Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft

Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft

Band: 12 (1967)

Heft: 99

Artikel: Der Bau astronomischer Uhren

Autor: Reinhardt, H.F. / Scoenenberger, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-900140

ORION

Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Bulletin de la Société Astronomique de Suisse

Band 12, Heft 1, Seiten 1-30, Nr. 99 Tome 12, Fasc. 1, Pages 1–30, No. 99

Der Bau astronomischer Uhren

von H. F. REINHARDT und R. SCHOENBERGER, Basel

Heute, da jede neue Uhr ein Fliessbandprodukt einer hochrationalisierten Industrie darstellt, wird der astronomischen Uhr wieder vermehrtes Interesse entgegengebracht, weil sie ein individuell entwickeltes Stück ist, das durch seine zahlreichen Zifferblätter und Beiwerke die schönste und lebendigste Wiedergabe der himmelsmechanischen Vorgänge erlaubt. Es treten beim Bau astronomischer Uhren, so kompliziert sie auch aussehen mögen, keine sehr schwierigen mechanische Probleme auf; ebenso werden keineswegs grosse mathematische Anforderungen gestellt. Es ergibt sich auf diesem Gebiet für den technisch interessierten Nichtfachmann ein lohnendes Betätigungsfeld, zumal sich mit einer relativ bescheidenen Ausrüstung (Drehbank mit Teilscheiben) leistungsfähige Werke erstellen lassen.

Die *Räderuhr* fand in Europa bereits im 3. Jahrhundert v. Chr. durch ARCHIMEDES VON SYRAKUS und später durch KTESIBIUS, ein Mitglied der Alexandrinischen Schule, in Form der mechanischen *Wasseruhr* (κλεψύδρα) einen ersten Grad der Vollendung. Die Kenntnisse der Hellenisten wurden durch die Araber ohne grössere Zutaten in die christliche Welt weitervererbt, die ebenfalls vorerst keine wesentliche Neuerungen beitrug. Die damaligen Uhren liessen in ihrer Ganggenauigkeit noch sehr zu wünschen übrig. Ende des 13. Jahrhunderts trat auf einmal eine grosse Verbesserung auf, deren Erfinder wir nicht kennen: das durch ein Gewicht angetriebene Werk, dessen Gleichlauf durch eine mechanische Hemmung, eine Spindel, gewährleistet wird. Uhren dieser Bauart, die noch keine Zeiger besassen und bloss die Stunden schlugen, finden wir kurz nach 1300 zuerst in Frankreich (Paris, Cambrai, Beauvais, Cluny etc.) und in den oberitalienischen Städten, bald aber auch in England und Deutschland. Ein Werk, das mit einem Male alle technischen Fortschritte seiner Zeit und eine grosse astronomische Tradition zu einer Synthese vereinigte, war die Strassburger Uhr von 1354. Sie war mit ihren beweglichen Figuren und ihren mannigfaltigen astronomischen und kalendarischen Angaben das Vorbild für alle späteren Uhren dieser Art. Die Einführung des kopernikanischen Systems, des Pendels und andere Verbesserungen führten zu einem hohen Grad der Perfektion, die um 1842 in der Astronomischen Uhr von J.-B. SCHWILGUÉ im Strassburger Münster ihren vorläufigen Höhepunkt fand. Hervorragendes Beispiel mathematischer Berechnung und mechanischer Präzision, stellt sie eines der bedeutendsten Werke der Technik überhaupt dar. Neue Ideen und deren Lösungen hat im zwanzigsten Jahrhundert vor allem W. BAUERSFELD beigetragen, der die bekannten Projektionsplanetarien von ZEISS entwickelte.

