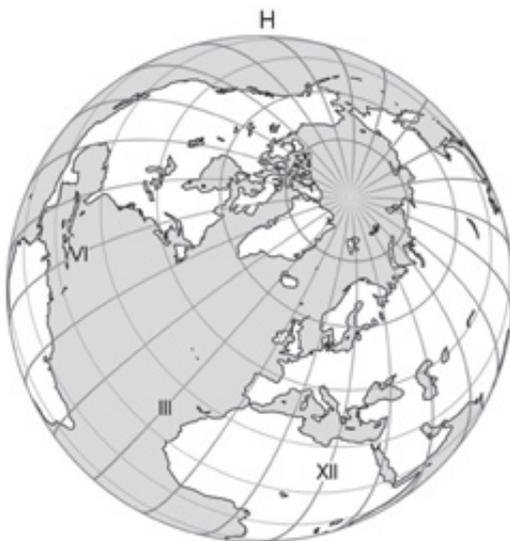
E. $n = 1.50$ (float glass)

bei O nicht gerade fortsetzen, sondern nach dem Snelliusschen Gesetz gebrochen werden. Wird die Brechzahl auf 1 eingestellt, erhält man die gewöhnliche gnomonische Projektion als Grenzfall. Die Stundenlinien sind dann bekanntermaßen Geraden und erstrecken sich bis ins Unendliche. Ist $n > 1$ wird die Abbildung endlich und jede Stundenlinie wird als Ellipsenbo-

gen abgebildet. Die Schar dieser Ellipsenbögen hat einen gemeinsamen Mittelpunkt. Die Länge ihrer Hauptachsen hängt nur von der Brechzahl n aber nicht von der Stunde h ab. Das heißt: für ein gegebenes Material sind alle Hauptachsen gleich lang (Heierli 2019). Abbildung 3 zeigt die Stundenlinien und die Linien gleicher Deklination für eine Auswahl von Brechzahlen. Um die Beziehung zwischen den Stundenlinien und dem Längennetz der Erde hervorzuheben, wurden zusätzlich zu den Stunden- und Deklinationenlinien auch die Küstenlinien der Kontinente eingezeichnet. Ihre Punkte ergeben sich direkt aus der Umrechnung von Stundenlinien zu Längengrad und von Deklinationenlinien zu Breitengrad.



C. $n = 1.10$ (unavailable)



F. $n \rightarrow \infty$ (orthographic projection)

Diskussion

Wie bereits erwähnt, konvergieren die refraktierten Stundenlinien gegen die Stundenlinien der klassischen Sonnenuhr für $n \rightarrow 1$. Dasselbe gilt für die Deklinationenlinien (Abb. 3). Die klassische Sonnenuhr ist somit ein Grenzfall der in Abb. 2 abgebildeten Anordnung. Für $n > 1$ werden die Stundenlinien in einen umhüllenden Kreis gezwungen. Sie stellen gut erkennbar ein mehr oder minder verzerrtes Abbild der Erdkugel dar (Abb. 3). Bei kleinem n ist der Globus noch stark

Abb. 3: Form der Stundenlinien (durch den Pol verlaufende schwarze Linien) und der Deklinationenlinien (um den Pol kreisende graue Linien) in Abhängigkeit der Brechzahl n . Die Weltkarten entsprechen den Stundenlinien einer Sonnenuhr für Honolulu (H) mit Blick nach süd-ost. Die römische Ziffer XII kennzeichnet die Mittagslinie, 12.00 wahre Ortszeit. Die Elliptizität der Stundenlinien ist deutlich zu erkennen. Ohne diese Schlüsseleigenschaft würden die Stundenlinien das Erscheinungsbild der Erde nicht hervorbringen.

verzerrt, doch nimmt die Verzerrung mit steigendem n rasch ab. Bei $n \approx 1.5$ erscheint das Bild der Weltkugel bereits vertraut. Im Grenzfall $n \rightarrow \infty$, verschwindet die Verzerrung und das Abbild konvergiert gegen eine orthografische Projektion der Erde oder, in Bezug auf Sonnenuhren, gegen die orthografische Projektion einer Kugelsonnenuhr. Die Kugelsonnenuhr, oder genauer gesagt ihre orthografische Projektion, stellt somit einen weiteren Grenzfall der in Abb. 2 abgebildeten Anordnung dar. Das Snelliussche Gesetz verbindet auf diese Weise zwei grundsätzlich verschiedene Arten von Sonnenuhren: die klassische Sonnenuhr des Mittelalters und die Kugelsonnenuhr der Antike. Gleichwohl verbindet das Gesetz auch zwei Projektionsarten: die gnomonische Projektion und die orthografische Projektion. Als Heinz Schilt seine Unterwassersonnenuhr entwarf, hat er wohl nicht erkannt, dass er damit das Abbild der Erde auf dem Beckengrund hätte abbilden können (oder falls er es doch erkannte, erwähnte er es nicht). In seiner Anordnung wäre allerdings das Abbild der Erde spiegelverkehrt erschienen. Für $n = 1,33$, die Brechzahl von Wasser, wäre die Verzerrung der Erde zudem noch gut erkennbar gewesen (Abb. 3D).

