

Treffen des Kölner Uhrenkreises am 27. Oktober 2018

Bei Sonne geht 'se, bei Regen steht 'se. Wie funktioniert die Sonnenuhr?

Harald Grenzhäuser

Vor einem "vollen Haus" im Kölner Uhrenkreis hielt Harald Grenzhäuser einen sehr interessanten Vortrag über die Funktion der Sonnenuhr. Herr Grenzhäuser baut seit 1985 Sonnenuhren und kam darüber zur erdnahen Astronomie. Mit vielen selbst hergestellten Modellen hat er uns die Funktion der Sonnenuhr näher gebracht.

Wie funktioniert die Sonnenuhr

Schnellantwort in Gedichtform:

**„Wenn sich die Sonne hoch am Himmel zeigt,
fällt ihr Licht auf den Stab, der schief geneigt.
Am Zifferblatt ihr davon einen Schatten seht,
und in dem wie der sich weiterdreht,
erkennt man wie die Zeit vergeht.“**

Gut, auch wenn damit der Anzeigevorgang korrekt beschrieben ist, so müssen wir doch etwas „tiefer einsteigen“, um zu verstehen wie das „Räderwerk in der Sonnenuhr“ funktioniert. - Und mit der bloßen Bilderschau schöner Sonnenuhren erreicht man das auch nicht.

Zu Beginn eine technische Frage zu dem Blockschaltbild einer Uhr auf der nächsten Seite: Welche der gezeigten Baugruppen erfordert bei einer „guten“ Uhr die größte Fertigungspräzision? Der Taktgeber, er ist entsprechend teuer und „sensibel“!



Herr Grenzhäuser mit einem selbstgebautes Tellurium.

Mit der Zunahme des Bahnbetriebs stieg im 19. Jahrhundert der Bedarf an Eisenbahnuhren. Deshalb hat man dort die ersten (großen) Uhrenanlagen errichtet: Hier besitzt nur die zentrale Mutteruhr einen Taktgeber. Deren Minutentakt wird auf elektrischem Weg - bis heute - an „unzählige“ Tochteruhren verteilt.

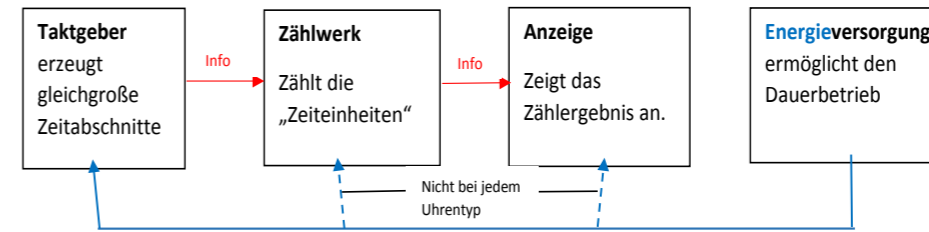
Der Vorteil: Die Endgeräte sind recht robust, witterungsunempfindlich und laufen - da zwangsgesteuert - alle im Gleichtakt. So entsteht eine große Genauigkeit der Anzeige.

Der Nachteil: Die langen Übertragungswege sind störungsanfällig, so dass Tochteruhren gelegentlich ausfallen. Ihre Betriebsstabilität lässt zu wünschen übrig.

Auch **Sonnenuhren sind Tochteruhren**, also bloße Zeit-Anzeigegeräte. Ihr gemeinsamer Taktgeber ist die Erdbewegung. Für eine richtig konstruierte Sonnenuhr gilt der Grundsatz: **„Wenn sie anzeigt, dann zeigt sie richtig“.**

Doch Sonnenuhren sind bekanntlich keine „Dauerläufer“ (Theoretisch wäre ein 50%-Betrieb im Jahresmittel möglich, in der Praxis sind 30% wünschenswert).