Der württembergische Pfarrer PHILIPP MATTHÄUS HAHN hat in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts eine Anzahl astronomischer Uhren gebaut, die in ihrer Berechnung und ihrer technischen Ausführung für den Liebhaber vorbildlich sind. *Abbildung 1* (siehe Titelbild) zeigt ein Werk aus dem Jahre 1775, das für den Basler Industriellen Wilh. Brenner konstruiert wurde[1]). Vernünftig in seinen Dimensionen (Grösse der Grundplatte ca. 35×40 cm), gibt es Aufschluss über den Stand der Sterne, den Lauf des Mondes und der Sonne, deren Auf- und Untergang, ihren Eintritt in die verschiedenen Himmelszeichen und die Mondphasen. Unterhalb des Minutenzeigers ist zudem die wahre Sonnenzeit angegeben. Die *Abbildung 2* zeigt das Werk von hinten in seinem einfachen und klaren Aufbau. Die Uhr läuft mit einem 50pfündigen Gewicht, dank einer besonders reibungsarmen Lagerung des Sekundenpendels, mehr als ein Jahr. Wir werden im folgenden anhand dieses HAHN'schen Werkes einige der konstruktiven Probleme einer astronomischen Uhr aufzeigen.

Zum Antrieb von Sterngloben und Sternkarten ist eine *Umwandlung von mittlerer Sonnenzeit in Sternzeit* notwendig. Dies erfordert eine Übersetzung im Verhältnis 365.2422:366.2422.

Eine geeignete Methode zur Auffindung von Näherungen für *Zahnradübersetzungen* liefert die Theorie der *Kettenbrüche*. Sie beruht auf dem euklidischen Algorithmus, der vielfach zur Bestimmung des grössten gemeinsamen Teilers zweier Zahlen benützt wird.

Jede rationale Zahl $\frac{a}{b}$ lässt sich nach dem folgenden Schema in einen Kettenbruch entwickeln:

$$a : b = q_0 \quad \text{Rest } r_1 \quad \frac{a}{b} = q_0 + \frac{r_1}{b}$$

$$b : r_1 = q_1 \quad \text{Rest } r_2 \quad \frac{b}{r_1} = q_1 + \frac{r_2}{r_1}$$

$$r_1 : r_2 = q_2 \quad \text{Rest } r_3 \quad \frac{r_1}{r_3} = q_2 + \frac{r_3}{r_2}$$

$$\vdots \qquad\qquad \vdots$$

$$r_{(n-1)} : r_n = q_n \text{ Rest } 0 \quad \frac{r_{(n-1)}}{r_n} = q_n$$

Mit unserem Zahlenbeispiel a : b = 365 2422 : 366 2422 ausgeführt, erhalten wir folgende Werte:

365 2422 : 366 2422 =	0	Rest	365 2422
366 2422 : 365 2422 =	1	Rest	1 0000
365 2422 : 1 0000 =	365	Rest	2422
. . .			. . .
4 : 2 =	2	Rest	0

Wenn wir den ganzen Kettenbruch ausschreiben, sieht dies folgendermassen aus:

$$\frac{a}{b} = q_0 + \cfrac{1}{q_1 + \cfrac{1}{q_2 + \cfrac{1}{q_3 + \cfrac{1}{\ddots \; q_{(n-1)} + \cfrac{1}{q_n}}}}}$$

Bei rationalen Zahlen bricht diese Kettenbruchentwicklung immer von selbst ab. Man kann aber auch gewaltsam vorher abbrechen und erhält so Näherungen (1., 2., 3. ... Ordnung), die umso genauer sind, je mehr Glieder berücksichtigt werden. Beispiele:

Näherung

1. Ordnung $\frac{a}{b} = q_0 + \frac{1}{q_1} = 0 + \frac{1}{1} = 1 : 1$

2. Ordnung $\frac{a}{b} = q_0 + \cfrac{1}{q_1 + \cfrac{1}{q_2}} = 0 + \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{365}} = 365 : 366$

3. Ordnung $\frac{a}{b} = q_0 + \cfrac{1}{q_1 + \cfrac{1}{q_2 + \cfrac{1}{q_3}}} = 0 + \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{365 + \cfrac{1}{4}}} = 1461 : 1465$

4. Ordnung $\frac{a}{b} = 10592 : 10621$

5. Ordnung $\frac{a}{b} = 12053 : 12086$

genau $\frac{a}{b} = 365\,2422 : 366\,2422$

Leider lässt sich bei unserem Beispiel nur die Näherung zweiter Ordnung praktisch auswerten, da die folgenden wegen der hohen Primfaktoren (siehe untenstehende Tabelle) mit Zahnrädern nicht mehr zu realisieren sind; ihre Genauigkeit lässt jedoch noch zu wünschen übrig (Abweichung 57 sec pro Jahr).