Bau eines Demonstrationsobjekts

Um die in diesem Beitrag verfolgte Idee zu veranschaulichen, wurde ein Prototyp gebaut. Er wurde entworfen, um auf dem Fensterbrett eines sonnigen Fensters zu stehen. Der Korpus besteht aus einer dicken Platte Acrylglas. Im Unterschied zu Abb. 2 ist die Planplatte senkrecht ausgerichtet. Sie hätte auch waagrecht oder beliebig ausgerichtet sein können. Die der Sonne zugewandte Seite ist transluzent, mit Ausnahme eines kleinen polierten Bereichs um O , der transparent ist. Die gegenüberliegende Seite ist als Mattscheibe ausgebildet. Auf dieser Mattscheibe sind die berechneten Stundenlinien angebracht. Zusätzlich zur Anzeige der wahren Ortszeit, wurden auch die Stundenlinien für die heute gültige Zonenzeit hinzugefügt (dies vermeidet die Umrechnung der wahren Ortszeit in Zonenzeit bei jeder Ablesung). Unter Verwendung der Zeitgleichung lassen sich die Stundenlinien der Zonenzeit direkt aus den Stundenlinien der wahren Ortszeit konstruieren. Dabei ist es aber

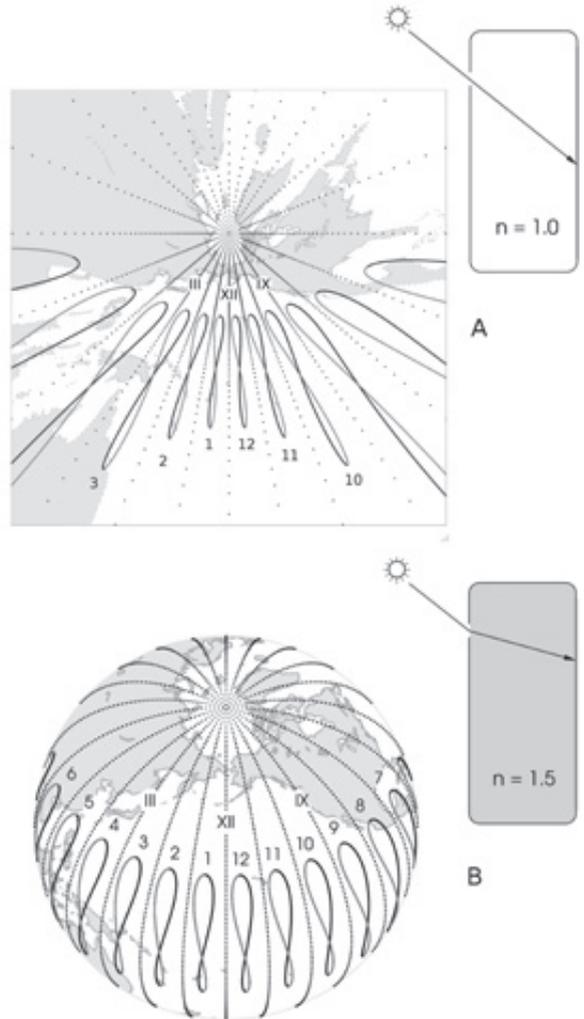


Abb. 4: Stundenlinien der wahren Ortszeit (gepunktete Linien) und der Zonenzeit (grauschwarze Schlaufen) für Zürich mit Südausrichtung. (a) klassisches Zifferblatt, das sich aus einer Brechzahl von 1 ergibt. (b) Zifferblatt resultierend aus einer Brechzahl von 1.5. Die schwarzen Halbschlaufen kennzeichnen die Zonenzeit zwischen Wintersonnenwende und Sommersonnenwende, die grauen Halbschlaufen die Zonenzeit zwischen Sommersonnenwende und Wintersonnenwende.