Weil die Kirchturmuhren (= Räderuhren) genau entgegengesetzte Eigenschaften besitzen, ergänzen sich die beiden Uhrentypen „ideal“. So



Das Blockschaltbild einer mechanischen Uhr.



ist es kein Zufall dass sich früher an (fast) jedem Kirchturm auch eine Sonnenuhr(*) befand, denn „nach was“ sollte man die Räderuhr denn stellen? (*= Oft war es nur ein „Mittagweiser“, ein nach Süden weisender Stab, dessen senkrechter Schattenstrich den wahren Mittag anzeigt).

Übrigens: Nicht die steigende Qualität der Räderuhren machte diese Sonnenuhren überflüssig, sondern das Nachrichtenwesen! Erst der Rundfunk konnte die genaue Uhrzeit flächendeckend im Land verkünden.

Hat damit das Doppeluhrenprinzip heute ausgedient? Nein! In einer **Funkuhr** schafft eine ständig laufende Quarzuhr die störungsfreie - sprich stabile - Zeitanzeige. Nur einmal täglich wird der „Nachfolger der Räderuhr“ mittels Funktelegramm automatisch nachgestellt. Das Funkempfangsteil (= Nachfolger der Sonnenuhr) ist eine Tochteruhr, ihre Mutteruhr ist die hochgenaue Atomuhr in der PTB-Braunschweig.

Zurück zur Sonnenuhr. Ihr Takt ergibt sich aus den beiden Erddrehungen.

Für die Details ein Blick auf die erdnahe Astronomie: Das Foto rechts zeigt ein Tellurium, ein Sonne-Erde-Modell. Der 38cm lange Arm entspricht der Distanz zwischen Erde und Sonne. Letztere wird hier maßstabgetreu durch ein 3mm Kügelchen symbolisiert. Am anderen Ende des Arms steht die Erde, allerdings 3000fach zu groß dargestellt. Maßstabgerecht wäre sie dünner als ein Haar, also nicht mehr erkennbar (Der Mond würde diese Mikroerde in 1 Millimeter Abstand umkreisen, der nächststehende Fixstern wäre ca. 100 km entfernt. So viel zu den astronomischen

Größenordnungen). Wie alle Massen so ziehen sich auch Sonne und Erde gegenseitig an (Die „Gezeitenkraft“ der Sonne hebt bei „Flut“ den Erdboden ca. 15 cm an, der uns viel näher stehende Mond um ca. 30 cm). Allgemein: Um den Gravitationskräften entgegen zu wirken, müssen sich Himmelskörper umeinander drehen, denn nur die Zentrifugalkraft schafft „dauerhaften“ Abstand im Weltraum.

So rast die Erde mit 100facher Schallgeschwindigkeit um die Sonne. Würde sie anhalten, in nur 66 Tagen wären wir in den „Glutöfen“ gestürzt. Also: Unser Sonnenumlauf ist überlebenswichtig. Eine Runde dauert ein Jahr.

Die 2. für die Zeitmessung relevante Erdbewegung ist ihre Drehung um ihre eigene Achse, die „Tagesdrehung“.

Sie verläuft zwar nur halb so schnell wie der Stundenzeiger einer Uhr, doch weil wir in Deutschland gut 4000 km über der Erdachse stehen, beträgt unsere Drehgeschwindigkeit ca. 1000 km/Stunde. Anschaulich ausgedrückt: Um die Sonne ständig im Süden zu erblicken, muss man mit annähernder Schallgeschwindigkeit von Ost nach West über unsere Heimat hinweg fliegen. Am Äquator benötigt man 1600 km/Std.

Ja, mit „unseren“ Maßstäben gemessen ist die Erde nicht nur schnell, sie ist auch schwer.

Das gleiche spezifische Gewicht wie die Erdkugel hat der Gewichtsglobus im Foto auf der nächsten Seite: 5,5 kg/Liter. Sein Händling (Gewicht, Durchmesser) entspricht grob der Eisenkugel beim Leichtathletik-Kugelstoßen. Auch der Erdkern



Tellurium, ein Sonne-Erde-Modell.

Gewicht der Erde erklärt am selbstgebauten Modell: Das Gewicht der Erdkugel (Ø 14 cm) beträgt 8 kg. Das Gewicht der Sonne im gleichen Maßstab würde 2600 Tonnen betragen (Rhein-Frachtschiff).



besteht bekanntlich aus Eisen, und das wird am Erdmittelpunkt sogar auf die Dichte von 12 kg/Liter zusammengedrückt („schwerer als Blei“)!