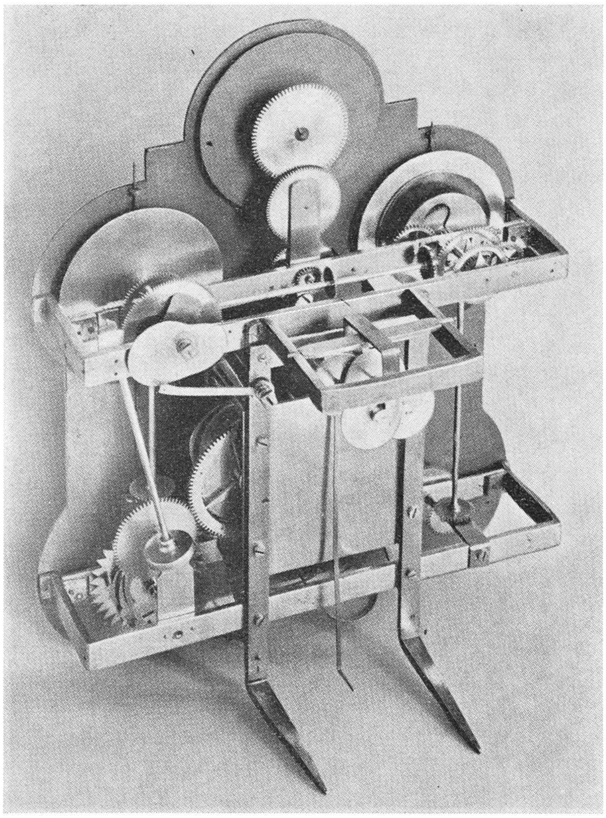

Abb. 2

Näherung		Fehler	Primzerlegung
1	= 1.000 000 000	+ 0.002 730 434	
2	= 0.997 267 759	— 0.000 001 807	$5 \cdot 73 / 2 \cdot 3 \cdot 61$
3	= 0.997 269 624	+ 0.000 000 058	$3 \cdot 487 / 5 \cdot 293$
4	= 0.997 269 560	— 0.000 000 006	$2^5 \cdot 331 / 13 \cdot 19 \cdot 43$
5	= 0.997 269 568	+ 0.000 000 002	$17 \cdot 709 / 2 \cdot 6043$
genau	= 0.997 269 566	0.000 000 000	

Es empfiehlt sich, hier ein Erweiterungsverfahren anzuwenden, wie es z. B. von W. BAUERSFELD angegeben wurde. Da diese Methode, obschon einfach in ihrer Anwendung, den Rahmen einer Einführung sprengen würde, müssen wir auf die entsprechende Veröffentlichung hinweisen[2]). HAHN hat für seine Uhr folgende – wohl nach ähnlichem Schema berechnete – Lösung des Problems gewählt (vgl. *Abb. 3*):

$$365\,2422 : 366\,2422 \approx \frac{44 \cdot 79 \cdot 29}{76 \cdot 38 \cdot 35} = 0.997\,269\,489$$

(Abweichung 0.000 000 077). Ganz oben in *Abbildung 2* ist diese Übersetzung zum Antrieb der Sternkarte zu sehen. Noch bessere Resultate lassen sich oft mit geringerem Aufwand durch differentielle Untersetzungen erreichen[3]). Auf diese Weise hat SCHWILGUÉ eine Genauigkeit erzielt, die vollkommen dem damals bekannten Wert der Länge des tropischen Jahres entspricht. Der Fehler liegt somit beinahe in der Grössenordnung der zeitlichen Änderung des Verhältnisses (Weltzeit : Sternzeit) wegen der Nichtkonstanz des tropischen Jahres (Abnahme im Jahrhundert 0.53 sec)[4]).