Abb. 5: Prototyp der vorgeschlagenen Sonnenuhr für Zürich (47.37 N, 8.53 E) in Südausrichtung. Die Größe des Gerätes beträgt 15 cm × 15 cm × 6 cm. Die Sonnenuhr zeigt sowohl die wahre Ortszeit als auch die Mitteleuropäische Zeit (MEZ) an. Die Zeit wird im Zentrum des Lichtflecks abgelesen, der durch das Durchlassen der Sonnenstrahlen bei O gebildet wird. Im Beispiel zeigt die Sonnenuhr den wahren Mittag an (12 Uhr wahre Ortszeit, Stundenwinkel $h = 0$). Die Küstenlinien der Kontinente sind in diesem Modell nicht dargestellt. Die Erde und ihre Position im All ergibt sich allein schon aus der Form und Orientierung der Stundenlinien.

nötig, die orbitalen Parameter der Erde als konstant anzunehmen, sodass diese Stundenlinien nicht uneingeschränkt gültig sind. Die oktale Form dieser Stundenlinien ist charakteristisch für die derzeit gültigen orbitalen Parameter der Erdbewegung (Blatter 1994; Gangui u. a. 2018).

Abbildung 4 zeigt einen Vergleich der Stundenlinien einer klassischen Sonnenuhr ($n = 1$) und jenen des oben beschriebenen Prototyps (für $n = 1.5$). Die gezeigte Lineatur entspricht einem Standpunkt des Betrachters auf der Schattenseite der Sonnenuhr. Von der besonnten Seite aus erschien das Bild spiegelverkehrt. Die Stundenlinien in der unteren Hälfte sind funktionell, d. h. sie zeigen bei Sonnenschein die Zeit an. Sie entsprechen einer Position der Sonne über dem mathematischen Horizont. Die Stundenlinien in der oberen Hälfte entsprechen einer Position der Sonne unter dem Horizont. Somit ist dieser Teil der Stundenskala auf der Erde außer Funktion, da das Direktlicht der Sonne abgeschirmt ist. Trotzdem ist auch dieser Teil der Stundenlinien eingezeichnet, da die Stundenlinien dieser Sonnenuhr nicht nur die Zeit anzeigen, sondern auch die Erde porträtieren. Damit stellt die Sonnenuhr die himmelsmechanische Beziehung zwischen Erde und Sonne praktisch selbsterklärend dar. Sie erfüllt so dieselbe Funktion wie ein Planetarium, ohne bewegliche Teile zu benötigen (mit Ausnahme der Bewegung der astronomischen Körper). Der Prototyp der neuen Sonnenuhr ist in Abb. 5 dargestellt. Für seine Konstruktion wurde eine planparallele Platte mit einem Brechungsindex von 1,49 verwendet. Die Küstenlinien der Kontinente werden auf diesem Modell nicht angezeigt. Die Erde und ihre Position im All wird in diesem Fall einzig durch die Form und Ausrichtung der Stundenlinien angezeigt. Bei genauer Ausrichtung zeigt der Prototyp die vollen Stunden der wahren Ortszeit mit einer Genauigkeit von ca. 1 min im zentralen Bereich. Im Randbereich ist die Genauigkeit etwas geringer. Diese Werte entsprechen der Erwartung für eine kleine Sonnenuhr.

Schlussfolgerungen

In diesem Beitrag wurde eine neuartige Sonnenuhr vorgestellt. Ihre Originalität liegt in der Ausbildung von elliptischen Stundenlinien, welche die Erde und ihr Längennetz visuell darstellen. Die Sonnenuhr veranschaulicht ein räumlich ausgerichtetes, zweidimensionales kosmisches Miniaturmodell des Sonne-Erde-Systems. Die zugrunde liegenden Berechnungen beruhen auf einer einfachen Modifikation der gnomonischen Projektion, bei der die Strahlen im Zentralpunkt gemäß Snelliusschem Brechungsgesetz gebrochen werden. Die Lineatur der Stundenlinien ist abhängig von der Brechzahl n des Mediums zwischen Schattenwerfer und Auffangfläche. Für $n \rightarrow 1$ konvergieren die Stundenlinien gegen die Stundenlinien der beliebtesten Sonnenuhr der Neuzeit: die klassische Sonnenuhr. Für $n \rightarrow \infty$ konvergieren sie gegen ein Abbild der beliebtesten Sonnenuhr der Antike: die Kugel Sonnenuhr. Zwischen diesen beiden Grenzfällen gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, eine Sonnenuhr für verschiedene Brechzahlen zu konfigurieren. Je größer die Brechzahl, desto mehr gleichen die Stundenlinien einer vertrauten orthografischen Projektion der Erde. Je kleiner die Brechzahl, desto mehr ähneln sie einer gnomonischen Projektion der Erde. Aufgrund ihrer attraktiven und intuitiven Stundenlinien stellt die vorgestellte Sonnenuhr ein würdiges neues Mitglied in der altherwürdigen Familie der Sonnenuhren dar.