Physikalisch gesehen ist die Erde ein sich schnell drehender, schwerer **Kreisel**. Durch die Kreiselkräfte bleibt die Lage der Erdachse „stets“ unverändert. Konkret: Verlängert man gedanklich das nördliche Ende der Erdachse in den Weltraum, so trifft man zu jeder Tages- und Jahreszeit immer den Polarstern. Wir Erdbewohner sehen, dass sich um ihn der gesamte Sternenhimmel in 23 Stunden, 56 Minuten 8 Sekunden dreht. Tatsächlich aber hat sich dabei die Erdkugel (mit uns) einmal um sich selbst gedreht! Den so entstandenen Sterntag und die daraus abgeleitete Sternzeit ist jedoch nur für Astronomen interessant. Unser Lebensrhythmus ist vom Sonnenlicht abhängig und der Sonnentag dauert etwas länger: Denn während des Sterntages ist unser Planet auf der Sonnenumlaufbahn weitergelaufen, und zwar um knapp ein Winkelgrad ($360^\circ/365\text{Tage} = 0,98\dots^\circ/\text{Tag}$).

Prinzip der himmlischen Zeitmessung.

Konsequenz: Damit wir, von ortsfestem Standort aus, die Mittagssonne wieder im Süden erblicken,

muss sich die Erde um dieses eine Winkelgrad zusätzlich drehen, das dauert im Jahresmittel 4 Minuten (genaue Details später beim Thema Zeitgleichung).

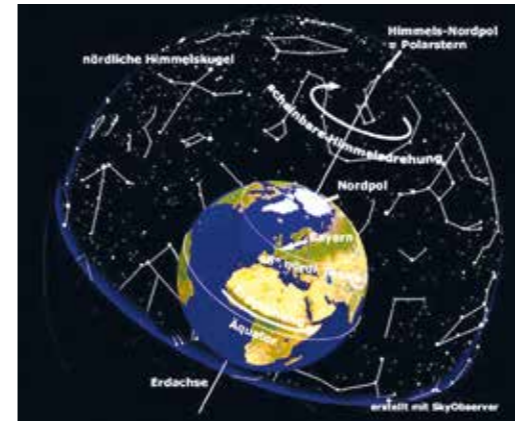
Zusammengefasst: Für eine 360° Drehung benötigt die Erde 23 Std 56 Min. Das ist ein Sterntag. Der Fixsternhimmel steht dann wieder in der gleichen Stellung (Sternzeit: gemessen zwischen Himmel und Erde). Eine 361° Erddrehung dauert durchschnittlich 24 Stunden. Durch die zwei überlagerten Erdbewegungen sehen wir einen 360° Sonnenumlauf, den **Sonnentag**. Die Mittagssonne steht danach wieder in der gleichen Himmelsrichtung: Süden (Sonnenszeit = unsere gebräuchliche Uhrzeit, wird gemessen zwischen Sonne und Erde).

Am Rande ein astronomischer Hinweis: Weil Sterntag und Sonnentag ungleich lang sind, wandert - aus unserer Sicht - die Sonne in einem Jahr durch die „Bahn der Tierkreissternbilder“. Im Jahresverlauf wird jedes Tierkreissternbild ca. 30 Tage lang durch die Sonne überstrahlt. Es steht in der „Mitte des Tageshimmels“, ist sogar weder in der Morgen- noch der Abenddämmerung zu erkennen. Daher die Aussage: „Die Sonne steht jetzt im Sternbild (z.B.) des Löwen“.

Die Jahreszeit wird astronomisch gemessen zwischen Sonne und Sternenhimmel.

Die Entstehung der Jahreszeiten

Die Erdachse und die Erdumlaufachse (= Ekliptik-Achse) sind $23,44^\circ$ gegeneinander geneigt. Da beim Jahresumlauf die Lage der Erdachse unverändert bleibt, wird die Erdkugel abwechselnd stärker aus nördlicher bzw. südlicher Richtung beschienen.