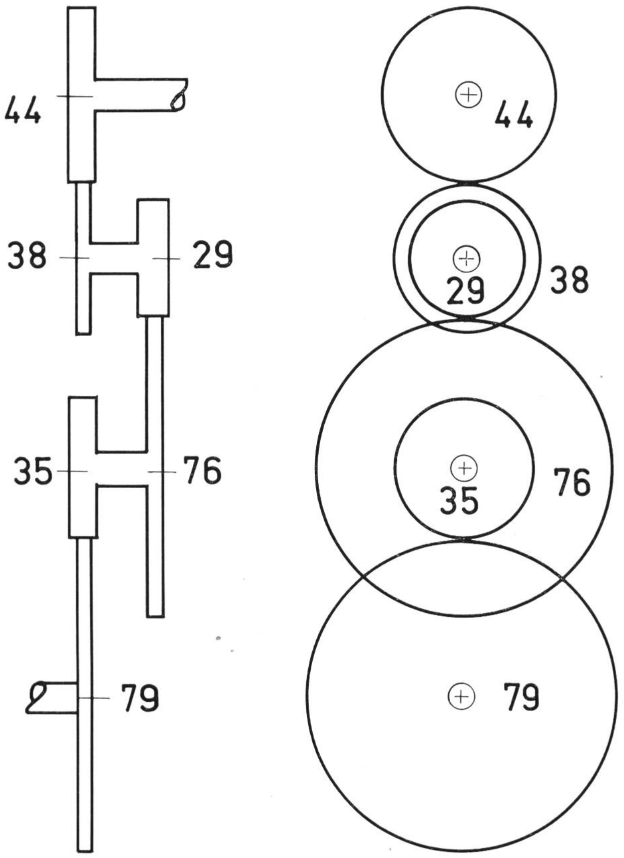

Abb. 3: Übersetzung Sonnenzeit–Sternzeit nach Ph. M. Hahn. Die Ziffern bedeuten die Anzahl der Zähne.

Abläufe, die sich nicht in einem einfachen Untersetzungsverhältnis ausdrücken lassen, also *periodische*, eventuell unstetige Funktionen, werden mit Vorteil durch *Kurvenscheiben* realisiert. Eine solche Funktion stellt die Zeitgleichung dar. Ph. M. Hahn hat diese Darstellung der wahren Sonnenzeit aus mittlerer Sonnenzeit folgendermassen gelöst (*Abb. 4*): Die Kurvenscheibe Z (Umlaufzeit 1 Jahr), die die Zeitgleichung enthält, bewegt über einen Hebelarm H, der an einem Ende ein gezahntes Kreissegment K trägt, das Rad R, das mit der Anzeigescheibe S eine Einheit bildet. Diese Scheibe, die in sechzig Minuten eingeteilt ist, wird von einer mit einem Zeiger versehenen Achse getragen, die sich gleichzeitig mit dem Minutenzeiger dreht. Durch die periodische Bewegung der Scheibe und die konstante Drehung des Zeigers lassen sich somit die Minuten der wahren Sonnenzeit direkt ablesen. J. B. Schwilgué hat zur Steuerung der Sonnen- und Mondgleichungen ein sinnreiches Kurvenscheibensystem erfunden, das die Summierung mehrerer komplizierter Funktionen mit verschiedener Periodizität erlaubt[5]).

Zur Anzeige des *Datums* sind aufwendigere Schaltungsmechanismen notwendig. Das Hahn'sche Schaltwerk stellt eine der einfachsten Lösungen dar (*Abb. 5 und 6*). Das Transportrad T mit vier ungleich langen Stiften (T_1, $_2$, $_3$, $_4$) dreht sich in 24 Stunden einmal. T_1 lässt das Sternrad S (31 Zähne) täglich um einen Zahn vorrücken. Die Raste R, die wie die drei Fallen mit einer Gegenfeder versehen sein muss, verhindert ein Durchdrehen des Sternrades. Am Monatsende bewegt T_2 bei Monaten mit weniger als 31 Tagen über die Falle F_1, die mit einem Stift St_1 an der Kurvenscheibe K aufliegt, den Zeiger um einen weiteren Tag. Die Kurvenscheibe besitzt für Monate von 31 Tagen eine Vertiefung, so dass die Falle F_1 nicht vom Stift T_2 erfasst wird. Um ihre Aufgabe zu erfüllen, muss sich K in zwölf Monaten gegenüber dem Sternrad einmal drehen. Dies geschieht dadurch, dass das Zahnrad Z_2 (19 Zähne) am feststehenden Rad Z_1 (19 Z.) abrollt und über das Rad Z_3 (57 Z.) und Z_4 (16 Z.) das mit der Kurvenscheibe verbundene Rad Z_5 (64 Z.) antreibt. Die Scheibe K trägt einen Stift St_2, der im Februar die Falle F_2 hervortreten lässt, und somit über T_3 den Monat auf 29 Tage