Dieser Beitrag ist eine gekürzte Übersetzung eines im American Journal of Physics unter CC BY Lizenz erscheinenden Artikels (HEIERLI, J., A sundial with hour lines portraying the Earth, Am. J. Phys. 87 (12), 2019). Sein Inhalt ist unter Achtung der CC BY Lizenz frei nutzbar.

Literatur

- AUDOIN, C. / GUINOT, B.: The measurement of time: Time, frequency and the atomic clock, Cambridge University Press New York 2001.
- BAUCH, A.: Atomare Definition der Zeiteinheit S.1967 – 2017, in: Jahresschrift 2018 der Deutschen Gesellschaft für Chronometrie 57, 2018, S.35 – 50.
- BENSKY, T. J.: The longitude problem from the 1700s to today: An international and general education physics course, in: Am. J. Phys. 78, 2010, S. 40 – 46.
- BILFINGER, G.: Die mittelalterlichen Horen und die modernen Stunden, Kohlhammer Stuttgart 1892, S. 175.
- BLATTER, C.: Von den Keplerschen Gesetzen zu einer minutengenauen Sonnenuhr, Elem. Math. 49, 1994, S.155 – 165.
- BROUWER, D.: The accurate measurement of time, in: Physics Today 4, S.1951, 6 – 15.
- DRECKER, J.: Die Theorie der Sonnenuhren, De Gruyter Berlin 1925.
- FÄSI, H. J.: Deliciae Astronomicae, Bodmer Zürich 1697.
- FEUSTEL, O.: Analyse der Hohlhalbkugel-Sonnenuhr im Vatikanischen Museum, in: Jahresschrift 2018 der Deutschen Gesellschaft für Chronometrie 57, 2018, S.153 – 172.
- FLÜCK, H. / GAUTSCHY, R.: Zwei Sonnenuhren aus Vindonissa – archäologisch, archivalisch und astronomisch betrachtet, in: Jahresbericht Gesellschaft Pro Vindonissa, 2016, S. 2 – 23.
- GANGUI, A. / LASTRA, C. / KARASEUR, F.: On Times and Shadows: The Observational Analemma, The Physics Teacher 56, 2018, S.367 – 369.
- HEIERLI, J.: A sundial with hour lines portraying the Earth, Am. J. Phys. 87(12), 2019, S. 955 – 960.
- HENNIG, R.: Sonnenuhren in Genf, in: Schweizerische Bauzeitung 38, Sonderdruck, 1976, S.1 – 3.
- HOLDEN, C.: Recreating the Miracle of Ahaz, Science 267(5204), 1995, S. 1599.
- MEYER, J.: Die Sonnenuhr und ihre Theorie, Harri Deutsch Frankfurt am Main 2008, S. 78.
- PHILIPP, H. / ROTH, D. / BACHMANN, W.: Sonnenuhren Deutschland und Schweiz, DGC Stuttgart 1994.
- ROHR, R. R. J.: Sundials History, Theory, Practice, Dover New York 1996.
- SADLER, P. M.: An ancient time machine: The Dial of Ahaz, in: Am. J. Phys. 63, 1995, S. 211 – 216.
- SCHILT, H.: Ebene Sonnenuhren, Biel 1985, S. 30–32.
- SCHUMACHER, H.: Sonnenuhren, Callwey München 1978, S. 113.
- SNYDER, J. P.: Map Projections A Working Manual. U. S. Geological Survey Professional Paper 1395, U. S. Government Printing Office Washington DC 1987, S. 164 – 168.
- SNYDER, J. P. / VOXLAND, P. M.: An album of map projections. U. S. Geological Survey Professional Paper 1453, U. S. Government Printing Office Washington DC, 1989.
- TURNER, A. J.: Sun-dials: History and classification, in: Hist. Sci., 27, 1989, S. 303 – 318.
- WAHR, J. M.: The Earth's rotation, Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 16, 1988, S. 231 – 249.
- WAUGHT, A. E.: Sundials: their theory and construction, Dover New York, S. 120.