Die Genauigkeit der Umläufe

Allgemein gilt: keine astronomische Größe ist auf Dauer konstant, überall sind Störgrößen wirksam. Die schwankende Dauer des Sterntages erfordert, das gelegentliche Einfügen einer Schaltsekunde am 31. Juni oder 31. Dezember. Durch die Gezeitenreibung wird die Erddrehung sehr minimal aber kontinuierlich abgebremst. Hingegen wirken sich Gesteinsverlagerungen innerhalb der Erdkruste (Kontinentaldrift) wesentlich stärker, aber sprunghaft aus.

Durch die Anziehungskräfte der anderen Planeten - insbesondere der nahen Venus und dem schweren Jupiter - kann die Dauer unseres Sonnenumlaufs um wenige Minuten schwanken. Je nachdem ob die anderen Himmelskörper innerhalb eines Jahres länger vor, oder hinter der Erde um die Sonne gelaufen sind, werden wir beschleunigt oder abgebremst.

Mittels Sonnenuhr sind diese minimalen Störungen allerdings nicht messbar. Doch im Sonnenumlauf „stecken“ noch 2 weitere Probleme, und diese „spüren wir“:

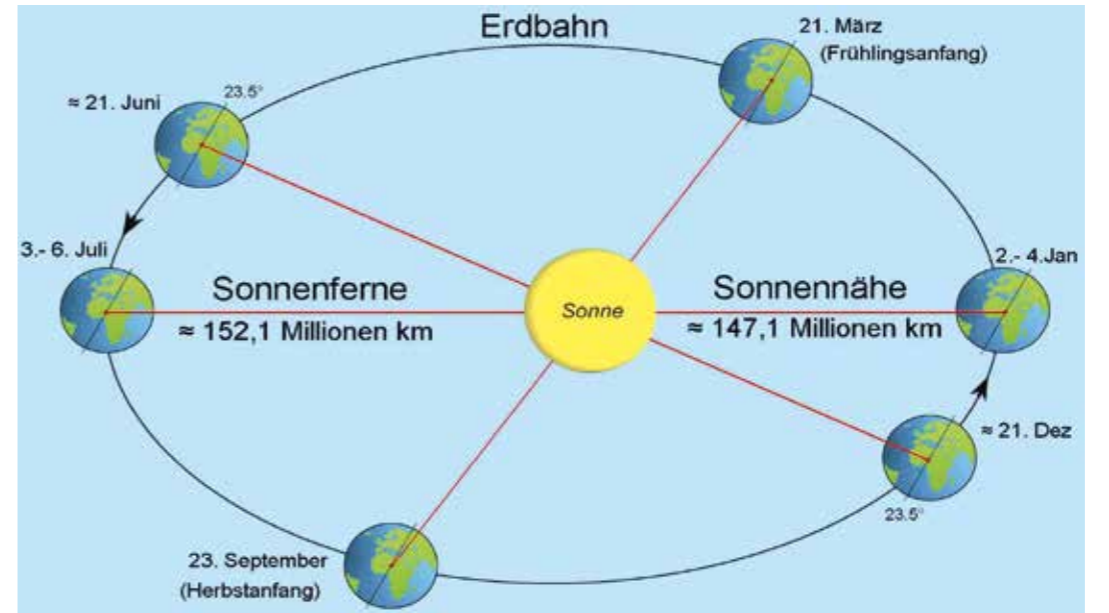
1. Unsere Bahn um die Sonne hat die Form einer - wenn auch fast kreisförmigen - Ellipse. Das bedeutet einen schwankenden Sonnenabstand während eines Jahres. Anfang Juni haben wir mit 152,5 Mil. km den größten Abstand erreicht, „fallen dann quasi 5 Mill. km tief in Richtung Sonne und werden dabei schneller. Am 3. Januar sind wir der Sonne am nächsten, nun „geht's bergauf“, wir werden langsamer. Die wechselnden Umlaufgeschwindigkeiten bedeuten auch ungleichmäßige Winkelgeschwindigkeiten. Der beschriebene $0,98^\circ$ Sonnenumlauf pro Tag ist nur ein Mittelwert er schwankt im Ganzjahresverlauf.