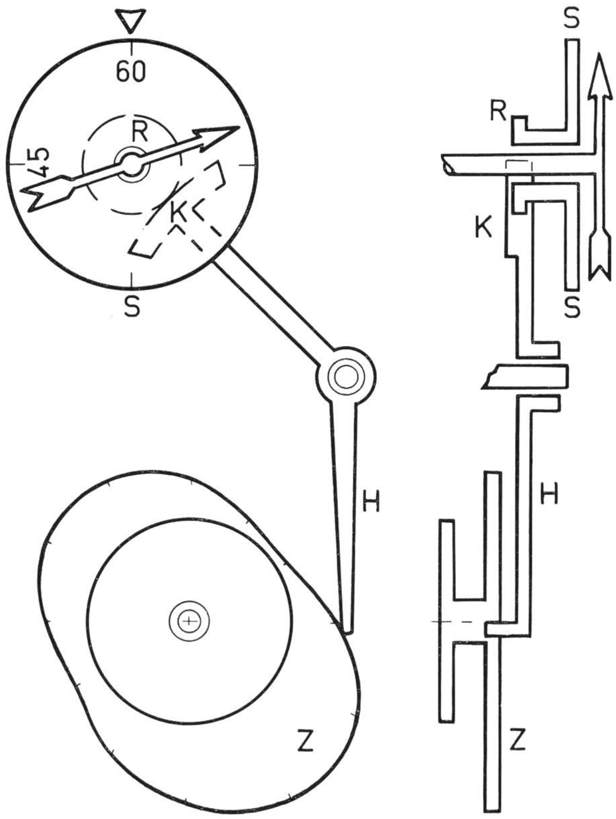

Abb. 4: Transformation von mittlerer Sonnenzeit in wahre Sonnenzeit.