Erdkugel-Himmelskugel Foto: Sky Observer.

2. Dieses tägliche Weiterrücken ist Teil einer Drehung um die Ekliptikachse. Damit die Mittagssonne am Folgetag wieder im Süden steht, muss die Erde diesen Tageswinkel kompensieren und sich um ca. 4 Minuten lang weiterdrehen. Doch diese Drehung geschieht auf der Erdachse, und diese ist $23,44^\circ$ gegenüber der Ekliptikachse geneigt. Wie bei einem Kardangelen entsteht bei der Drehübertragung zwischen 2 nichtfluchtenden Wellen ein ständiges Vor- und Nacheinziehen zwischen Antrieb und Abtrieb. Bei der Erde geschieht dies mit halbjährlicher Periode.

Beide Gleichlaufstörungen zusammen sind unter dem Begriff „Zeitgleichung“ zusammengefasst und bewirken das die Tagesdauer um maximal 20 Sekunden variiert.

Die Fehlzeiten summieren sich, so dass die Sonne Anfang November 16 Minuten vor- und Mitte Februar 14 Minuten nachgeht. Im Sommerhalbjahr halten sich die Fehler mit ± 5 Minuten in Grenzen, werden auf relativ groben Sonnenuhren meist nicht bemerkt.



Die Erdbahn im Jahresverlauf.



Die Fotos zeigen ein Tellurium zu Beginn der Jahreszeiten auf der Nordhalbkugel.

Frühling: oben links
Sommer: oben rechts
Herbst: unten links
Winter: unten rechts

Wie messen die Sonnenuhren die Zeit?

Ob Räder-, Quarz-, oder Atomuhren: Ihre Taktgeber erzeugen Schwingungen, und diese werden vom Uhrwerk gezählt, das Ergebnis angezeigt (= im Prinzip Digitaltechnik). Ganz anders bei der Sonnenuhr: Weil hier die Erddrehungen den „Takt“ erzeugen, messen die Sonnenuhren den Winkel des einfallenden Sonnenlichts (messen = Analogtechnik).

Zum einfacheren Verständnis soll dies gedanklich zunächst am Nordpol (oder Südpol) geschehen, denn dort steht die Drehachse senkrecht auf dem (idealerweise) genau waagerechten Erdboden. Auf ihn legen wir eine kreisförmige 360° Winkelskala und stellen in dem Kreismittelpunkt einen geraden Stab senkrecht auf. Dieser „Stab am Pol“ heißt „Polstab“, ein Fachbegriff der für alle parallel zur Erdachse verlaufenden Schattenstäbe gilt..

Sobald im Sommerhalbjahr die Sonne am Pol über dem Horizont steht, beleuchtet sie die 2 Bauteile und der schmale Polstabschatten wirkt wie ein Zeiger auf der Skala der Bodenskala. Die Erddrehungen sehen wir hier als „Wanderung der Sonne um den Polstab“. Entsprechend dreht sich der schmale Polstabschatten auf der Bodenskala, wir messen eine Winkelgeschwindigkeit 360° in 24 Stunden, entsprechend 15°/Stunde. So ersetzen wir die Winkelskala durch eine gleichmäßig eingeteilte 24-Stundenskala und schon ist die Sonnenuhr am Nordpol fertig.

Bleibt nur noch zu klären welche Uhrzeit angezeigt werden soll.

Außerhalb der Pole ist jeder Standort durch eine definierte geografische Länge „eingemessen“. Sobald die Sonne auf ihrer Tagesreise von Ost nach West über diesen örtlichen Längengrad - den Ortsmeridian - hinwegzieht, ist dort wahrer Mittag (wörtlich „Mitte vom Tag“). Auf diese Zeitmarke bezieht sich die Ortszeit, = die Zeit, die sich aus dem Sonnenstand an diesem Standort ergibt. Auch die Zonenzeiten sind Ortszeiten, z. B. ist die MEZ, die mittlere Ortszeit des 15. östlichen Längengrades. Das ist ihr Bezugsmeridian.

Da an den Polen der Erde alle Längengrade zusammenlaufen (siehe Globus), gibt es dort zwar keine „natürliche“ Ortszeit, doch kann hier eine Sonnenuhr im Sommer sämtliche Uhrzeiten auf der Erde anzeigen. Hierzu wird lediglich das Bodenzifferblatt so gedreht das die Sonnenuhranzeige mit der ausgewählten Ortszeit übereinstimmt (die 12 Uhr Zifferblattmarke zeigt dann auf den Bezugsmeridian der Uhrzeit). Beispiel: Wird das Zifferblatt der Sonnenuhr auf die MEZ eingestellt, zeigt die 12 Uhr-Marke auf den 15. östlichen Längengrad = den Bezugsmeridian der MEZ (der Zeitgleichungsfehler wird hier vernachlässigt).

Doch: Wer will schon zur Zeitmessung an den Nordpol fahren? – Bei uns zuhause soll die Sonnenuhr stehen!

Kein Problem: Dann wird gedanklich die SU parallel in unsere Heimat verschoben. Parallel bedeutet: Die Richtung des Polstabes bleibt dabei unverändert, er steht überall parallel zur Erdachse. Aber: Am Nordpol verläuft die Erdachse durch den Polstab, in Deutschland ist sie ca. 5000 km

von ihm entfernt. Weil hier der Stab quasi wie der Zapfen einer Kurbel um die Drehachse läuft, werden die Winkelmessungen doch verfälscht. Stimmt, aber der Abstand (150.000.000 km) zur Sonne ist mehr als 20.000fach größer als die Kurbellänge, somit ist diese Winkelverzerrung vernachlässigbar.

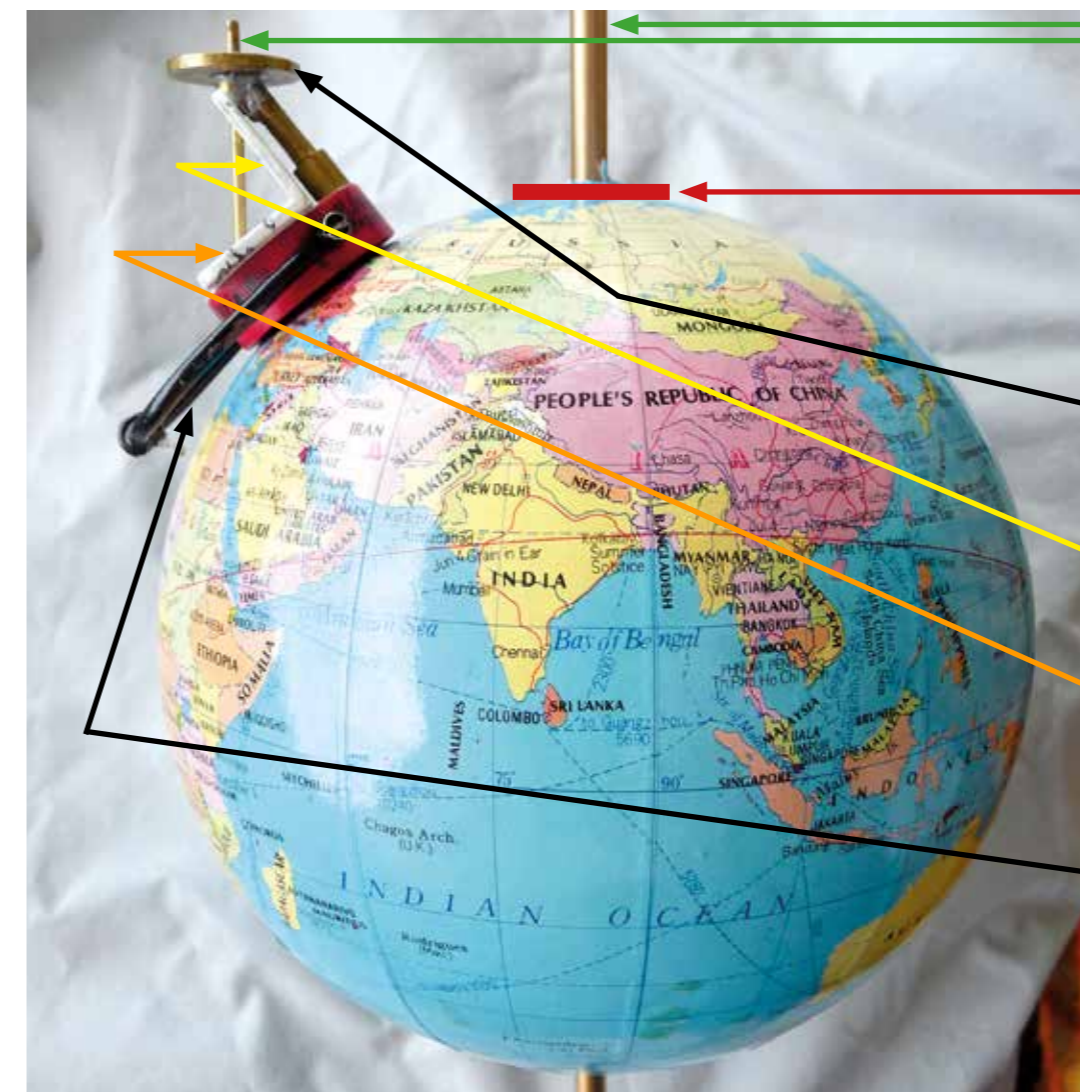
Blieb bei der Verschiebung der Nordpol-Bodensonnenuhr der Winkel zwischen Polstab und dem Zifferblatt unverändert, so ist auch die gleichmäßige Stundenmarkenanordnung noch richtig. Wenn Zifferblatt und Polstab rechtwinklig zueinander stehen, ist das eine Äquatorialsonnenuhr. Das Zifferblatt entspricht der Schnittfläche, wenn man die Erde am Äquator aufschneidet. Die nach Norden weisende Zifferblattfläche wird im nördlichen Sommerhalbjahr beschienen, die andere im nördlichen Winterhalbjahr. An den Tag-Nachtgleichen steht die Sonne in der Zifferblattebene