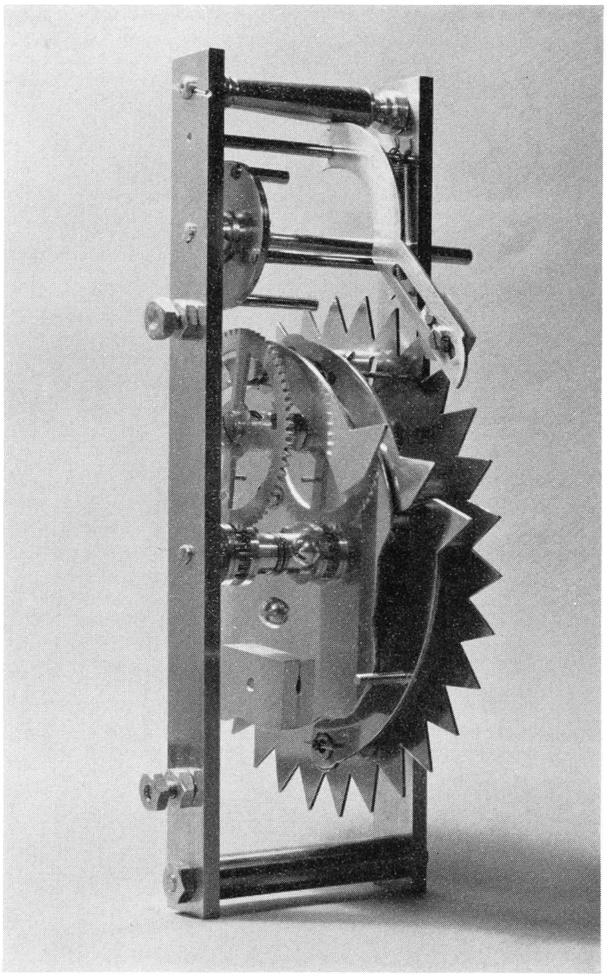

Abb. 5

reduziert. In den drei regulären Jahren mit einem Februar von 28 Tagen stellt ein besonderes Nockenrad N (64 Z.), das an Z_6 (16 Z.) abrollt, über die Nocken $N_{1, 2, 3}$ zudem eine dritte Falle F_3 aus. Nun sind alle drei Fallen angehoben und alle vier Transportstifte befördern innerhalb 24 Stunden den Datumszeiger um vier Tagesstufen. Mit dieser Schaltung sind noch nicht alle Eigenheiten des Gregorianischen Kalenders erfasst (Ausfall des Schaltjahres an der Wende der durch 4 nicht teilbaren Jahrhunderte). Ihre Berücksichtigung erfordert noch etwas mehr Aufwand; eine Erweiterung liesse sich jedoch ähnlich der Lösung Schwilgués[6]) verwirklichen. Über eine Untersetzung 1:12 an der Achse des Sternrades kann im übrigen eine Umdrehungszeit erreicht werden, die genau einem tropischen Jahr entspricht. Beim Bau des gezeigten Modelles wurden weitgehend Zahnräder bekannter Metallbaukasten verwendet, was es für den Nachbau besonders geeignet erscheinen lässt.

Literatur:

1. Defossez Léopold: Théorie générale de l'horlogerie T. 1. 2. La Chaux-de-Fonds, Chambre Suisse de l'horlogerie 1950. (1952).
2. Ungerer Alfred: Les horloges astronomiques et monumentales les plus remarquables de l'antiquité jusqu'à nos jours. Strasbourg 1931.
3. Ungerer Alfred et Théodore: L'horloge astronomique de la cathédrale de Strasbourg. Strasbourg 1922.
4. Engelmann M.: Leben und Wirken des württembergischen Pfarrers und Feintechnikers Ph. M. Hahn. Berlin 1923.
5. Auerbach-Hort: Handbuch der physikalischen und technischen Mechanik, Bd. 2. Leipzig 1930.
6. Stager W.: Factor Table. Washington 1916 (zur Ermittlung der Primfaktoren).

Anmerkungen:

1) Das Werk befindet sich in der Uhrensammlung des Kirschgarten-Museums, Basel.
2) Lit. 5. p. 143 f.
3) Zur Theorie der differentiellen Untersetzungen cf. Lit. 1., T. 1, p. 176–186.
4) Lit. 2., p. 84 ff.
5) Lit. 2., p. 75–84.
6) Lit. 2., p. 108.

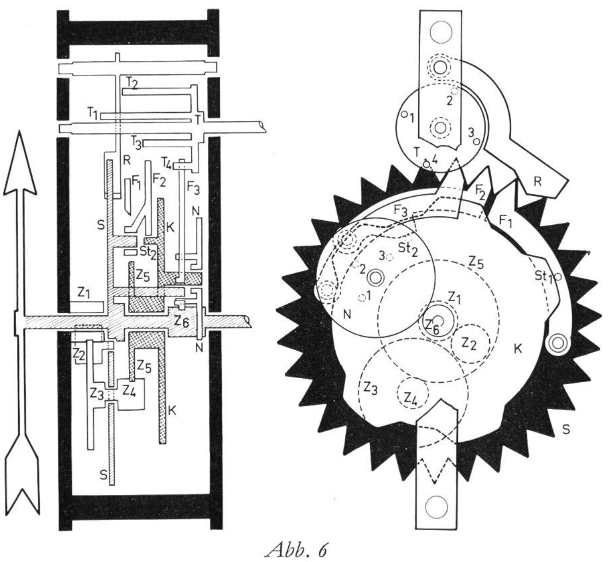

Abb. 6

Heller Meteor

Als ich am Abend des 9. November 1966 eine Helligkeitsbestimmung von R Aquilae machte, bewegte sich ein *sehr heller Meteor* von Beta Pegasi kommend durch den Adler. Er zog einen langen Schweif nach sich, der einige Sekunden sichtbar blieb. Die Helligkeit des Meteors schätzte ich auf —3 Mag., die Bewegung war anfänglich schnell, dann rasch langsamer werdend; lautlos, Farbe weiss bis gelb, Zeitpunkt des Verlöschens 19.41 MEZ. Schade, dass ich R Aquilae nicht photographisch beobachtet habe, dann wäre der Meteor auf die Platte gekommen.

E. Singer, Ennetbaden