Was geschieht aber wenn wir die verschobene SU wieder zu einer Bodensonnenuhr machen, sprich das Zifferblatt am neuen Standort in die waagerechte schwenken? Da dabei die Polstabrichtung

unverändert blieb, entspricht jetzt der nach Norden gemessene Winkel zwischen Polstab und Zifferblatt dem Winkel der geografischen Breite des Standortes, also weniger als 90°. Folglich liegt das Zifferblatt nicht mehr in der Ebene des täglichen Sonnenumlaufs, wodurch sich die Lage der Stundenmarken verzerrt. Anschaulich: Blickt man im schrägen Winkel auf eine kreisrunde Scheibe, erscheint der Scheibenrand als Ellipse. So wie der Kreis hier gestaucht wird, entstehen auch unterschiedliche Winkelabstände der Stundenmarken. Auf einem exakt geraden Zifferblatt kann man die Lage der Stundenmarken zwar berechnen, doch bei ungeradem Untergrund ist die „Markierungsmethode“ praktischer.

Das gilt insbesondere auch für die senkrechten Zifferblätter auf unebenen Hauswänden. Diese Wandsonnenuhren sind in Deutschland am meisten verbreitet, sind sie doch in größerer Höhe von weitem sichtbar und sind hier auch vor Vandalismus geschützt.

Bericht vom KUK: Rainer im Brahm



Polstab = gedanklich verlängerte Erdachse.

Kreisförmiges Bodenzifferblatt am Nordpol mit 15° Stundenmarkenabstand. Bei Sonnenschein fällt der strichförmige Polstabschatten auf das Zifferblatt

Äquatorielles Zifferblatt

Wandzifferblatt

Bodenzifferblatt

Nach Deutschland verschobene Sonnenuhr. Ihr Polstab steht parallel mit der Erdachse.